

**YADRO FIZIKASI INSTITUTI HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR
BERUVCHI DSC.02/30.12.2019.FM/T.33.01 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

YADRO FIZIKASI INSTITUTI

QUDRATOV XIKMATULLA NORBOYEVICH

**QO‘SHIMCHA Ca KIRISHMASI KIRITILGAN VA RADIATSIYA BILAN
HOSIL QILINGAN RANGLANISH MARKAZLARI BO‘LGAN LYUTETSIY
ORTASILIKATI SSINTILLYATORIDAGI SERIYNING
REKOMBINATSIYAVIY LYUMINESSENSIYASI**

01.04.07 – Kondensirlangan holat fizikasi

**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**

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

Qudratov Xikmatulla Norboyevich

Qo‘shimcha Ca kirishmasi kiritilgan va radiatsiya bilan hosil qilingan ranglanish markazilari bo‘lgan lyutetsiy ortasilikati ssintillyatoridagi seriyning rekombinatsiyaviy lyuminessensiyasi 3

Кудратов Хикматулла Норбоевич

Рекомбинационное свечение церия в сцинтилляторных монокристаллах ортосиликата лютеция с дополнительной примесью Ca и радиационно-наведенными центрами окраски..... 24

Kudratov Khikmatulla Norboevich

Recombination luminescence of cerium in lutetium orthosilicate scintillation single crystals with additional calcium doping and radiation-induced color centers..... 49

E‘lon qilingan ishlar ro‘yxati

Список опубликованных работ
List of publications..... 53

**YADRO FIZIKASI INSTITUTI HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR
BERUVCHI DSC.02/30.12.2019.FM/T.33.01 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

YADRO FIZIKASI INSTITUTI

QUDRATOV XIKMATULLA NORBOYEVICH

**QO‘SHIMCHA Ca KIRISHMASI KIRITILGAN VA RADIATSIYA BILAN
HOSIL QILINGAN RANGLANISH MARKAZLARI BO‘LGAN LYUTETSIY
ORTASILIKATI SSINTILLYATORIDAGI SERIYNING
REKOMBINATSIYAVIY LYUMINESSENSIYASI**

01.04.07 – Kondensirlangan holat fizikasi

**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 № B2024.2. PhD/FM1110 raqam bilan ro'yxatga olingan.

Dissertatsiya O'zbekiston Respublikasi Fanlar Akademiyasi Yadro fizikasi institutida bajarilgan.
Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o'zbek, rus, ingliz (rezyume)) Ilmiy kengash veb-sahifasida (www.inp.uz) va "Ziyonet" axborot-ta'lim tarmog'ida (www.ziyonet.uz) joylashtirilgan.

Ilmiy rahbar:

Islamov Axatkul

fizika-matematika fanlari nomzodi, katta ilmiy xodim

Rasmiy opponentlar:

Mussayeva Malika Anvarovna

fizika-matematika fanlari doktori, katta ilmiy xodim

Atabayev Baxtiyor Gafurovich

fizika-matematika fanlari nomzodi, katta ilmiy xodim

Yetakchi tashkilot:

Sharof Rashidov nomidagi Samarqand davlat universiteti

Dissertatsiya himoyasi Yadro fizikasi instituti huzuridagi DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 raqamli Ilmiy kengashning 2025-yil _____ soat _____ dagi majlisida bo'lib o'tadi (Manzil: 100214, Toshkent shahri, Ulug'bek qo'rg'oni, Yadro fizikasi instituti. Tel.: (+99871) 289-31-41; faks: (+99871) 289-36-65; e-mail: info@inp.uz).

Dissertatsiya bilan Yadro fizikasi institutining Axborot-resurs markazida tanishish mumkin (_____ raqami bilan ro'yxatga olingan). Manzil: 100214, Toshkent shahri, Ulug'bek qo'rg'oni, Yadro fizikasi instituti. Tel.: (+99871) 289-31-19.

Dissertatsiya avtoreferati 2025-yil "____" _____ kuni tarqatildi.

(2025-yil "____" _____ dagi _____ raqamli reyestr bayonnomasi).

M.Yu.Tashmetov

Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy kengash
raisi f.-m.f.d., professor

O.R.Tojiboyev

Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy kengash
ilmiy kotibi, f.-m.f. PhD, katta ilmiy xodim

S.B.Igamov

Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy kengash qoshidagi
ilmiy seminar raisi, f.-m.f.d., katta ilmiy xodim

KIRISH (falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi annotatsiyasi)

Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati. So‘nggi yigirma yil ichida yadroviy tibbiy diagnostikaning jadal rivojlanishi, jumladan, pozitron emissiya tomografiyasi (PET), yagona fotonli emissiya kompyuter tomografiyasi (YaFEKT) va kompyuter tomografiyasining jadal rivojlanishi, hamda yuqori energiya fizikasida yangi zarralarni aniqlash uchun og‘ir ionli ssintillatsion materiallariga ehtiyoj paydo bo‘ldi. Bu borada, seriy ionlari bilan aktivlashtirilgan lutetsiy oksiorosilikat $\text{Lu}_2\text{SiO}_5:\text{Ce}$ (LSO:Ce) alohida qiziqish uyg‘otadi, u istiqbolli ssintillyatsion material sifatida ko‘rilmoqda. Ce^{3+} aktivatori tufayli qisqa so‘nish vaqti (40 ns) va yuqori yorug‘lik chiqishi (26000 foton/MeV) tufayli LSO:Ce $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ (BGO) va PbWO_4 (PWO) kabi aktivlashtirilmagan ssintillyatorlarga nisbatan afzalliklarga ega, garchi uning zichligi nisbatan kichik ($7,4 \text{ g/sm}^3$) bo‘lib, bu uning kamchiligi hisoblansa ham. Bundan tashqari, 410 nm to‘lqin uzunligidagi nurlanish bo‘yicha LSO:Ce BGO va PWO dan kam emas, bu uni fotoelektrik o‘zgartirgichlarda qo‘llash uchun mos qiladi.

So‘nggi yillarda tadqiqotchilar LSO:Ce kristalining optik xususiyatlarini o‘rganishga katta e‘tibor qaratmoqdalar, uning sintillovchi potentsialini ochib berishga va allaqachon aniq bo‘lgan kamchilikni - tibbiy diagnostikada vizualizatsiyani buzadigan qoldiq lyuminessensiyani bartaraf etishga harakat qilmoqdalar. Uni yuqori energiyali ionlashtiruvchi va yadroviy nurlanish sharoitida qo‘llash istiqbollari radiatsiyaviy-optik shaffoflikni pasaytiradigan va lyuminessensiyani yomonlashtiradigan omillarni aniqlash va bartaraf etish zaruratini keltirib chiqaradi. Bugungi kunga qadar bunday tadqiqotlar yetarli darajada o‘tkazilmagan.

XX asrning 70-yillari o‘rtalarida O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasida keng zonali kislorodli kristallarda radiatsiya bilan stimullashtirilgan hodisalarni o‘rganishga bag‘ishlangan ilmiy-tadqiqot ishlari olib borildi. Ushbu tadqiqotlar lazer va optik materiallarning radiatsiyaviy-optik xususiyatlarini chuqur tushunish orqali ularning sifatini yaxshilashga qaratilgan. Respublikamizda jahon darajasida ionlashtiruvchi va yadroviy nurlanishlarni aniqlay oladigan detektorlar uchun mo‘ljallangan lyuminessent materiallarni yaratishning fundamental asoslari alohida e‘tibor bilan ishlab chiqilmoqda. Mamlakatimiz ilm-fan taraqqiyoti va ularni amaliyotda qo‘llashda muhim ahamiyatga ega bo‘lgan ushbu fundamental tadqiqot va ishlanmalarning yo‘nalishlari 2022-2026-yillarga mo‘ljallangan Yangi O‘zbekistonning taraqqiyot strategiyasida¹ o‘z aksini topgan.

O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2013-yil 1-martdagi PF-4512-sonli “Muqobil energiya manbalarini yanada rivojlantirish chora-tadbirlari to‘g‘risida”, 2022-yil 28-yanvardagi PF-60-sonli “2022-2026-yillarga mo‘ljallangan Yangi O‘zbekistonning taraqqiyot strategiyasi to‘g‘risida”gi farmonlari, 2017-yil 17-fevraldagi PQ-2789-sonli “Fanlar akademiyasi faoliyati, ilmiy-tadqiqot ishlarini tashkil etish, boshqarish va moliyalashtirishni yanada takomillashtirish chora-

¹ O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 28-yanvardagi PF-60-sonli “2022-2026-yillarda Yangi O‘zbekistonni rivojlantirish strategiyasi to‘g‘risida”gi Farmoni.

tadbirlari to'g'risida", 2019-yil 21-noyabrdagi PQ-4526-sonli "Yadro fizikasi instituti ilmiy-tadqiqot faoliyatini qo'llab-quvvatlash chora-tadbirlari to'g'risida"gi qarorlari, hamda mazkur faoliyatga tegishli boshqa normativ-huquqiy hujjatlarda belgilangan vazifalarni amalga oshirishda ushbu dissertatsiya muayyan darajada xizmat qiladi.

Tadqiqotning respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo'nalishlariga mosligi. Mazkur tadqiqot ishi respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining II. "Energetika, energiya tejamkorligi va muqobil energiya manbalari" ustuvor yo'nalishiga muvofiq bajarilgan.

Muammoning o'rganilganlik darajasi. Yadroviy tibbiyotda tashxislash uchun LSO:Ce ortosilikat monokristallarining sintillyatsion va optik xususiyatlari dunyoning ko'plab olimlari tomonidan o'rganilgan, jumladan, amerikalik (C.L. Melcher, K. Yang, D.W. Cooke), yaponiyalik (H. Suzuki, M. Kitaura, M. Kobayashi), niderlandiyalik (W. Drozdowski, A. Wojtowicz), xitoylik (Y. Shen, X. Feng), fransiyalik (L. Pidot) olimlar tomonidan; yuqori energiya fizikasi uchun esa shveysariyalik (E. Auffray, P. Lecoq), rossiyalik (Y.D. Zavartsev S.A. Koutovoi), belorussiyalik (M.V. Korjik, A.A. Fedorov), ukrainalik (Yu.V. Zorenko, V.I. Gorbenko), chexiyalik (V. Babin, V.V. Laguta) olimlar tomonidan tadqiq etilgan.

O'zbekistonlik olimlar (Sh.A. Vohidov, I. Nuritdinov va Kim Gen Chan hamda boshqa mutaxassislar) $Y_2SiO_5:(Nd, Eu)$, $Y_2Si_2O_7:(Nd, Eu)$ monokristallarda erkin va avtolokallashgan eksitonlarning lyuminessensiyasi va ularning aktivator markazlarining lyuminessensiyasi bilan raqobatini, $Gd_2SiO_5:Ce$ da esa gamma- va reaktor nurlari ta'sirida optik xususiyatlarning radiatsiyaviy barqarorligini o'rganishgan.

Bugungi kungacha $Lu_2SiO_5:Ce$ yangi ssintillyator kristallari olingan bo'lib, ularda radiatsiya ta'sirida hosil bo'lgan ranglanish va lyuminessensiya markazlarining to'planish kinetikasi, ularning relaksatsiyasi, hamda termik rangsizlanishi yetarlicha o'rganilmagan. Ca^{2+} ionlari bilan qo'shimcha legirlash orqali ssintillyatsion xususiyatlarini yaxshilashi aniqlangan, biroq $Lu_2SiO_5:Ce, Ca$ kristalida radiatsiyaning optik shaffoflikka va aktivator lyuminessensiya chiqishiga ta'siri deyarli tadqiq qilinmagan. Shu sababli, ionlashtiruvchi nurlanish ta'sirida aktivator lyuminessensiya chiqishiga hosil qilingan ranglanish markazlari va Ca^{2+} ioni bilan qo'shimcha legirlashning ta'sir mexanizmlari hali ham aniq emas.

Dissertatsiya tadqiqotining dissertatsiya bajarilgan ilmiy-tadqiqot muassasasining ilmiy-tadqiqot ishlari rejalari bilan bog'liqligi. Dissertatsiya ishi O'zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Yadro fizikasi instituti ilmiy tadqiqot ishlari rejasining O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2019-yil 21-noyabrdagi PQ-4526-sonli qarori asosida 2020-2024-yillarga mo'ljallangan ilmiy tadqiqot ishlari dasturi yuzasidan "Atom energetikasi sohasidagi tadqiqotlar, radioizotoplar olish texnologiyalarini ishlab chiqish va yadro texnologiyalarini joriy etish" mavzusi doirasida bajarilgan.

Tadqiqotning maqsadi lyutetsiy oksidortosilikati ssintillyator monokristallarida yutilgan energiyani seriy aktivator ionlariga o'tkazishda kalsiy ishtirok etadigan va ishtirok etmaydigan radiatsiya bilan generatsiya qilingan ranglanish markazlarining ta'siri mexanizmini aniqlashdan iborat.

Tadqiqotning vazifalari:

LSO:Ce monokristalida gamma nurlarining 50 MGr (ssintillyatorning yuqori energiyalar fizikasi uchun resurs chegarasidan yuqori) dozasi gacha nurlantirgandagi ranglanish markazlarining to'planish kinetikasini tadqiq qilish;

LSO:Ce monokristallarini gamma nurlari bilan 200 Gr gacha nurlantirish va 300 K haroratida 10 soatgacha bo'lgan turli vaqt oralig'ida saqlagandan so'ng termostimullashtirilgan lyuminessensiya usuli orqali (300÷600 K) ranglanish markazlarining relaksatsiya kinetikasini o'rganish: ranglanish markazlari va qamrash markazlari orasidagi bog'liqlikni topish;

LSO:Ce monokristallida gamma kvantlari bilan 70 Gr dan 50 MGr gacha dozalarida nurlantirilgandan so'ng kiritmaning gamma nurlari bilan stimullashtirilgan rekombinatsion lyuminessensiyasi kinetikasini tadqiq qilish; radiatsiyaviq turg'unlikning dozaviy chegarasi hamda sintillyator degradatsiyasining nurlanish orqali vujudga keltirilgan ranglanish markazlari bilan bog'liqligini topish;

yuqori energiyalar fizikasi uchun tez neytronlarning 10^{15} dan 10^{17} cm^{-2} gacha flyuenslari bilan reaktorda nurlantirishda hosil bo'ladigan ranglanish markazlarining 310 K da (gamma-kanaldagi harorat) ^{60}Co manbasining gamma nurlari bilan stimullashtirilgan aktivator lyuminessensiyasiga ta'sirini aniqlash;

gamma kvantlar dozasi va Ca^{2+} ionlari bilan qo'shimcha legirlashning $\text{Lu}_2\text{SiO}_5:\text{Ce}$ monokristallarining optikaviy shaffofligi va aktivator lyuminessensiyasining chiqishiga ta'sirini tadqiq qilish;

yadro tibbiyoti va yuqori energiyalar fizikasida qo'llash uchun $\text{Lu}_2\text{SiO}_5:\text{Ce}$ monokristallining optikaviy va lyuminessensiya xususiyatlarini yaxshilash bo'yicha tavsiyalar ishlab chiqish.

Tadqiqotning obyekti sifatida seriy ionlari bilan aktivlashtirilgan va qo'shimcha turli konsentratsiyali kalsiy ionlari bilan legirlangan lyutetsiy ortosilikatning sintillyator monokristallari $\text{Lu}_2\text{SiO}_5:\text{Ce}$ olingan.

Tadqiqotning predmeti radiatsiya bilan stimullashtirilgan elektron - kovak juftlari va juft nuqsonlari generatsiyasi, zaryad tashuvchilarning migratsiyasi va lokalizatsiyasi jarayonlari, ularning sintillyatorning asosiy xarakteristikalari sifatida Ce^{3+} ionlarining aktivator lyuminessensiya chiqishiga ta'siri hisoblanadi.

Tadqiqotning usullari: ^{60}Co ($E_\gamma = 1,17$ va $1,33$ MeV) manbaining gamma-kvantlari hamda VVR-SM reaktorida tez neytronlar va γ -kvantlarning aralash oqimi bilan kristallarni nurlantirish; spektroskopik usullar – optik yutilish, gamma-lyuminessensiya, fotolyuminessensiya spektrlari va (77÷620) K harorat oralig'ida termolyuminessensiya.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi quyidagilardan iborat:

$5 \cdot 10^4$ Gr dozalargacha gamma-nurlantirishdan so'ng kristallni o'stirishda vujudga kelgan nuqsonlari bo'lgan va elektron tutqichlar vazifasini bajaruvchi neytral $\text{Lu}1-\text{V}_{\text{O}5}$ - markazlarining konsentratsiyasi elektronlarni qamrab olish tufayli kamayishi, hosil bo'lgan zaryadlangan markazlar 300 K haroratda noturg'un ekanligi aniqlangan;

LSO:Ce ssintillyatorida xona haroratida vujudga keladigan qoldiq lyuminessensiya mexanizmi zaryadlangan $\text{Lu}1-\text{V}_{\text{O}5}$ - markazlardan elektronlarning

ketishi va ularning Ce^{4+} kavak markazlarida rekombinatsiyalanishi bilan bog'liq ekanligi aniqlangan;

$5 \cdot 10^4$ Gr dan yuqori dozalar bilan nurlantirilganda LSO:Ce kristalli strukturasi $Si-V_{O4}$ (213 nm), $Lu1-F-Si$ (238 nm), Ce^{3+}/F^+ (295 nm) xususiy nuqsonlar va Ce^{3+}/Ce^{4+} (263 nm) kirishma nuqsonlari generatsiyasidan tashqari, kristall uchun xos bo'lgan sariq rangni keltirib chiqaruvchi yangi $Ce^{4+}+V_O$ (422 nm) nuqson markazlari hosil bo'lishi ko'rsatilgan;

LSO:Ce ssintillyatorini $5 \cdot 10^4$ Gr dan yuqori dozalarda gamma-nurlanishi va tez neytronlarning 10^{15} cm^{-2} dan yuqori flyuyenslari bilan nurlantirilganda hosil bo'ladigan xususiy va kirishma nuqsonlar rekombinatsion jarayonlarda Ce^{4+} lyuminessensiya markazlari bilan elektron qamrash jarayonida raqobatlashishi va Ce^{3+} aktivator lyuminessensiyasini qisman qayta yutishi (reabsorbsiya) aniqlangan;

0.1 at. % Ce va 0.1 at.% Ca konsentratsiyali LSO:Ce, Ca kristallarini o'stirishda kompleks cho'zinchoq $\{Ca_{Lu}+V_O + \dots + Ce^{4+}_{Lu}\}$ nuqsonlar hosil bo'lishi aniqlandi, ular 310 K haroratda 10^7 Gr gacha bo'lgan gamma-nurlanish ta'sirida kristallarning binafsha rangini keltirib chiqaradi va Ce^{4+} aktivator lyuminessensiyaning rekombinatsiya jarayonlarini barqarorlashtiradi, qayta yutilishni bartaraf etadi va sintillyatsiya sohasida optikaviy shaffoflikni ta'minlaydi.

Tadqiqotning amaliy natijalari quyidagilardan iborat:

sintillyatorning 300 K haroratda (ishlatish oralig'i 10 soatdan kam bo'lmagan) ishlashining vaqtinchalik rejimi taklif etilgan bo'lib, u sintillyatorning qoldiq lyuminessensiya tufayli vizualizatsiyadagi shumlarni bartaraf etadi;

LSO:Ce kristallari asosidagi sintillyatorlarning $5 \cdot 10^4$ Gr dozada gamma nurlanish ta'siriga, tez neytronlar uchun esa 10^{15} cm^{-2} flyuyensgacha barqarorligining yuqori chegarasi aniqlangan;

(0.3÷0.4) at% konsentratsiyali Ca^{2+} ionlari bilan qo'shimcha legirlangan LSO:Ce kristallari gamma-nurlanish sintillyatsion detektori sifatida tavsiya etilishi mumkin. Biroq, yorug'lik chiqishini va ssintillyatsiya sohasida optik shaffoflikni barqarorlashtirish uchun ishchi harorati 325 K dan oshmasligi kerak, bu haroratdan yuqori bo'lganda yorug'lik chiqishi kamayadi.

Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati shundan iboratki, LSO:Ce monokristallarida va qo'shimcha Ca ionlari bilan legirlangan monokristallarda nurlanishdan keying qoldiq nurlanishning paydo bo'lishi, radiatsion hosil qilingan xususiy va kirishmali nuqsonli markazlarning sintillyatsiya chiqishining barqarorlashuvi va ularning rekombinatsion aktivatorli lyuminesensiyasiga ta'sirining fizik mexanizmlari aniqlangan, bu esa yadro nurlanishlarining legirlangan sintillyatsion materiallar bilan o'zaro ta'siri haqidagi tasavvurlarni kengaytiradi.

Tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati 10^7 Gr gacha bo'lgan gamma-kvantlar va 10^{15} cm^{-2} tez neytronlar flyuyensi bilan nurlantirilganda LSO:Ce,Ca (0,3÷0,4) at% ssintillyatsion kristallarining radiatsiyaga chidamliligining chegaraviy dozasi o'rnatish bilan izohlanadi, bu esa yadro tibbiyotida pozitron-emission tomografiya (PET) uchun xos bo'lgan sharoitlarda, shuningdek, Katta Adron Kollayderi (HL-LHC) eksperimental detektorlarida LSO:Ce kristallarining barqaror ishlashini ta'minlash imkonini beradi.

Tadqiqot natijalarining ishonchliligi bir-birini to'ldiruvchi - absorpsion, lyuminessent, termo- va foto-rangsizlantirish usullari majmuasidan foydalanilganligi, o'lchashlarning yuqori statistik ishonchliligi va yaxshi takrorlanuvchanligi; ionlashtiruvchi nurlanishning modda bilan o'zaro ta'siri haqidagi umumiy fizik tasavvurlarga mos keladigan natijalar va xulosalarning mantiqiyliigi va ziddiyatsizligi; shuningdek, natijalarning ma'lum fizik qonuniyatlar va nazariy modellar bilan taqqoslanganligi bilan asoslanadi.

Tadqiqot natijalarini joriy qilinishi. Qo'shimcha Ca kirishmasi kiritilgan va radiatsiya bilan hosil qilingan ranglanish markazlari bo'lgan lyutetsiy ortasilikati ssintillyatoridagi seriyning rekombinatsiyaviy lyuminessensiyasini o'rganish bo'yicha olingan natijalar asosida:

$5 \cdot 10^4$ Gr dan yuqori gamma-nurlanish dozalarida kristallarning xarakterli sariq rangi ko'rinishida namoyon bo'luvchi yangi $Ce^{4+}V_O$ nuqson markazlarini generatsiyalash; gamma-nurlanish ta'sirida kristallarning binafsha rangini keltirib chiqaruvchi va Ce^{4+} aktivator nurlanishining rekombinatsion jarayonlarini barqarorlashtiruvchi, sintillyatsiya sohasida optik shaffoflikni ta'minlovchi murakkab cho'zilgan nuqsonlarni shakllantirish bo'yicha olingan ilmiy natijalar asosida: LSO:Ce sintillyatorida nurlanishdan keyingi nurlanishning paydo bo'lish mexanizmi "Biotibbiyot muhandisligi" va "Tibbiy biologiya" bakalavriat ta'lim yo'nalishlari doirasida o'quv jarayonida qo'llanilgan ("Tibbiy elektronika" darsligi, S.X. Umarov, Buxoro: Durdon, 2024.), (Buxoro davlat tibbiyot institutining 21.02.2025-yildagi 230-son xati). Olingan natijalardan foydalanish talabalarning optik kristallarning xususiyatlarini hisobga olgan holda gamma-kvantlar ta'sirida ishlaydigan pozitron emission tomografiya va yagona fotonli emission kompyuter tomografiyasi tizimlari uchun ssintillyatsion detektorlarni tanlash motivatsiyasi haqidagi bilimlarini chuqurlashtirishga yordam bergan.

Tadqiqot natijalarini aprobatsiyasi. Tadqiqot natijalari 5 ta xalqaro va respublika ilmiy-amaliy anjumanlarida muhokamadan o'tkazilgan.

Tadqiqot natijalarining e'lon qilinishi. Dissertatsiya mavzusi bo'yicha 9 ta ilmiy ishlar chop etilgan, jumladan, Oliy attestatsiya komissiyasining doktorlik dissertatsiyalari asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan xorijiy ilmiy jurnallarda 4 ta ilmiy maqola.

Dissertatsiya tuzilishi va hajmi. Dissertatsiya kirish, beshta bob, xulosa va foydalanilgan adabiyotlar ro'yxatidan iborat. Dissertatsiya hajmi 125 betdan iborat.

DISSERTASINING ASOSIY MAZMUNI

Kirish qismida o'tkazilgan tadqiqotlarning dolzarbligi va zarurati asoslangan, tadqiqotning maqsadi va vazifalari, ilmiy yangiligi va amaliy natijalari bayon qilingan, olingan natijalarning ilmiy va amaliy ahamiyati ochib berilgan, tadqiqot natijalarini amaliyotga joriy qilish, nashr etilgan ishlar va dissertatsiya tuzilishi bo'yicha ma'lumotlar keltirilgan.

Dissertatsiyaning "**Ortosilikat lyutetsiyning strukturaviy, fizik, sintillyatsion va radiatsion-optik xossalari**" deb nomlangan I bobida strukturaviy, fizik va

sintillyatsion xossalari bo'yicha adabiyotlar tahlili o'tkazilgan. Lyutetsiy ortosilikat (LSO:Ce) monokristallari bilan boshqa silikatlar va lyutetsiy-alyuminiy granat monokristallari o'rtasidagi ssintillyatsion tavsiflarning qiyosiy tahlili o'tkazilgan. Bundan tashqari, lyutetsiy ortosilikat monokristallarining optik xususiyatlariga turli xil nurlanishlarning ta'siri, shuningdek, uning ssintillyatsion va optik xususiyatlariga Ca^{2+} ionlari bilan qo'shimcha legirlashning ta'siri natijalari keltirilgan. Yechilmagan vazifalar aniqlanib, ular asosida mazkur ishning maqsad va vazifalari shakllantirilgan.

Dissertatsiyaning **“Tadqiqot obyektlari² va tajriba usullari”** nomli II bobida tadqiqot ob'ektlarini tanlash aktivator Ce ioni va uning 0.25 at.% konsentratsiyali, LSO:Ce,Ca da 0.1, 0.2, 0.3 va 0.4 at% konsentratsiyali Ca^{2+} ionlari bilan qo'shimcha legirlangan monokristallar, shuningdek, LSO:Ce sintillyator kristallarini olish usuli asoslangan. Kiruvchi radiatsiyaning kristallning optik xususiyatlariga ta'sirini o'rganish uchun namuna harorati 310 K da 70 dan $5 \cdot 10^7$ Gy gacha bo'lgan katta dozalar oralig'ida, ikkita 0.80 va 1.1 Gr/s quvvatlarda 1.17 va 1.33 MeV energiyali ^{60}Co izotop manbaining gamma-kvantlari bilan nurlantirildi. Quvvati 10 MWt bo'lgan WWR-SM reaktorida aralash neytron-gamma oqimlari bilan nurlantirish uchun na'munalar alyuminiy folga bilan o'raldi va devor qalinligi 1 mm bo'lgan kadmiy stakanga joylashtirildi, u issiqlik va rezonans neytronlarini ajratib oladi va faqat energiyasi > 0.1 MeV bo'lgan tez neytronlarni o'tkazadi, oqim $3 \cdot 10^{13}$ cm^{-2} (gamma-komponent 37 Gy/s). Na'munalar solingan to'rtta konteyner 10^{15} (Gy), 10^{16} , $5 \cdot 10^{16}$ va 10^{17} cm^{-2} tez neytron flyuyenslari bilan nurlantirildi. Tadqiqot vazifalarini bajarish va tadqiqot maqsadiga erishish uchun zarur bo'lgan gamma-dozasi va tez neytron flyuyenslarini, shuningdek optik tajriba usullarni tanlashga asoslangan.

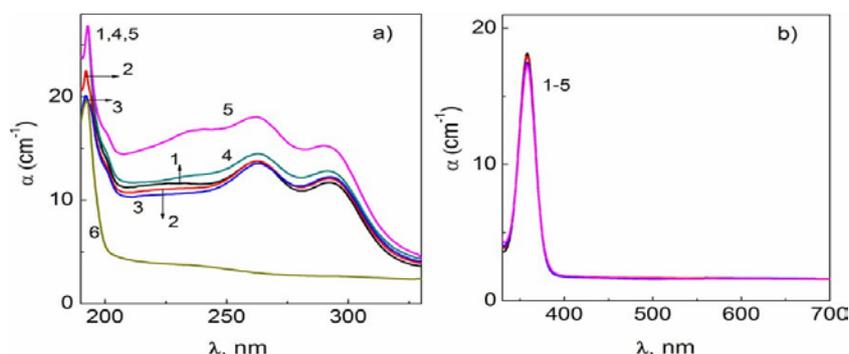
Optik yutilish, lyuminessensiya va termolyuminessensiya spektrlarining barcha o'lchovlarida tajriba xatoligi (1÷3) foizdan oshmadi. Namunalar bo'yicha statistik xatolik esa 5 foizni tashkil etdi.

Dissertatsiyaning **“Gamma kvantlar bilan nurlantirishdan oldin va keyin aktivlashtirilgan $\text{Lu}_2\text{SiO}_5:\text{Ce}$ kristallarining spektral xarakteristikalari”** nomli III bobida LSO:Ce ssintillyatsion monokristallarining optik xossalari ^{60}Co gamma kvantlarining ta'siri bo'yicha tajriba natijalari keltirilgan.

Nurlanmagan LSO:Ce namunalarining optik yutilish (OYu) spektrlarida spektrning ultrabinafsha (UB)-sohasida 190 va 210 nm va (220÷250) nm li strukturatsiz keng polosalari kuzatiladi (1a-rasmga qarang, 1-egri chiziq), shuningdek Ce^{3+} -Ce1-ionlarining $4f \rightarrow 5d$ elektron o'tishlari bilan bog'liq 260, 295 ma'lum bo'lgan polosalar (yettita kislorod ionlari bilan koordinatsiyalangan) va 360 nm li markazlar (1b-rasmga qarang, 1-egri chiziq) kuzatiladi. Nurlantirilmagan LSO:Ce kristali OYu spektri boshqa tadqiqotchilar tomonidan ilgari e'lon qilingan spektrlarga o'xshash bo'lib, ular Ce^{3+} ionlaridagi $4f \rightarrow 5d$ o'tishlarga 200, 220, 264, 295 va 356 nm uzunlikdagi OYu chiziqlarini beradi. Shuni ta'kidlash kerakki, Y_2SiO_5 (YSO) ittriy ortosilikatining nurlantirilmagan nominal toza namunasining OYu spektrlarida ham 195 nm OYu va (200÷250) nm kuchsizroq polosa kuzatiladi (6-egri chiziq), bu ham ikkita ekvivalent bo'lmagan metall tugunlari bo'lgan C2/c monoklin tuzilishga

² Namunalar Scintillation Materials Research Center, Department of Materials Science and Engineering, University of Tennessee, Knoxville, USA (A.F.Rakov va C.L.Melcher) hamkasblari tomonidan taqdim etilgan.

ega bo‘lgan LSO kristalida mavjud (1a-rasmga qarang, 1-egri chiziq). Bu (190÷250) nm sohadagi OYu sohalarning Ce aktivator ionlari mavjudligidan va ularning argonning qaytaruvchi atmosferasida Choxralski usulida o‘stirishda hosil bo‘ladigan radiatsiyadan oldingi (yoki o‘shish) nuqsonlari bilan bog‘liqligidan dalolat beradi.



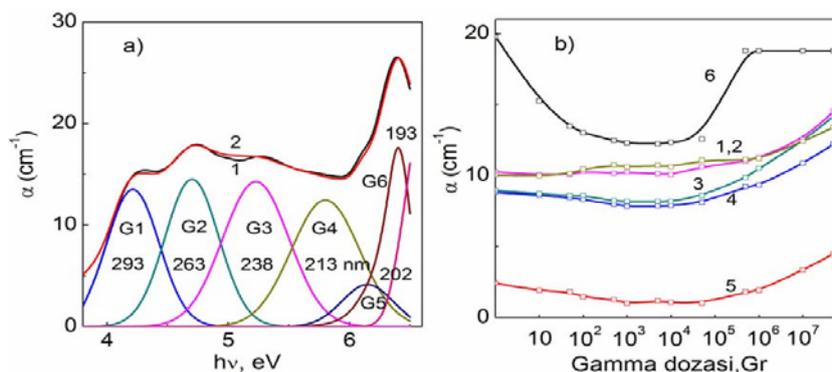
1-rasm. Aktivlashtirilgan LSO:Ce kristalining a) UB va b) ko‘rinadigan sohadagi yutilish spektrlari: dastlabki (1-egri chiziq) va 10^2 (2), 10^4 (3), $5 \cdot 10^5$ (4) va $5 \cdot 10^7$ Gr (5) dozalari bilan nurlantirilgandan keyin va (6) taqqoslash uchun dastlabki YSO kristali

10^2 va 10^4 Gr dozadagi ^{60}Co gamma-nurlanishdan so‘ng OYu (200÷250) nm spektral sohaga nisbatan 195 nm polosaning kuchliroq kamayishi kuzatiladi (1-a rasmga qarang, 2 va 3-egri chiziqlar). $5 \cdot 10^5$ va $5 \cdot 10^7$ Gr dozalardan keyin bu chiziq kattalashadi va to‘yinishga chiqadi (1a-rasmga qarang, 4 va 5-egri chiziqlar). Bundan tashqari, $5 \cdot 10^5$ Gr dozada 240 nm chiziq aniqroq ajralib turadi, $5 \cdot 10^7$ Gr dan keyin esa OYu 240, 260 va 290 nm chiziqlari tezda kattalashadi (1a-rasmga qarang, 4 va 5-egri chiziqlar). Bunda Ce^{3+} ionining ($4f \rightarrow 5d$) o‘tishiga bog‘liq bo‘lgan 360 nm sohasida sezilarli o‘zgarishlar kuzatilmaydi (1-b rasmga qarang, 1-5 egri chiziqlar).

OYu spektrlarini Gaussianlarga ajratishda ularning soni va yutilish sohasi 2-a rasmda aniqlandi, bu esa 70 dan $5 \cdot 10^7$ Gr gacha bo‘lgan intervalda gamma-do‘zadan keyin Gausslarga mos ranglanish markazlarining o‘zgarish kinetikasini aniq tahlil qilish uchun zarur edi. 2a-rasmda maksimumlari 4.22 eV (293 nm), 4.7 eV (263 nm), 5.18 eV (238 nm), 5.8 eV (213 nm), 6.12 eV (202 nm) va 6.4 eV (193 nm) va FWHM (yarim balandlikdagi to‘liq kenglik) mos ravishda 0.51, 0.52, 0.64, 0.65, 0.5 va 0.4 eV bo‘lgan oltita sohasi (G1÷G6) aniqlanadi. Shu asosda ularning to‘planish kinetikasini aniqlash uchun 4.22 eV (293 nm), 4.7 eV (263 nm), 5.18 eV (238 nm), 5.8 eV (213 nm), 6.12 eV (202 nm) va 6.4 eV (193 nm) OYu polosa maksimumlarining dozaviy bog‘lanishlari keltirilgan (2b-rasmga qarang).

Ko‘rinib turibdiki, gamma dozaning 10^4 Gr gacha oshishi bilan OYu 238, 213 va 202 (3-5-egri chiziqlar) ga nisbatan 193 nm (6-egri chiziq) intensivligining kuchli pasayishi kuzatiladi. Bunda 293 va 263 nm sohalarning intensivligi (1,2-egri chiziqlar) $5 \cdot 10^5$ Gr dozaga qadar sezilarli darajada o‘zgarmaydi. Doza yanada 10^4 dan $5 \cdot 10^5$ Gr gacha oshirilganda 193 nm sohasi $5 \cdot 10^6$ Gr dan $5 \cdot 10^7$ Gr gacha oraliqda to‘yinishgacha o‘sadi (6-egri chiziq). Shuningdek, 202, 213 nm va 238 nm polosalar intensivligining $5 \cdot 10^5$ Gy dozadan $5 \cdot 10^7$ Gy gacha o‘shishi kuzatildi. 10^6 Gr dan

yuqori dozalarda 293 va 263 nm sohalar intensivligi ortganligi qayd etildi (1,2-egri chiziqlar).

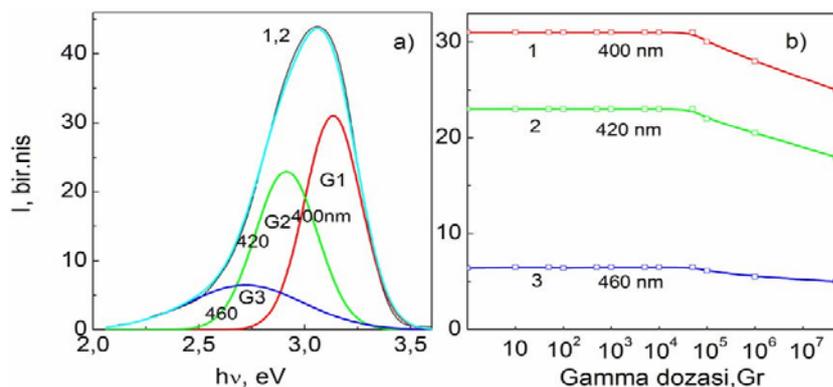


2-rasm. a) LSO:Ce kristalining $5 \cdot 10^7$ Gr dozada nurlantirilgandagi yutilish spektri (1-egri chiziq), uning gaussiyanlari (G1-293, G2-263, 193–G6, G3-238, G4-213, G5-202 nm) va ularning yig‘indisi (2-egri chiziq); b) gaussiyanlarning dozaga bog‘liqligi: 293 nm, 263 nm, 238 nm, 213 nm, 202 nm va 193 nm (mos ravishda 1-6 egri chiziqlar)

Kislorod vakansiyalari $O^{2-}-V_O$ zaryad tashish o‘tishiga kiritilishi mumkin, uning energiyasi F^- (ikkita elektronni qamrab olgan kislorod vakansiyasi) va F^+ (bitta elektronni qamrab olgan kislorod vakansiyasi) markazlarning optik o‘tish energiyalaridan katta bo‘lishi kerak. Shuningdek, Rentgen va neytron-strukturaviy tahlillar (Gustafsson T., at.al., Acta Crystallographica Sec. C Crys. Struct. Communic. 2001. 57 (6), 668), dastlabki LSO:Ce namunalarida kuzatiladigan OYu 193 nm chizig‘i (2a-rasmga qarang) Si bilan bog‘lanmagan $Lu1-V_{O5}$ nuqsonlaridagi O_5 tugunlaridagi kislorod vakansiyalari bilan, 5.8 eV (213 nm) chizig‘i esa $Si-V_{O4}-Lu1$ kompleks nuqsonlarining O_4 tugunlaridagi vakansiyalari bilan bog‘liq bo‘lishi mumkin. 238 nm polosa (1a-rasmga qarang, 4 va 5-egri chiziqlar) F^- markaz bilan bog‘langan va, ehtimol, $Lu1-O_2-Si$ ning eng uzun aloqasi (0.26163 nm) buzilib, V_{O2} zaryadlangan bo‘sh joy - $Lu1-F-Si$ kompleks markazi hosil bo‘lishi mumkin. Ce^{3+} ionlarining 263 va 293 nm yutilish chiziqlari 10^5 Gr dozalar gammasidan keyin mos ravishda Ce^{4+} - va F^+ -ranglanish markazlarining boshqa chiziqlariga qo‘shiladi deb taxmin qilamiz. Bunda F^+ -markazning hosil bo‘lishi $Lu-V_{O1}-Si$ ($Lu-F^+-Si$) yoki $Ce-V_{O1}-Si$ ($Ce-F^+-Si$ OYu 293 nm) markazlaridagi kislorod bo‘shlig‘ida bo‘lishi mumkin. Keyinchalik bu rang markazlari sodda qilib Ce^{3+}/Ce^{4+} (263 nm) va Ce^{3+}/F^+ - markazlar (293 nm) deb belgilanadi.

$Lu1-V_{O5}$ (193 nm), $Si-V_{O4}-Lu1$ (213 nm), $Lu1-F-Si$ (238 nm) kislorod vakansiyalari, Ce^{3+}/Ce^{4+} (263 nm) va Ce^{3+}/F^+ (293 nm) aktivator markazlari bilan bog‘liq bo‘lgan rang markazlarining yutilish intensivligining o‘lchangan dozalari (2b-rasmga qarang) gamma-nurlanish dozasi $5 \cdot 10^4$ Gr bo‘lgunga qadar mavjud o‘shish nuqsonlarining zaryadlanishi sodir bo‘lishini ko‘rsatadi. $Si-V_{O4}-Lu1$ (213 nm), $Lu1-F-Si$ (238 nm) va Ce^{3+}/F^+ (293 nm) markazlar konsentratsiyasining $\geq 10^5$ Gr gamma-dozalarda ortishi ularning qo‘shimcha generatsiyalanishidan dalolat beradi. $5 \cdot 10^6$ Gr dozada nurlantirilgandan keyin sariq rang 422 nm gaussianga bog‘liq.

Ushbu bo'yash markazlari rekombinatsiya jarayonida zaryad tashuvchilarni tutib olishda lyuminessent Ce^{3+} -markazlariga raqobatchi bo'lishi mumkin. Bunday raqobatni hisobga olish, masalan, 2035 yilgacha rejalashtirilgan yuqori energiyali fizika bo'yicha tajribalarda muhimdir, bu yerda yuqori yorqinlikka ega bo'lgan LHC (HL-LHC) kristallari ionlashtiruvchi nurlanishning 100 Mrad (10^6 Gr) dan yuqori yutilgan dozalari uchun optik va lyuminessent xarakteristikalarini saqlab qolishi kerak. Shu munosabat bilan, hosil bo'lgan rang markazlarining LSO:Ce kristalidagi Ce^{3+} aktivator nurlanishiga ta'sirini aniqlash uchun biz 310 K da gamma-lyuminessensiya (GL) spektrlarini qayd etdik (3a-rasmga qarang).



3-rasm. a) LSO:Ce kristallarining ^{60}Co -indutsirlangan lyuminessensiya spektri: a) boshlang'ich (1-egri chiziq), uning Gauss tashkil etuvchilari (G1-400, G2-420, G3-460 nm) va ularning yig'indisi (2-egri chiziq); b) nurlantirilgan namunalar - 400 (1), 420 (2) va 460 nm (3) sohalarning dozaga bog'liqligi

3a-rasmdan ko'rinib turibdiki, γ -kvantlar ta'sirining dastlabki 3 daqiqasida LSO:Ce namunasining GL spektrida 2 eV dan 3.5 eV gacha (620 dan 354 nm gacha) energiya sohasida keng chiziq kuzatiladi (1-egri chiziq). So'ngra ushbu namunadagi GL spektrlari 10^4 Gr dozaga qadar (6÷10) min vaqt oralig'ida qayd etildi. So'ngra GL spektrlari mos ravishda $5 \cdot 10^4$ va 10^5 , 10^6 va $5 \cdot 10^7$ Gr dozalar bilan nurlantirilgan uchta namunada qayd etildi. Lyuminessensiya polosalarining soni va ularning to'liq uzunliklarini hisobga olgan holda, olingan GL spektrlari har bir gamma nurlanish dozasi keyin gaussianalarga ajratilgan. 3a-rasmdagi gaussianni komponentlarga ajratishda Ce1-markazlari (yettita kislorod ionlari bilan koordinatsiyalangan) bilan bog'langan 3.1 eV (399 nm) (gaussianni G1) va 2.95 eV (420 nm) (G2) maksimumlari bilan ma'lum bo'lgan yorug'lik chiziqlari aniq ko'rinadi; 2.7 eV (460 nm) (Gaussian G3) - Ce2-markazlari bilan (oltita kislorod ionlari bilan muvofiqlashtirilgan). Har bir dozadan 70 dan $5 \cdot 10^7$ Gr gacha nurlanishdan keyin olingan GL spektrlari gaussianning tarkibiy qismlariga ajratilgandan so'ng, GL 400, 420 va 460 nm polosalari komponentlarining intensivligini o'zgarish kinetikasi olindi, ular 3b-rasmlarda, 1-3-egri chiziqalarda keltirilgan.

Qizig'i shundaki, nurlanish vaqti $5 \cdot 10^4$ Gr dozasigacha ortishi bilan GL 400, 420 va 460 nm polosalarining intensivligi o'zgarmaydi, doza $\geq 10^5$ Gy dan keyin esa Ce1 va Ce2 nurlanish markazlari konsentratsiyasining pasayishi tufayli ularning kamayishi boshlanadi. Shu bilan birga, $\lambda \leq 330$ nm da OYu intensivligining o'zgarish

kinetikasidan $> 5 \cdot 10^5$ Gr dozadan keyin matritsaviy strukturada va Ce^{3+}/Ce^{4+} (263 nm) va Ce^{3+}/F^+ (293 nm) aktivatorlari atrofida nuqsonlar bilan bog‘liq bo‘lgan rang markazlari konsentratsiyasining oshishi sodir bo‘ladi: $Lu1-V_{O5}$ (193 nm), $Si-V_{O4}$ (213 nm), $Lu1-F-Si$ (238 nm) (2b -rasmga qarang). Demak, gamma ta‘sirida Ce^{3+} ionlari harakatchan kovaklarning valent zonasidan tortib olib chuqur tuzoqlarga aylanadi deb taxmin qilish mumkin:

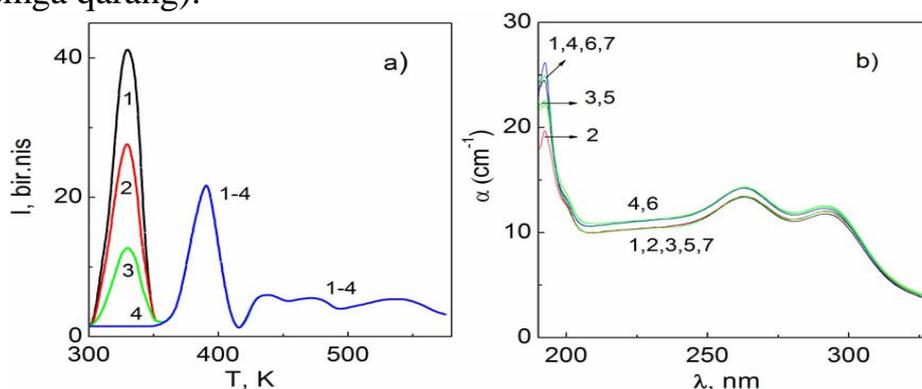


Qo‘zg‘aluvchan elektron o‘tkazuvchanlik zonasidan (Ce^{3+})* ionining 5d uyg‘ongan holatidan, asosiy 4f -holatga o‘tganda Ce1 yoki Ce2-markazlarga mos energiya bilan lyuminessensiya chiqaradi.



Shunday qilib, $\geq 10^5$ Gy dozadan keyin Ce^{3+} (Ce1 va Ce2 markazlar) aktivator nurlanishi GL chiqishining kamayishi (3b-rasmga qarang, 1–3-egri chiziqlar), aftidan, termallashtirilgan elektronlarni qamrab oluvchi $Lu1-F-Si$ (238 nm), Ce^{3+}/F^+ (293 nm) va $Ce^{4+}+V_O$ (430 nm) qo‘shimcha vakansiya markazlari konsentratsiyasining ortishi bilan bog‘liq. Shu munosabat bilan, ushbu gamma-nurlangan ranglanish markazlari va ma‘lum termolyuminessensiya egri chiziqlarining (TYo) cho‘qqilari o‘rtasidagi bog‘liqlikni (300÷600) K harorat oralig‘ida aniqlash qiziqarli edi (Dorenbos P. va boshqalar, Jour. Phys. Condens. Matter. (1994). 6, 4167., Rakov A.F., Salixbayev U.S., Islamov A.X. va boshqalar, Jour. Lumin. (2010). 130, 2004).

4-a rasmda 310 K haroratda bir xil $2 \cdot 10^2$ Gr dozada nurlantirilgan LSO:Ce ning (300÷600) K harorat oralig‘ida, 3 daqiqa hamda 1, 3 va 10 soatdan so‘ng qayd etilgan integral egri chiziqlari ko‘rsatilgan (1-4 egri chiziqlar). Yuqorida ko‘rsatilgan saqlash vaqtlaridan oldin va keyin o‘lchangan OYu spektrlari 4b-rasmda, 1-4 egri chiziqlarda tasvirlangan. TYo egri chiziqlari odatda beshta cho‘qqigga ega: 335, 390, 440, 475 va 540 K (4 a-rasmga qarang).



4-rasm. a) LSO:Ce kristalining $2 \cdot 10^2$ Gr dozada nurlantirilgandan keyin 3 min (1) 1 (2), 3 (3) va 10 soat (4) dan keyin o‘lchangan termik nurlanishi egri chiziqlari; b) UB-sohada yutilish spektrlari: $2 \cdot 10^2$ Gr dozada nurlantirilgandan keyin dastlabki (1-egri chiziq) va 1 soat (3) va 10 soat (4) dan keyin o‘lchangan

Ularni OYu spektrlari bilan taqqoslashdan (4b-rasmga qarang) quyidagilar aniqlandi: i) nurlantirilgandan keyin (3 min) ushlab turilgandan so'ng o'lchangan TYoning eng intensiv 335 K pikining amplitudasi (1-egri chiziq), 300 K da ushlab turish vaqtining oshishi bilan 1 soat (2-egri chiziq) va 3 soat (3-egri chiziq) sezilarli darajada kamayadi, 10 soatdan keyin esa bu TYo piki deyarli kuzatilmaydi (4a-rasmga qarang, 4-egri chiziq). Ushbu pikdan farqli o'laroq, yuqori haroratli TYo 390, 440, 475 va 540 K piklari ushlab turish vaqtiga bog'liq emas (4a-rasmga qarang, 1-4-egri chiziqlar), ya'ni bu tuzoqlar 300 K da barqaror; ii) OYu spektrida $2 \cdot 10^2$ Gr dozadan keyin 193 nm chiziq koeffitsiyenti dastlabki na'muna (1-egri chiziq) (4b-rasmga qarang) ga nisbatan sezilarli darajada kamayadi (2-egri chiziq). 300 K da 3 soat ushlab turilgandan so'ng (3-egri chiziq) uning ortishi sodir bo'ladi, 10 soat ushlab turilganda esa uning yutilish koeffitsiyenti dastlabki nurlanmagan namuna darajasiga yetadi (4-egri chiziq) (4b-rasmga qarang), chunki tegishli tuzoq 335 K da bo'shaydi. Bunda zaryadlangan nuqson elektronlarning ozod bo'lish vaqt va keyinchalik Ce^{4+} teshikli markaz bilan rekombinatsiya bo'lishi bilan zaryadlanmagan holatga o'tadi, ya'ni yorug'likdan keyingi sekin jarayonda (fosforessensiya).

Bu jarayon markaziy Ce^{3+} yoki Lu^{3+} ionlari yaqinida joylashgan elektron tutqichi V_{O5} ning zaryadlanmagan holatidagi neytral $Lu1-V_{O5}$ -markazlari konsentratsiyasining ortishiga olib keladi. Shuning uchun, bu ($5 \cdot 10^5 - 5 \cdot 10^7$)Gr doza oralig'ida neytral $Lu1-V_{O5}$ -markazlari konsentratsiyasining (193 nm OYu polosasi) oshishini tushuntiradi (2b-rasmga qarang, 6-egri chiziq), chunki OYu spektrlarining o'lchovlari har bir nurlanishdan bir hafta o'tgach o'tkazilgan. Bu, shuningdek, neytral $Lu1-V_{O5}$ -markazlarining tiklanishi bilan bog'liq bo'lib qoldiq nurlanish paydo bo'lish mexanizmini ham tushuntiradi.

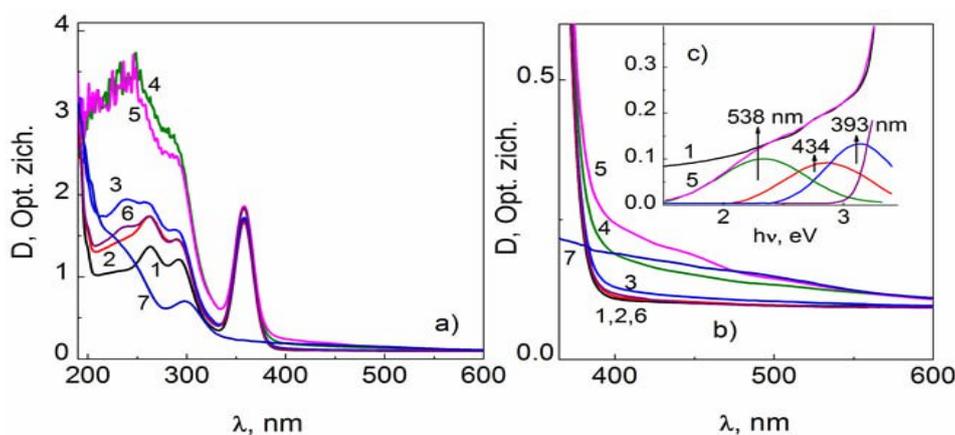
Yadrolarga ta'sir qiluvchi gamma-nurlanishdan farqli o'laroq, tez neytronlar va protonlar Lu_2SiO_5 kristallidagi elastik to'qnashuvlar natijasida kislorod atomlarini kislorod panjarasining anion tugunlaridan asosan urib chiqaradi, bu esa Frenkel nuqson juftlarining (tuzilishning xususiy nuqsonlari) shakllanishiga olib keladi. Bu nuqsonlar elektronlarni tutib olgandan so'ng F -markaz va F^+ -markaz tipidagi rang markazlariga aylanadi. Og'irroq Lu yadrolari kamroq siljiydi. Neytronlar va gamma-nurlanishning optik shaffoflik va aktivator nurlanishiga ta'sirini o'rganish yuqori energiyali eksperimental fizika uchun muhim ahamiyatga ega.

Dissertatsiyaning **“ $Lu_2SiO_5:Ce$ ssintillyatsion monokristallarida neytronlar bilan hosil qilingan ranglanish va lyuminessensiya markazlari va ularning aktivator lyuminessensiyaga ta'siri”** deb nomlangan IV bobida tez neytronlar bilan nurlan-tirishning $LSO:Ce$ optik xarakteristikalariga ta'sirini o'rganish natijalari keltirilgan.

OYu spektrlarida $LSO:Ce$ ga 10^{15} cm^{-2} tez neytronlar flyuyensi minimal ta'sir etgandan so'ng (210÷310) nm da UB yutilish intensivligi ortadi. Neytronlar flyuensi 10^{17} cm^{-2} gacha ortganda bu yutilish intensivligi tezroq ortadi (5a-rasmga qarang, 3, 4, 5-egri chiziqlar). Bunda γ - dozasi $5 \cdot 10^7$ Gr bo'lgan (^{60}Co) bilan nurlantirilgandan so'ng yutilish intensivligi darajasi taxminan 10^{15} cm^{-2} neytron flyuyensi bilan mos keladi (5a-rasmga qarang, 2, 6-egri chiziqlar). Shuni ta'kidlash kerakki, YSO va LSO monokristallari ikkita ekvivalent bo'lmagan metall tugunlari bilan bir xil C2/c

monoklin tuzilishga ega. Nominl sof YSO kristalining OYu spektrlarida 10^{17} cm^{-2} flyuyensli neytronlar bilan nurlantirilgandan so'ng UB sohada maksimumi 300 nm bo'lgan polosalar va (210÷275) nm va (320÷600) nm oralig'idagi keng polosalar aniqroq kuzatiladi (5a,b-rasmga qarang, 7-egri chiziq).

OYu spektrining ko'rinadigan sohasida $\geq 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ flyuyenslardan so'ng ham LSO:Ce, ham nominal sof YSO kristallarida 380 dan 600 nm gacha bo'lgan strukturasisiz keng yutilish intensivligining oshishi kuzatiladi (5b-rasmga qarang, 3, 4, 5, 7-egri chiziqlar), ulardan (10^{17} cm^{-2}) 5-egri chiziq gaussiana komponentlariga ajratildi va 5b-rasmning (c) qo'shimchasida ko'rsatilgan. 393 (egri chiziq 2), 434 nm (3) va 538 nm (4) dagi maksimumlarga ega uchta soha ajratiladi. Bu shuningdek, LSO:Ce kristallarida 420 nm da sintillyatsion lyuminessensiyani qamrab oluvchi $>375 \text{ nm}$ sohada yutilish intensivligining o'zgarishini aniqlash uchun



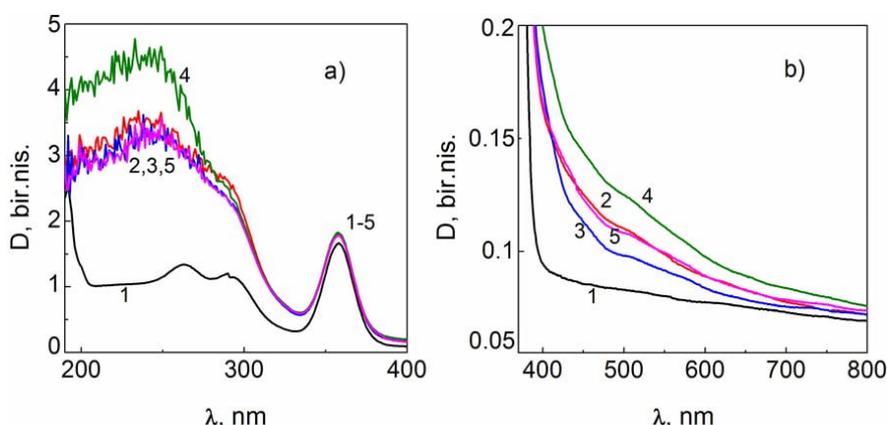
5-rasm. LSO:Ce yutilish spektrlari: a) UB va b) ko'rinadigan soha: boshlang'ich (1-egri chiziq) va neytronlar flyuyenslari bilan 10^{15} (2), 10^{16} (3), $5 \cdot 10^{16}$ (4) va 10^{17} cm^{-2} (5); $5 \cdot 10^7 \text{ Gr}$ (6) dozada gamma nurlantirishdan keyin va 10^{17} cm^{-2} (7) flyuyens bilan nurlantirilgan nominal toza YSO kristali. c) neytronlar flyuyensidan keyin 10^{17} cm^{-2} LSO:Ce (1), uning gaussianalari (393, 434 va 538 nm) va ularning yig'indisi (5)

10^{15} dan 10^{17} cm^{-2} gacha bo'lgan oraliqdagi boshqa flyuyenslardan keyin ham amalga oshirildi (5b-rasmga qarang, 3,4,5-egri chiziqlar). Bu natijalar 238 nm chiziq F markaz bilan, 261 nm chiziq $\text{Ce}^{3+}/\text{Ce}^{4+}$ bilan bog'langan, 291 nm chiziq esa Ce^{3+} ionining ($4f \rightarrow 5d$) o'tishlari bilan bog'langan OYu chiziq yuqorida (Ce^{3+}/F^+) deb belgilangan F^+ -markaz chizig'iga qo'shiladi, degan taxminlarimizni tasdiqlaydi.

LSO:Ce da ko'p sonli nuqsonlar $5 \cdot 10^7 \text{ Gr}$ dozada γ -kvantlarning o'zaro ta'siriga nisbatan (5a-rasmga qarang, 3,4,5-egri chiziqlar) $\geq 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ flyuyensli neytron oldi nurlanishida hosil bo'ladi (5a-rasmga qarang, 6-egri chiziq). Neytronlar bilan nurlantirilganda hosil bo'ladigan yuqori konsentratsiyali F va F^+ -markazlar panjarada diffuziya jarayonida agregatlar hosil qilishi mumkin, ya'ni $F+F^+ \rightarrow F_2^+$. Bundan tashqari, LSO:Ce kristalidagi Ce^{3+} dan Ce^{4+} ionlariga oksidlanishiga kislorod vakansiyalari va oraliq kislorod atomlari kabi muhim miqdordagi struktura omillari hissa qo'shishi mumkin. Keyinchalik xarakterli chiziqlari OYu 434 ($\text{Ce}^{4+}+V_O$) va 538 nm (F_2^+ agregatlari) bo'lgan rang markazlari ko'rib chiqildi. Ushbu kiritilgan

nuqsonlar ^{60}Co gamma-kvantlari bilan qo'zg'atilganda rekombinatsiya jarayonida elektronlarni ushlab olishda Ce^{4+} ionlari bilan raqobatlashadi. Shu munosabat bilan 10^{15} , 10^{16} , $5 \cdot 10^{16}$ va 10^{17} cm^{-2} flyuyensli neytronlar bilan oldindan nurlantirilgan kristallarning, shuningdek, faqat $5 \cdot 10^7$ Gr gamma dozadan keyin nurlantirilgan kristallarning GL spektrlari qayd etildi.

Natijalar shuni ko'rsatdiki, 10^{15} cm^{-2} flyuyens va $5 \cdot 10^7$ Gr gamma-doza bilan nurlantirilgan neytronlarni solishtirganda, 400 nm Ce1-markazning GL polosasi intensivligi mos ravishda taxminan (13÷20)% ga kamaydi. Neytronlar flyuyensining $\geq 10^{16} \text{ sm}^{-2}$ keyingi o'sishida ularning kamayishi ancha katta bo'ldi, masalan, 10^{17} sm^{-2} flyuyensda 70% gacha. Shu bilan birga, UB va spektrning ko'rinadigan sohasida OYu koeffitsiyentlarining o'zgarishi nuqsonlar bilan bog'liq bo'lgan ranglanish markazlari konsentratsiyasining oshishini ko'rsatadi: 238 nm - F -markaz, 261 nm $\text{Ce}^{3+}/\text{Ce}^{4+}$ va 291 nm Ce^{3+}/F^+ , shuningdek 430 nm $\text{Ce}^{4+}+V_{\text{O}}$ va 538 nm - F_2^+ (4.1a,b-rasmga qarang). Shunday qilib, $\geq 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ flyuensdan keyin Ce^{3+} aktivatorning GL chiqishi sezilarli darajada pasayishi quyidagicha izohlanadi: $\geq 10^{16} \text{ sm}^{-2}$ flyuensning oshishi bilan F (238 nm) va Ce^{3+}/F^+ (291 nm) raqobatlashuvchi qo'shimcha vakansiya markazlari konsentratsiyasining oshishi (5a-rasmga qarang, 2–6-egri chiziqlar), ular termolizlangan elektronlarni qamrab oladi, Ce^{3+} ionlarining bir qismi LSO:Ce dagi Ce^{4+} holatiga o'tadi; Shuningdek, Ce^{3+} nurlanishining 393 nm va 430 nm yutilish sohasidagi ranglanish markazlari tomonidan qisman reabsorbsiya jarayoni ham istisno etilmaydi, bu 10^{16} cm^{-2} flyuyensda kuzatiladi va 10^{17} cm^{-2} neytron flyuyensgacha o'sadi (5b-rasmga qarang, 3-5 egri chiziqlarga qarang).

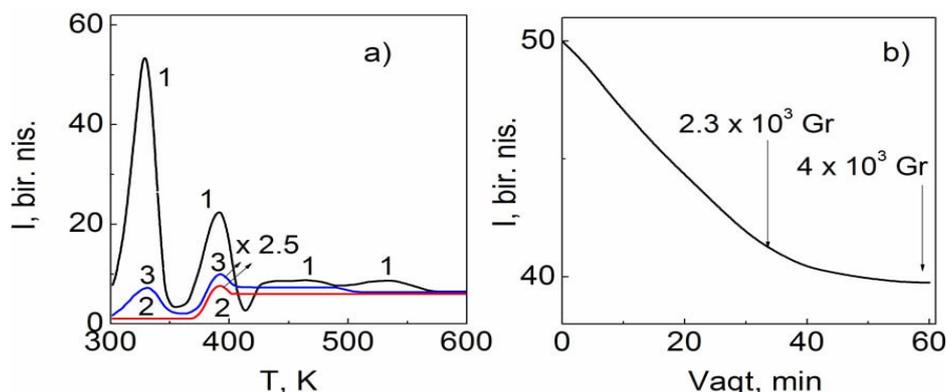


6-rasm. LSO:Ce namunasining yutilish spektrlari: a) ultrabinafsha va b) ko'rinadigan sohada: dastlabki holat (1), $5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ neytron oqimi ta'siridan keyin (2), TYo o'lchovi paytida 605 K gacha qizdirilgandan so'ng (3), $4 \cdot 10^3$ Gr dozadagi gamma nurlanishdan so'ng (4) va yana KTVni takroran o'lchashda 605 K gacha qizdirilgandan so'ng (5)

Shu munosabat bilan neytron ta'sirida hosil qilingan ranglanish markazlari, TYo (300÷600) K integral cho'qqilari va aktivator lyuminessensiyasi o'rtasidagi bog'liqlikni aniqlash kerak. GL chiqishi maksimal kamaygan $5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ neytronlarning flyuyensi bilan nurlantirilgan namunaning LSO:Ce OYu spektrlari ketma-ket o'lchandi, so'ngra 605 K gacha qizdirilgandan so'ng (tutqichlardan zaryad

tashuvchilarni bo'shatish). 7a,b-rasmda dastlabki LSO:Ce namunasining UB (a) va ko'rinadigan soha (b) OYu spektrlari (1-egri chiziq), $5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ neytronlar flyuyensi bilan nurlantirilgandan so'ng (2-egri chiziq), 600 K gacha qizdirilgandan so'ng (TYoni olib tashlash va tuzoqlarni bo'shatish uchun) (3-egri chiziq), qo'shimcha $4 \cdot 10^3 \text{ Gr}$ dozali kichik gamma nurlantirilgandan so'ng (4-egri chiziq) tuzoqlarni to'ldirish uchun, shuningdek, 605 K gacha qizdirilgandan so'ng (bo'shatish) TYoni o'lchashda (5-egri chiziq) keltirilgan.

$5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ neytronlar flyuyensi bilan nurlantirilgan LSO:Ce namunasining 605 K gacha qizdirilgandan so'ng uning OYu spektrida (7b-rasmga qarang, 3-egri chiziq) 390 dan 600 nm gacha bo'lgan spektral sohada joylashgan 393, 430 va 538 nm OYu polosalarining intensivligi kamayishi kuzatildi (5b-rasmga qarang). Shu bilan birga, $5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ neytronlar oqimi bilan nurlantirilgan LSO:Ce integral TYo egri chizig'ida 390, 440, 475 va 540 K TYo cho'qqilari kuzatiladi (7a-rasmga qarang, 2-egri chiziq). Namunani keyinchalik $4 \cdot 10^3 \text{ Gr}$ dozada γ -kvantlar bilan nurlantirilganda qizdirishdan oldingi (2-egri chiziq) va keyingi (3-egri chiziq) spektrlarga nisbatan 238 nm (6a-rasmga qarang, 4-egri chiziq), shuningdek 430 va 538 nm (6b-rasmga qarang, 4-egri chiziq) sohalarda OYu polosalari intensivligining kuchli ortishi kuzatiladi.



7-rasm. Ikkita LSO:Ce kristalining TV egri chizig'i (a): 1-chi kristall faqat 10^3 Gr dozada gamma-nurlanishdan so'ng (1), 2-chi kristall $5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ flyuyens bilan nurlantirilgandan so'ng (2) va keyin shu 2-chi kristall $4 \cdot 10^3 \text{ Gy}$ dozada gamma-nurlanishdan so'ng (3). b) 2-chi kristall KTV o'lchashda 605 K gacha qizdirilgandan so'ng, 310 K haroratda 410 nm Ce1-markazning maksimal chizig'ida GL ning doza bog'liqligi ko'rsatilgan

Shuni ta'kidlash kerakki, 300 dan 600 K gacha bo'lgan harorat oralig'ida TYo cho'qqilarining intensivligi neytronlar bilan nurlantirilgandan keyin $2.3 \cdot 10^3 \text{ Gr}$ dozada faqat γ -nurlantirishdan keyingi intensivlikka (1-egri chiziq) nisbatan sezilarli darajada kamayadi (7a-rasmga qarang, 2-egri chiziq). $5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ neytronlar flyuyensi bilan nurlantirilgan LSO:Ce namunasida TYo piklari intensivligining bunday pasayishi, aftidan, nafaqat UB sohada neytronlar bilan induksiyalangan rang markazi hosil bo'lishi bilan bog'liq, balki OYu spektrining ko'rinadigan sohasida yutilishga ham bog'liq (5b-rasm, 3-5 egri chiziq'larga qarang). LSO:Ce namunasida 605 K

gacha qizdirilgandan so'ng (TYo egri chiziqlari olinganda) 393, 430 va 538 nm OYu chiziqlari intensivligining korrelyatsiyalangan kamayishi (6b-rasmga qarang, 3-egri chiziq), shuningdek, TYo piklari intensivligining pasayishi (7a-rasmga qarang, 2-egri chiziq) kristall panjaradan issiqlik energiyasini tutqichlardan (rang markazlaridan) o'tkazuvchanlik zonasiga chiqarilgan elektronlarga uzatishda ular migratsiya qiladi va (3) reaksiya bo'yicha Ce^{4+} -markazlaridagi teshiklar bilan nurlanishli rekombinatsiyalanadi:



Shu bilan birga, zaryad lokalizatsiyasi mumkin bo'lgan $5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ neytronlar flyuensi tomonidan hosil qilingan nuqsonlarning o'zi qolishi mumkin, bu $2.3 \cdot 10^3 \text{ Gr}$ gamma dozasi bilan tashuvchilarning keyingi generatsiyasi bilan tasdiqlanadi, ular ushbu induksiyalangan nuqsonlar tomonidan tutib olinadi. Bu 238 nm (F -markaz), 430 ($Ce^{4+} + V_O$ -markaz) va 538 nm (F_2^+) OYu polosalarining o'sishiga olib keladi (6a,b-rasmga qarang, 4-egri chiziq). Bunda teshiklarning bir qismi (4) jarayonga muvofiq:



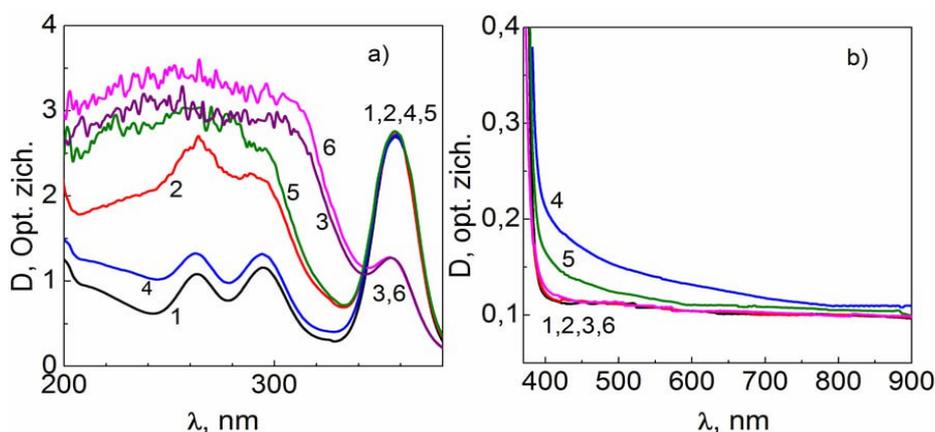
Ce^{3+} da ushlanib qoladi va kavakli Ce^{4+} - markaz hosil bo'ladi. Keyinchalik 600 K gacha qizdirish reaktorda nurlantirilgan namuna uchun xos bo'lgan darajagacha rang markazlari konsentratsiyasining pasayishiga olib keladi (2-egri chiziq): F - 238 sohada OYu polosasi bilan bog'langan markaz (6a-rasmga qarang, 5-egri chiziq); $Ce^{4+} + V_O$ - markaz 430 nm va F_2^+ -markaz 538 nm (6b-rasm, 5-egri chiziq). Bunday jarayonlarning sodir bo'lishi haqida $5 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-2}$ neytronlar flyuyensi bilan nurlantirilgan va 600 K gacha qizdirilgan namuna uchun 310 K da 410 nm da $4 \cdot 10^3 \text{ Gr}$ (60 min) dozagacha bo'lgan oraliqda Ce^{3+} polosasida GL ning dozaga bog'liqligi natijalari ham dalolat berishi mumkin (7b-rasmga qarang). Ce^{3+} da kovaklar va elektronlarni tuzoqlarga qamrab olish hisobiga GL 410 nm polosasi intensivligining γ -doza $2.3 \cdot 10^3 \text{ Gr}$ gacha $\sim 18\%$ ga tez chizikli kamayishi, keyinchalik GL ning $4 \cdot 10^3 \text{ Gr}$ dozagacha to'yinishi kuzatiladi, bu generatsiyalanadigan elektron-kovak juftlari soni va Ce^{3+} da nurlanish rekombinatsiyasi aktlari o'rtasidagi muvozanatning o'rnatilishi bilan bog'liq. Shu bilan birga, 238 nm (F -markaz), 430 nm ($Ce^{4+} + V_O$ - markaz) va 538 nm (V_{LuorSi} yoki F_2^+ -markaz) OYu polosalarining intensivligi ortadi (6a,b-rasmga qarang, 4-egri chiziq).

Yuqorida ta'kidlab o'tilganidek, LSO Ce kristall panjarasiga o'rinbosar sifatida Ca^{2+} ionlarining ma'lum konsentratsiyasini qo'shish sintillyatsiya vaqtini kamaytirishga, LSO Ce;Ca da yorug'lik chiqishini oshirishga va energiya ajrata olish qobiliyatini oshirishga olib keldi. Biroq, materialning radiatsion-optik barqarorligi mezonini qondirish, ya'ni singuvchi radiatsiya ta'sirida optik xususiyatlarni saqlab qolish masalasi hal qilinmagan.

Dissertatsiyaning **“ $Lu_2SiO_5:Ce$ kristallarida Ca ionini qo'shimcha legirlashning gamma-indutsirlangan ranglanish markazlari va aktivator luminesanssiyaga ta'siri”** deb nomlangan beshinchi bobida turli konsentratsiyali

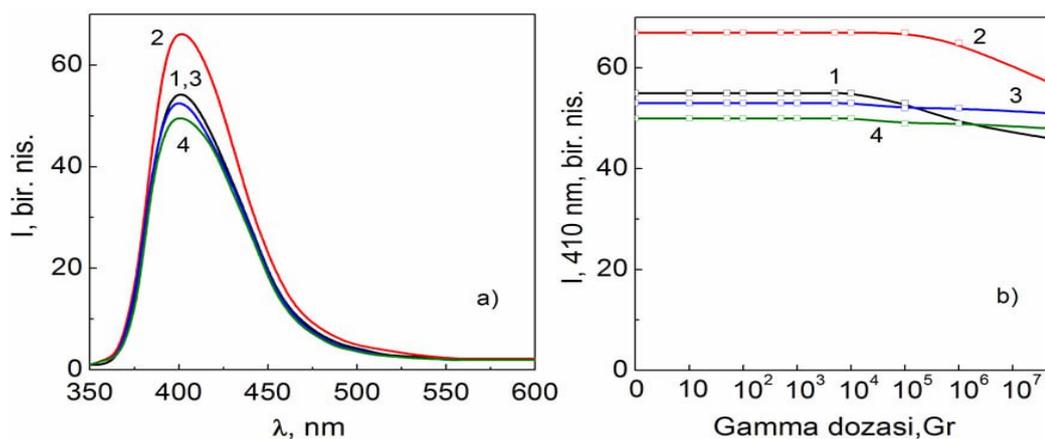
Ca ionlari bilan qo‘shimcha legirlangan LSO:Ce monokristallarining optik xususiyatlariga ^{60}Co gamma kvantlarining ta‘hiri natijalari keltirilgan.

8a,b-rasmlarda dastlabki LSO: (0.1at% Ce) ning kalsiysiz (1-egri chiziq), 0.1at% Ca^{2+} (2-egri chiziq) va 0.4at% Ca^{2+} (3-egri chiziq) bilan legirlangan LSO: (0.1at% Ce) namunalarining, shuningdek, dastlabki LSO:(0.1at% Ce) (4-egri chiziq) ning yuqori γ -doza bilan $5 \cdot 10^7$ Gr gacha nurlantirilgan va 0.1at% Ca^{2+} (5-egri chiziq) va 0.4at% Ca^{2+} (6-egri chiziq) bilan legirlangan LSO γ -doza bilan nurlantirilgandan so‘ng F (238 nm), $\text{Ce}^{3+}/\text{Ce}^{4+}$ (260 nm) va Ce^{3+}/F^+ (295 nm) tipidagi ranglanish markazlari bilan bog‘liq nuqsonlar generatsiyasi natijasida $\text{UB} \leq 320$ nm intensivligining oshishi kuzatiladi (8a-rasmga qarang, 4,5,6-egri chiziqlar). LSO:(0.1at%Ce) (4-egri chiziq) va LSO:Ce,Ca (0.1at%) (5-egri chiziq) namunalardan farqli o‘laroq, 0.4at%Ca konsentratsiyali (6-egri chiziq) namunalarda gamma-nurlanish OYu spektrining ko‘rinadigan sohasida o‘zgarishlarga olib kelmadi (8b-rasm), ya‘ni ular ranglanmadi. Bu shuni ko‘rsatadiki, 0.4at%Ca bilan legirlash nafaqat LSO:Ce (Wu Y., Koschan M., yet.al., Jour. of Cryst. Growth. 2018. 362), shuningdek, ultrabinafsha nurlar (300÷400) nm va spektrning ko‘rinadigan sohasini $5 \cdot 10^7$ Gy yuqori γ - dozasigacha barqarorlashtirishga olib keladi (8b-rasmga qarang, 6-egri chiziq).



8-rasm. Yutilish spektrlari: (a) UB-da va (b) spektrning ko‘rinadigan sohasida: nurlantirilmagan LSO: (0.1at%Ce) (1-egri chiziq), 0.1at% Ca^{2+} (2) va 0.4at% Ca^{2+} (3), $5 \cdot 10^7$ Gr dozada γ -nurlan-tirishdan so‘ng LSO: (0.1at%Ce) (4), 0.1at% Ca^{2+} (5) va 0.4at% Ca^{2+} (6)

So‘ngra Ca^{2+} qo‘shimchasining Ce^{3+} aktivator nurlanishiga ta‘sirini aniqlash uchun Ca^{2+} 0%, 0.1, 0.3 va 0.4 at % konsentratsiyali namunalarda 310 K haroratda GL spektrlari o‘lchandi. 9a-rasmdan ko‘rinib turibdiki, Ca^{2+} ionining miqdoridan qat‘iy nazar, namunalarning GL spektrida 350 dan 550 nm gacha bo‘lgan sohada Ce^{3+} ning keng polosasi mavjud (1-4 egri chiziqlar). LSO:Ce (1-egri chiziq) dan farqli o‘laroq, 0.1at%Ca li namunada (2-egri chiziq) Ce1- markazlarining $5d \rightarrow 4f$ ionlari o‘tishi bilan bog‘liq bo‘lgan 410 nm maksimumda 1 sohasi intensivligining oshishi kuzatiladi (9a-rasmga qarang).



9-rasm (a,b). a) LSO:(0.1at%Ce) (1) va 0.1at%Ca (2), 0.3at%Ca (3) hamda 0.4at%Ca (4) bilan legirlangan kristallarda 310 K haroratda gamma-lyuminessensiya spektrlari va b) 410 nm GL polosasining dozaga bog‘liqligi

Keyinchalik Ca^{2+} konsentratsiyasining 0.3 at% (3-egri chiziq) va 0.4 at% (4-egri chiziq) ortishi bilan GL intensivligi taxminan legirlanmagan Ca ning LSO:Ce darajasigacha kamayadi. Ce2-markazlari (olti kislorod ioni bilan muvofiqlashtirilgan) bilan bog‘langan 475 nm yorug‘lik sohasining xatti-harakati uning juda kuchsiz intensivligi tufayli o‘rganilmagan (Ce^{3+} ning asosiy hissasi Ce1 pozitsiyasida 95% atrofida).

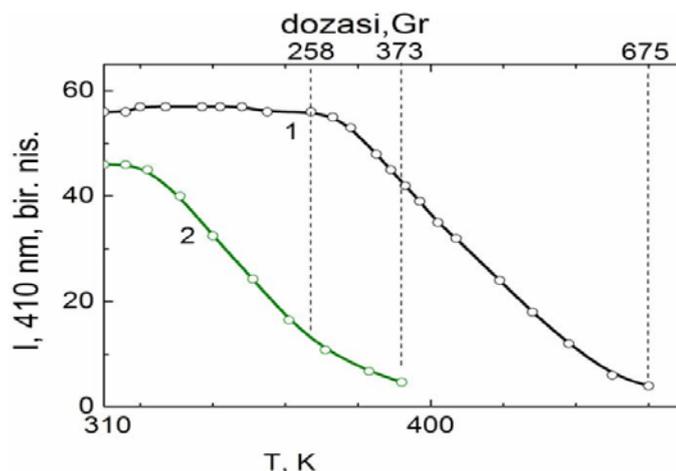
Rekombinatsiya jarayonida Ce1-markazlari bilan bog‘liq bo‘lgan GL 410 nm chizig‘i intensivligining ortishi, dastlabki LSO:Ce (1-egri chiziq) bilan solishtirganda, 0.1 at% Ca^{2+} li namunada (2-egri chiziq) elektronlarning Ce1- lyuminessensiya markazlariga samaraliroq migratsiyasi bilan bog‘liq. Biroq, konsentratsiya 0.4 at% Ca^{2+} gacha oshganda Ce1 ning barqaror Ce^{4+} ga o‘tish ehtimoli ortadi, bu esa GL Ce1 ning kamayishiga va sintillyator tezkorligining 40 dan 31 ns gacha oshishiga olib keladi (Yang K., et.al, IEEE Transactions on Nuclear Science. 2009. 56 (5). -S.2960).

Keyinchalik, aktivator lyuminessensiyasining o‘zgarish kinetikasini aniqlash uchun ushbu Ca kiritilgan namunalarning GL spektrlari 310 K da gamma ta’sirida qayd etildi. Ko‘rinib turibdiki, nurlanish vaqtining ortishi bilan Ca^{2+} siz namunadagi GL 410 nm sohasining intensivligi $\sim 10^4$ Gr dozasigacha o‘zgarmaydi, 10^5 Gy dan yuqori bo‘lganda esa kamayishi boshlanadi. Bu ehtimol, 0.3 va 0.4 at.% Ca ning yuqori konsentratsiyalarida mavjud bo‘lmagan (400÷500) nm keng yutilish sohasiga ega bo‘lgan ranglanish markazlari tomonidan yorug‘lik reabsorbsiyasi jarayoni bilan bog‘liq bo‘lishi mumkin (8 b -rasmga qarang, 6-egri chiziqqa qarang). 0.3at.% Ca^{2+} (3-egri chiziq) va 0.4at.% Ca^{2+} (4-egri chiziq) konsentratsiyalarda GL 410 nm polosa intensivligi va spektrning ko‘rinadigan sohasida optik shaffoflik hatto $5 \cdot 10^7$ Gr yuqori dozada ham deyarli o‘zgarmaydi.

Gamma-nurlanishdan so‘ng keng doza intervalida Ca ioni konsentratsiyasining > 0.1 at.% ortishi bilan binafsha rangning kuchayishi kuzatiladi, u beqaror va ~ 1 soat davomida 305 K da rangsizlanadi. Keyinchalik, turli xil nurlanish haroratlarida rekombinatsiya jarayonida aktivator lyuminessensiya chiqishiga ushbu gamma-stimullashtirilgan ranglanishning ta’siri o‘rganildi.

10-rasmda kalsiysiz (1 egri chiziq) va Ca (0.4 at.%) bo'lgan kristallarda GL 410 nm soha intensivligining haroratga bog'liqligi keltirilgan (2-egri chiziq). Shuni ta'kidlash kerakki, 305 K da ushlab turish vaqtining oshishi bilan 425 nm yutilish sohasi intensivligining pasayishini kuzatamiz: 2 soat, 4 soat va 24 soat va 50 soatdan keyin spektr dastlabki holatiga qaytadi.

Ca^{2+} ionini (ion radiusi 1.00 \AA) o'zidan kichikroq Lu^{3+} ionini (0.85 \AA) o'rnini egallaydi va Ca^{2+} ning zaryad muvozanatini saqlash uchun kislorod vakansiyasini (V_{O}) yuzaga keltiradi. Bunda, zaryad muvozanatini saqlash mexanizmi eng ko'p ehtimol bilan lyutetsiy tugunlaridagi musbat zaryadlangan V_{O} va manfiy zaryadlangan Ca_{Lu} o'rinbosar ionlari o'rtasida vujudga keladi. Taxmin qilish mumkinki, $\text{Ca} > 0.1 \text{ at\%}$ konsentratsiyali LSO:Ce,Ca kristallarini o'stirishning texnologik jarayonida $\{\text{Ca}_{\text{Lu}} + V_{\text{O}} + \text{--- Ce}^{4+}\}$ kompleks nuqsonlar sonining ortishi V_{O} da elektronlarni ushlab qolish samaradorligining pasayishiga olib keladi (bo'shliq Ce^{4+} ioniga unchalik yaqin emas). Demak, bu kompleks o'sish nuqsoni Ce^{4+} ionlari bilan bog'liq bo'lgan (200÷300) nm sohadagi yutilishning oshishiga (8,a-rasmga qarang, 2-5 egri chiziqlarga qarang), yorug'lik chiqishining ko'payishiga va nurlanishdan keyingi nurlanishning 8 marta kamayishiga sabab bo'ladi.



10-rasm. LSO:Ce (0.1at%) Ca siz (1) va 0.4at.% Ca^{2+} (2) kristallarida GL 410 nm soha intensivligining haroratga bog'liqligi

Shuningdek, u yuqori haroratlarda gamma-nurlanishdan keyin kuzatiladigan quyidagi hodisalarga ham sabab bo'ladi: 310 K da 10^2 Gr dozadan keyin binafsha rang hosil bo'lishi; 10-rasmning 2-egri chizig'ida ko'rsatilganidek, Ce1 markazining GL sohasi so'nish haroratining 360 K dan (Ca bo'lmaganda) 325 K gacha (0,4 at.% Ca bilan) pasayishi; 373 K da 425 nm OYu polosasining paydo bo'lishi; sariq rang hosil bo'lishi va 305 K da 50 soatdan keyin yo'qolishi. 310 K da takroriy gamma-nurlanish ham 410 nm GL polosasining yuqori intensivligini, ham binafsha rangni tiklaydi.

XULOSA

Fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) ilmiy darajasini olish uchun "Qo'shimcha Ca kirishmasi kiritilgan va radiatsiya bilan hosil qilingan

ranglanish markazlari bo'lgan lyutetsiy ortasilikati ssintillyatoridagi seriyning rekombinatsiyaviy lyuminessensiyasi" mavzusidagi dissertatsiya bo'yicha olib borilgan tadqiqotlar asosida quyidagi xulosalar taqdim etildi:

1. Gamma nurlarining past dozalarida $\leq 5 \cdot 10^4$ Gr kristallarni nurlantirgandan so'ng, neytral Lu1-V_{O5} markazlarining 193 nm OYu sohasi intensivligining pasayishi elektron qamralishi bilan bog'liq va 300 K da noturg'un. Uning kelib chiqishi texnologik jarayon, ya'ni o'sish nuqsonlari bilan bog'liq.

2. LSO:Ce kristallarini 200 Gr gamma nurlari bilan nurlantirilgandan so'ng, 335K TL intensiv cho'qqisining paydo bo'lishi va 193 nm OYu sohasi intensivligining pasayishi, 10 soatgacha xona haroratida saqlagandan so'ng, 335 K TL cho'qqisining yo'qolishi, elektronlarning asta-sekin chiqishi va Ce⁴⁺ markazi bilan rekombinatsiyasi tufayli 193 nm OYu sohasi intensivligining tiklanishi ehtimol, LSO:Ce ssintillyatorida qoldiq lyuminessensiya paydo bo'lish mexanizmini tushuntiradi.

3. 310 K da gamma nurlari bilan nurlantirishning $70 \div 5 \cdot 10^4$ Gr oralig'ida 399 va 420 nm (Ce1 markazlari) va 450 nm (Ce2 markazlari) GL intensivligi o'zgarmasligi va $5 \cdot 10^4$ Gr dan yuqori dozalarda, ularning intensivligining pasayishi aniqlandi. Bunga sabab elektron va kavak markazlarining LSO:Ce kristal strukturasi Si-V_{O4} (OYu 213 nm), Lu1-F-Si (238 nm), Ce1-F⁺-Si (295 nm) Ce⁴⁺ (263 nm) xususiy nuqsonlarning paydo bo'lishi: $> 5 \cdot 10^4$ Gr nurlanish dozalaridan so'ng kuzatilgan sariq rang 422 nm (Ce⁴⁺+V_O) da yutilish sohasidagi rang markaziga Ce³⁺ lyuminessensiya beruvchi sohada (399 va 420 nm da GL diapazonlari) qayta yutilishi jarayoni sabab bo'lishi ham mumkin.

4. Tez neytronlar oqimining $> 10^{15}$ cm⁻² da ortishi bilan aktivator Ce³⁺ markazining GL intensivligining pasayishi ikki jarayon bilan izohlanishi ko'rsatilgan: bir tomondan, rang markazlari (Ce⁴⁺+V_O va F₂⁺) tomonidan 380–550 nm spektral sohasida Ce³⁺ lyuminessensiyasining qayta yutilishi (reabsorbsiyasi) bo'lishi mumkin; konsentratsiyasi neytron oqimining 10^{17} cm⁻² ga oshishi bilan ortadi; boshqa tomondan, neytron nurlantirilgan namunani gamma nurlari bilan qo'shimcha nurlantirish va keyinchalik 605 K ga qizdirish natijalari Ce³⁺ markazi tomonidan kavaklarni ushlab jarayonini ko'rsatadi, bu Ce⁴⁺ markazlarining shakllanishiga va elektron F, Ce⁴⁺+V_O va F₂⁺ markazlarining konsentratsiyasining oshishiga olib keladi.

5. LSO:Ce kristallari asosidagi sintillyatorlarning gamma-nurlanish ta'siriga $5 \cdot 10^4$ Gr dozagacha, tez neytronlar ta'siriga 10^{15} cm⁻² flyuyensgacha barqarorlik chegarasi aniqlandi.

6. Quyidagi miqdori bo'lgan 0,1 at.% Ce va $> 0,1$ at.% Ca LSO:Ce,Ca kristallarini o'stirganda {Ca_{Lu}+V_O} kompleks nuqsonlari hosil bo'ladi, bular 310 K da dozasi $5 \cdot 10^7$ Gr gacha bo'lgan gamma kvant ta'sirida kristallarning binafsha rangga ega bo'lishiga olib keladi va Ce ning 410 nm da Ce1 markazi intensivligini va gamma-lyuminessansiya sohasida optik shaffoflikni barqarorlashtiradi.

7. LSO:Ce (0.4at.%Ca) ning gamma-nurlanish harorati 325–400 K bo'lganda Ce1-markazning 410 nm GL polosasi intensivligining so'nishi kuzatiladi (Ca²⁺ aralashmasiz esa 370–475 K gacha so'nishi sodir bo'ladi). Bu hodisa 425 nm OYu

polosasida $\{Ca^{2+}_{Lu}+F^{+}+Ce^{4+}_{Lu}\}$ nuqsonli komplekslarining sintillyatsion nurlanishini qayta yutish jarayonining ustunligi bilan bog‘liq. Xona haroratida 425 nm da optik yutilish va sariq rang zaryadlarning tuzoqlardan chiqishi natijasida 50 soatda yo‘qoladi.

8. 0.3-0.4 at.% konsentratsiyali Ca^{2+} ionlari bilan qo‘shimcha legirlangan LSO:Ce kristallari gamma-nurlanishning sintillyatsion detektori sifatida tavsiya etilishi mumkin, chunki GL 410 nm sohasida yorug‘lik chiqishi $5 \cdot 10^7$ Gr dozagacha o‘zgarmaydi. Biroq, sintillyatsion lyuminessansiya chiqishini va ssintillyatsiya sohasida optik shaffoflikni barqarorlashtirish uchun ishchi harorat 325 K dan oshmasligi kerak, undan yuqori haroratda yorug‘lik chiqishi pasayadi. Bu PET yadroviy tibbiy diagnostikasi va Katta Adron Kollayderi (HL-LHC) tajribalari uchun muhimdir.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSC.02/30.12.2019.FM/T.33.01 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ
УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ ИНСТИТУТЕ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ**

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

КУДРАТОВ ХИКМАТУЛЛА НОРБОВЕВИЧ

**РЕКОМБИНАЦИОННОЕ СВЕЧЕНИЕ ЦЕРИЯ В СЦИНТИЛЛЯТОРНЫХ
МОНОКРИСТАЛЛАХ ОРТОСИЛИКАТА ЛЮТЕЦИЯ С
ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ПРИМЕСЬЮ СА И РАДИАЦИОННО-
НАВЕДЕННЫМИ ЦЕНТРАМИ ОКРАСКИ**

01.04.07 – Физика конденсированного состояния

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 номером № В2024.2. PhD/FM1110

Диссертация выполнена в Институте ядерной физики Академии наук Республики Узбекистан.

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

Научный руководитель:

Исламов Ахаткул Хайитович

кандидат физико-математических наук
старший научный сотрудник

Официальные оппоненты:

Муссаева Малика Анваровна

доктор физико-математических наук
старший научный сотрудник

Атабаев Бахтиёр Гафурович

кандидат физико-математических наук
старший научный сотрудник

Ведущая организация:

**Самаркандский государственный университет
имени Шарофа Рашидова**

Защита диссертации состоится « ____ » _____ 2025 года в ____ часов на заседании Научного совета DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 при Институте ядерной физики (Адрес: 100214, г. Ташкент, пос. Улугбек, Институт ядерной физики. Тел.: (+99871) 289-31-41; факс: (+99871)289-36-65; e-mail: info@inp.uz).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Института ядерной физики (регистрационный номер _____) (Адрес: 100214, г. Ташкент, пос. Улугбек, Институт ядерной физики. Тел. (+99871) 289-31-19).

Автореферат диссертации разослан « ____ » _____ 2025 г.
(протокол рассылки № _____ от « ____ » _____ 2025 г.).

М. Ю. Ташметов

председатель Научного совета по присуждению
ученых степеней, д.ф.-м.н., профессор

О.Р.Тожибоев

ученый секретарь Научного совета
по присуждению ученых степеней, PhD ф.-м.н.,
старший научный сотрудник

С.Б.Игамов

председатель научного семинара
при Научном совете по присуждению
ученых степеней, д.ф.-м.н.,
старший научный сотрудник

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. За последние два десятилетия возросла потребность в сцинтилляционных материалах на основе тяжелых элементов, что связано с активным развитием ядерной медицинской диагностики, включая позитронную эмиссионную томографию (ПЭТ), однофотонную эмиссионную компьютерную томографию (ОФЭКТ) и компьютерную томографию, а также с задачами физики высоких энергий, в частности, обнаружением новых элементарных частиц. В этом отношении особый интерес представляет оксиортосиликат лютеция, активированный ионами церия $\text{Lu}_2\text{SiO}_5:\text{Ce}$ (LSO:Ce), который рассматривается как перспективный сцинтилляционный материал. Благодаря короткому времени затухания (40 нс) и высокой светоотдаче (26000 фотон/МэВ) за счет активатора Ce^{3+} , LSO:Ce обладает преимуществами по сравнению с неактивированными сцинтилляторами $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ (BGO) и PbWO_4 (PWO), несмотря на относительно высокую плотность 7.4 г/см^3 , что является недостатком. Кроме того, по длине волны излучения 410 нм LSO:Ce не уступает BGO и PWO, что делает его подходящим для использования в фотоэлектрических преобразователях.

В последнее время ученые все больше исследуют оптические свойства кристалла LSO:Ce, стремясь раскрыть его потенциал как сцинтиллятора и устранить его явный недостаток – интенсивное послесвечение, которое негативно сказывается на визуализации и световых выводе в медицинской диагностике. Перспективы его использования в условиях высокой энергии ионизирующих и ядерных излучений подчеркивает необходимость выявления и устранения факторов, снижающих радиационно-оптическую прозрачность и ухудшающих люминесценцию. На сегодняшний день таких исследований проведено недостаточно. Решение этих практических задач по созданию более чувствительных и стабильных детекторов возможно лишь на основе детального изучения физических процессов, происходящих от момента поглощения ядерных частиц до импульсов сцинтилляции в кристаллах.

В середине 1970-х годов в Академии наук Республики Узбекистан были начаты исследования, посвященные радиационно-стимулированным явлениям в широко-зонных кислородосодержащих кристаллах. Целью этих работ являлось повышение качества лазерных и оптических материалов путем глубокого изучения их радиационно-оптических свойств. В нашей республике с особым вниманием прорабатываются фундаментальные основы для создания люминесцентных материалов, предназначенных для детекторов, которые способны обнаруживать ионизирующие и ядерные излучения на мировом уровне. Направления этих фундаментальных исследований и разработок, имеющих большое значение для развития науки нашей страны и их практического применения, отражены в Стратегии ³ развития нового Узбекистана на 2022-2026 гг.

³ Указ Президента Республики Узбекистан № УП-60 «О Стратегии развития нового Узбекистана на 2022–2026 гг.» от 28 января 2022 г.

Исследования в этой области соответствуют целям и задачам, предусмотренным в Указах Президента Республики Узбекистан № УП-4512 от 1 марта 2013 года «О мерах по дальнейшему развитию альтернативных источников энергии», № УП-60 от 28 января 2022 года «О Стратегии развития нового Узбекистана на 2022–2026 гг.», Постановлениях Президента Республики Узбекистан № ПП–2789 от 17 февраля 2017 года «О мерах по дальнейшему совершенствованию деятельности Академии наук, организации, управления и финансирования научно-исследовательской деятельности», № ПП-4526 от 21 ноября 2019 года «О мерах по поддержке научно исследовательской деятельности Института ядерной физики Академии наук Республики Узбекистан», а также других нормативно-правовых документах, принятых в данной сфере.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики. Диссертационная работа соответствует приоритетному направлению развития науки и технологий республики II. «Энергетика, энергосбережение и альтернативные источники энергии».

Степень изученности проблемы. Сцинтилляционные и оптические характеристики монокристаллов ортосиликата LSO:Ce для диагностики в ядерной медицине изучаются многими учеными мира, в частности американскими (С.L. Melcher, K. Yang, D.W. Cooke), японскими (H. Suzuki, M. Kitaura, M. Kobayashi), нидерландскими (W. Drozdowski, A. Wojtowicz) китайскими (Y. Shen, X. Feng), французскими (L. Pidot); а для физики высоких энергий - швейцарскими (E. Auffray, P. Lecoq), российскими (Ю.Д. Заварцев, С.А. Кутовой), белорусскими (М.В. Коржик, А.А. Федоров), украинскими (Ю.В. Зоренко, В.И. Горбенко), чешскими (V. Babin, V.V. Laguta).

Ученые Узбекистана (Ш.А. Вахидов, И. Нуритдинов и Ким Ген Чан и другие специалисты) проводили исследования люминесценции свободных и автолокализованных экситонов, а также их взаимодействие со свечением активаторных центров в монокристаллах $Y_2SiO_5:(Nd, Eu)$, $Y_2Si_2O_7:(Nd, Eu)$. Кроме того, в кристаллах $Gd_2SiO_5:Ce$ ими изучалась радиационная стойкость оптических характеристик при воздействии гамма- и реакторного излучений.

В настоящее время получены новые сцинтилляционные кристаллы $Lu_2SiO_5:Ce$, для которых остаются не исследованными процессы накопления радиационно-индуцированных центров окраски и свечения, их релаксация, а также механизмы термического обесцвечивания. Установлено, что дополнительное легирование ионами Ca^{2+} способствует улучшению сцинтилляционных характеристик. Однако влияние ионизирующего излучения на оптическую прозрачность и выход активаторного свечения в кристалле $Lu_2SiO_5:Ce,Ca$ изучено недостаточно. В связи с этим механизмы влияния наведенных центров окраски и дополнительного легирования ионами Ca^{2+} на выход активаторного свечения при облучении ионизирующим излучением требуют дальнейших исследований.

Связь темы диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ научно-исследовательского учреждения, где

выполнена диссертация. Диссертационная работа выполнена в рамках утвержденной Постановлением Президента РУз № ПП-4526 от 21 ноября 2019 года программы научно-исследовательских работ Института ядерной физики АН РУз на 2020–2024 годы по теме: «Исследования в области атомной энергетики, разработки технологий получения радиоизотопов и внедрения ядерных технологий».

Целью исследования является установление механизма влияния радиационно-генерированных центров окраски без и с участием ионов кальция на перенос поглощенной энергии к активаторным ионам церия в сцинтилляторных монокристаллах оксиортосиликата лютеция.

Задачи исследования:

изучить кинетику накопления центров окраски в монокристалле LSO:Ce при облучении гамма квантами до дозы 50 МГр (выше предела ресурса сцинтиллятора для физики высоких энергий);

изучить кинетику релаксации центров окраски через термостимулированное свечение ($300\div 620$ К) после облучения монокристаллов LSO:Ce гамма квантами до дозы 100 Гр и выдержки до 10 час при температуре 300 К; найти связь центров окраски с ловушками носителей;

изучить кинетику гамма-стимулированного рекомбинационного активаторного свечения в монокристалле LSO:Ce после облучения гамма квантами от 70 Гр до 50 МГр; найти предел дозовой стабильности и связь деградации сцинтиллятора с наведенными центрами окраски;

определить влияние наведенных центров окраски при реакторном облучении в интервале флюенсов быстрых нейтронов (от 10^{15} до 10^{17} см^{-2}) на стимулированное гамма лучами источника ^{60}Co активаторное люминесценцию при 310 К (температура в гамма-канале) для физики высоких энергий;

изучить влияние дозы гамма квантов и дополнительного легирования ионами Ca^{2+} на оптическую прозрачность и выход активаторного свечения монокристаллов $\text{Lu}_2\text{SiO}_5:\text{Ce}$;

разработать рекомендации по улучшению оптических и люминесцентных характеристик монокристаллов $\text{Lu}_2\text{SiO}_5:\text{Ce}$ для применения в ядерной медицине и физике высоких энергий.

Объектами исследования являются сцинтилляторные монокристаллы ортосиликата лютеция $\text{Lu}_2\text{SiO}_5:\text{Ce}$, активированные ионами церия и дополнительно легированные различными концентрациями ионов кальция.

Предметом исследования являются радиационно-индуцированные процессы генерации электрон-дырочных пар и дефектов пар, миграции и локализации носителей заряда, их влияние на выход активаторного свечения ионов Ce^{3+} как основной характеристики сцинтиллятора.

Методы исследования: облучение кристаллов гамма-квантами источника ^{60}Co ($E_\gamma = 1,17$ и $1,33$ МэВ), смешанным потоком быстрых нейтронов и γ -квантов в реакторе ВВР-СМ; спектроскопические методы – спектры оптического поглощения, гаммалюминесценция, фотолюминесценция и термолюминесценция в интервале температур ($77\div 620$) К.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

установлено, что после доз гамма-облучения до $5 \cdot 10^4$ Гр концентрация нейтральных Lu1-V_{O5} -центров, являющихся ростовыми дефектами и выступающих в роли электронных ловушек, уменьшается вследствие захвата электронов, образовавшиеся заряженные центры являются нестабильными при температуре 300 К;

выявлен механизм возникновения послесвечения в сцинтилляторе LSO:Ce при комнатной температуре, заключающийся в освобождении электронов из заряженных Lu1-V_{O5} -центров и их последующей рекомбинацией с дырочными центрами Ce^{4+} ;

показано, что при облучении LSO:Ce дозами, превышающими $5 \cdot 10^4$ Гр, помимо генерации собственных дефектов в кристаллической структуре, таких как $\equiv\text{Si-V}_{\text{O4}}$ (213 нм), Lu1-F-Si (238 нм), $\text{Ce}^{3+}/\text{F}^+$ (295 нм) и примесных центров $\text{Ce}^{3+}/\text{Ce}^{4+}$ (263 нм), наблюдается образование новых дефектных центров $\text{Ce}^{4+}+\text{V}_{\text{O}}$ (422 нм), проявляющихся в виде характерной желтой окраски кристаллов;

установлено, что образующиеся при облучении сцинтиллятора LSO:Ce гамма-излучением дозами, превышающими $5 \cdot 10^4$ Гр, и флюенсами быстрых нейтронов свыше 10^{15} см^{-2} , генерируемые собственные и примесные дефекты в рекомбинационном процессе конкурируют с люминесцентными центрами Ce^{4+} за захват электронов и частично реабсорбирует люминесценцию активаторного свечения Ce^{3+} ;

установлено, что при выращивании кристаллов LSO:Ce,Ca с концентрацией 0.1 ат.% Ce и более 0.1 ат.% Ca формируются комплексные удлиненные дефекты $\{\text{Ca}_{\text{Lu}}+\text{V}_{\text{O}} + \text{Ce}^{4+}_{\text{Lu}}\}$, которые под воздействием гамма-облучения дозой до 10^7 Гр при 310 К вызывают фиолетовую окраску кристаллов и стабилизируют рекомбинационные процессы активаторного свечения Ce^{3+} , устраняя реабсорбцию и обеспечивая оптическую прозрачность в области сцинтилляции.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

предложен временной режим работы сцинтиллятора при температуре 300 К, который предполагает перерывы не менее 10 часов между сеансами, что позволяет минимизировать помехи (шум) при визуализации, вызванные послесвечением сцинтиллятора;

установлен верхний предел стабильности сцинтилляторов на основе кристаллов LSO:Ce под воздействием гамма-излучения до дозы $5 \cdot 10^4$ Гр, а для быстрых нейтронов — до флюенса 10^{15} см^{-2} ;

выявлено, что кристаллы LSO:Ce , дополнительно легированные ионами Ca^{2+} концентрацией 0.3-0.4 ат%, являются перспективными для использования в качестве сцинтилляционных детекторов гамма-излучения. Однако для обеспечения стабильности светового выхода и оптической прозрачности в области сцинтилляции рекомендуется не превышать рабочую температуру 325 К, поскольку при более высоких температурах наблюдается снижение светового выхода.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость результатов заключается в выявлении механизмов послесвечения и стабилизации выхода сцинтилляции в монокристаллах LSO:Ce, легированных ионами Ca, а также их влияния на рекомбинационное активаторное свечение, что расширяет понимание взаимодействия ядерных излучений с легированными сцинтилляционными материалами.

Практическая значимость результатов заключается в установлении предельной дозы радиационной стойкости сцинтилляционных кристаллов LSO:Ce,Ca (0.3÷0.4) ат% при облучении гамма-квантами дозой до 10^7 Гр и флюенсом быстрых нейтронов 10^{15} см⁻², что позволяет обеспечить стабильную работу кристаллов LSO:Ce в условиях, характерных для позитронно-эмиссионной томографии (ПЭТ) в ядерной медицине, а также в детекторах экспериментов на Большом адронном коллайдере (HL-LHC).

Достоверность полученных результатов обосновывается использованием комплекса взаимодополняющих методов – абсорбционных, люминесцентных, термо- и фотообесцвечивания, высокой статистической надежностью и хорошей воспроизводимостью измерений; логичностью и непротиворечивостью результатов и выводов, согласующихся с общими физическими представлениями о взаимодействии ионизирующего излучения с веществом; а также подтверждается сопоставлением результатов с известными физическими закономерностями и теоретическими моделями.

Внедрение результатов исследования. На основе полученных результатов по исследованию рекомбинационного свечения церия в сцинтилляторных монокристаллах ортосиликата лютеция с дополнительной примесью Ca и радиационно-наведенными центрами окраски:

результаты по уменьшению после гамма-облучения дозами до $5 \cdot 10^4$ Гр концентрации нейтральных Lu1-V_{O5}-центров, являющихся ростовыми дефектами и выступающих в роли электронных ловушек; генерации при дозах гамма-облучения более $5 \cdot 10^4$ Гр новых дефектных центров Ce⁴⁺+V_O, проявляющихся в виде характерной желтой окраски кристаллов; формированию комплексных удлиненных дефектов, вызывающих под воздействием гамма-облучения фиолетовую окраску кристаллов и стабилизирующих рекомбинационные процессы активаторного свечения Ce⁴⁺, обеспечивая оптическую прозрачность в области сцинтилляции; выявленный механизм возникновения послесвечения в сцинтилляторе LSO:Ce используется в учебном процессе в рамках программы бакалавриата по курсам «Биомедицинская инженерия» и «Медицинская биология» (учебник «Медицинская электроника», С.Х. Умаров, Бухоро: Дурдона, 2024.), (Письмо Бухарского государственного медицинского института №230 от 21.02.2025 г.). Использование полученных результатов способствовало углублению знаний студентов о мотивации выбора сцинтилляционных детекторов для систем позитронной эмиссионной томографии и однофотонной эмиссионной компьютерной томографии, функционирующих под воздействием гамма-квантов, с учетом характеристик оптических кристаллов.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы были представлены и обсуждены на 5 международных и республиканских научно-практических конференциях.

Опубликованность результатов исследований. По теме диссертации опубликовано 9 научных работ, в том числе 4 статьи в зарубежных научных журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией для публикации основных научных результатов докторских диссертаций.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы. Объем диссертации составляет 125 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обосновывается актуальность и востребованность проведенных исследований, изложены цели и задачи исследований, научная новизна, научная и практическая значимость диссертационной работы, приведены сведения об апробации работы и публикациях автора, а также об объеме и структуре диссертации.

В первой главе диссертации «**Структурные, физические, сцинтилляционные и радиационно-оптические свойства ортосиликата лютеция**» представлен обзор литературы, посвященный структурным, физическим и сцинтилляционным свойствам данного материала. Проведен сравнительный анализ сцинтилляционных характеристик монокристаллов ортосиликата лютеция (LSO:Ce) по сравнению с другими монокристаллами силикатов и алюмо-лютециевого граната. Рассмотрено влияние различных видов радиации на оптические свойства монокристаллов ортосиликата лютеция, а также исследовано воздействие дополнительного легирования ионами Ca^{2+} на их сцинтилляционные и оптические характеристики. На основе выявленных нерешенных вопросов сформулированы цель и задачи настоящего исследования.

Во второй главе диссертации «**Объекты⁴ и экспериментальные методы исследований**» обоснован выбор объектов исследования, а именно активаторного иона церия (Ce) с концентрацией 0.25 ат. %, а также монокристаллов LSO:Ce, дополнительно легированных ионами Ca^{2+} с концентрациями 0.1, 0.2, 0.3 и 0.4 ат%. Описан способ получения сцинтилляторных кристаллов LSO:Ce. Для изучения влияния проникающей радиации на оптические свойства кристаллы облучались гамма-квантами источника ^{60}Co с энергиями 1.17 и 1.33 МэВ при температуре образца 310 К в широком диапазоне доз от 70 до $5 \cdot 10^7$ Гр; при двух мощностях дозы: 0.80 и 1.1 Гр/с. Облучение смешанными нейтронно-гамма-потоками проводилось в реакторе ВВР-СМ мощностью 10 МВт. Образцы заворачивались в алюминиевую фольгу и помещались в кадмиевый стакан с толщиной стенок 1

⁴ Образцы представлены коллегами из Scintillation Materials Research Center, Department of Materials Science and Engineering, University of Tennessee, Knoxville, USA (А.Ф.Паков и С.Л.Мелчер)

мм, что позволяло отсеять тепловые и резонансные нейтроны и пропускать только быстрые нейтроны с энергией $>0,1$ МэВ при потоке $3 \times 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ (гамма-компонента — 37 Гр/с). Четыре контейнера с образцами облучались до флюенсов быстрых нейтронов 10^{15} , 10^{16} , 5×10^{16} и 10^{17} см^{-2} . Обоснован выбор гамма-доз, флюенсов быстрых нейтронов, а также применяемых экспериментальных оптических методов, необходимых для решения поставленных задач и достижения цели исследований. В ходе всех измерений спектров оптического поглощения, люминесценции и термо-высвечивания погрешность составляла не более 1-3%, а статистическая погрешность по образцам – около 5%.

В третьей главе диссертации «Спектральные характеристики активированных кристаллов $\text{Lu}_2\text{SiO}_5:\text{Ce}$ до и после облучения гамма квантами» представлены экспериментальные результаты по воздействию гамма-излучения источника ^{60}Co на оптические свойства сцинтилляционных монокристаллов $\text{LSO}:\text{Ce}$. В спектрах оптического поглощения (ОП) необлученных образцов $\text{LSO}:\text{Ce}$ наблюдаются полосы в ультрафиолетовой (УФ)-области спектра при 190 и 210 нм, а также бесструктурная широкая полоса в области 220-250 нм (смотрите Рисунок 1, кривая 1). Кроме того, фиксируются известные полосы при 260 и 295 нм, обусловленные электронными переходами $4f \rightarrow 5d$ ионов Ce^{3+} – Ce1-центров (координированных семью ионами кислорода), а также полоса при 360 нм (смотрите Рисунок 1б, кривая 1).

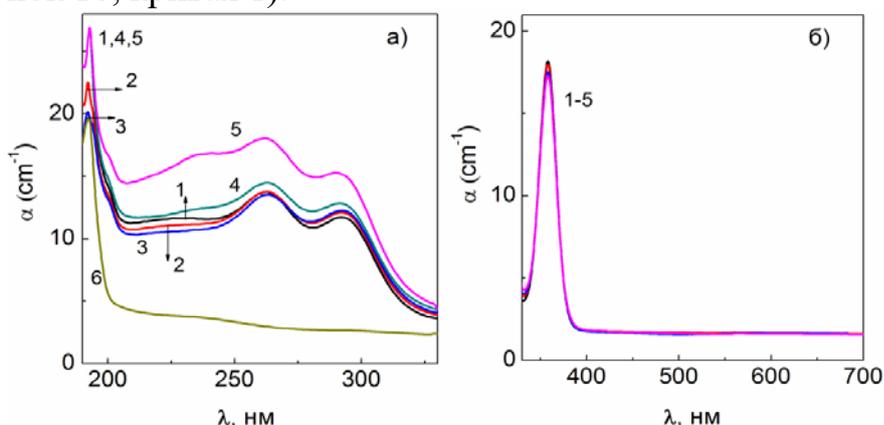


Рис.1. Спектры поглощения активированного кристалла $\text{LSO}:\text{Ce}$: а) в УФ- и б) видимой областях спектра. Кривые: 1 – необлученный образец; 2,3,4,5 – после облучения дозами 10^2 , 10^4 , $5 \cdot 10^5$ и $5 \cdot 10^7$ Гр соответственно; 6 – сравнение с необлученным кристаллом YSO

Спектр оптического поглощения (ОП) необлученного образца $\text{LSO}:\text{Ce}$ аналогичен спектрам, ранее опубликованным другими исследователями, которые приписывают полосы при 200, 220, 264, 295 и 356 нм переходам $4f \rightarrow 5d$ в ионах Ce^{3+} . Следует отметить, что в спектрах ОП необлученного номинально чистого образца ортосиликата иттрия Y_2SiO_5 (YSO) также наблюдается полоса при 195 нм и слабая, более широкая полоса в диапазоне 200–250 нм (кривая б), аналогичная таковой в кристалле LSO с моноклинной структурой $C2/c$ с двумя

неэквивалентными металлическими узлами (смотрите Рисунок 1а, кривая 1). Это свидетельствует о независимости полос в области 190–250 нм от присутствия ионов активатора Се и их связи с дорадиационными (или ростовыми) дефектами, которые образуются при выращивании методом Чохральского в восстановительной атмосфере аргона. После гамма-облучения дозами 10^2 и 10^4 Гр наблюдается более выраженное уменьшение полосы при 195 нм по сравнению со спектральной областью 200–250 нм (смотрите Рисунок 1а, кривые 2 и 3). После облучения дозами $5 \cdot 10^5$ и $5 \cdot 10^7$ Гр эта полоса увеличивается и выходит на насыщение (смотрите Рисунок 1а, кривые 4 и 5). Кроме того, при дозе $5 \cdot 10^5$ Гр более отчетливо выделяется полоса 240 нм, а после $5 \cdot 10^7$ Гр быстро увеличиваются полосы ОП 240, 260 и 290 нм (смотрите Рисунок 1а, кривые 4 и 5). При этом не наблюдается существенных изменений полосы 360 нм, связанной с переходом ($4f \rightarrow 5d$) иона Ce^{3+} (смотрите Рисунок 1б, кривые 1-5). При разложении на гауссианы спектров ОП определено их количество и положение на рисунке 2а, что необходимо было для отчетливого анализа кинетики изменения соответствующих Гауссианам центров окраски после гамма-доз в интервале от 70 до $5 \cdot 10^7$ Гр. Видно, что при увеличении дозы до 10^4 Гр наблюдается существенное уменьшение интенсивности полосы при 193 нм (кривая 6) по сравнению с полосами при 238, 213 и 202 нм (кривые 3-5). При этом интенсивности полос при 293 и 263 нм (кривые 1,2) существенно не меняются до дозы $5 \cdot 10^5$ Гр. При дальнейшем увеличении дозы от 10^4 до $5 \cdot 10^5$ Гр интенсивность полосы 193 нм возрастает, достигая насыщения в интервале доз $5 \cdot 10^6 - 5 \cdot 10^7$ Гр (кривая 6). Также наблюдается рост интенсивности полос при 202, 213 нм и 238 нм в интервале доз $5 \cdot 10^5 - 5 \cdot 10^7$ Гр. Кроме того, замечено увеличение интенсивности полос при 293 и 263 нм при дозах $>10^6$ Гр (кривые 1,2). На рисунке 2а выделяются шесть полос оптического поглощения (G1–G6) с максимумами при 4.22 эВ (293 нм), 4.7 эВ (263 нм), 5.18 эВ (238 нм), 5.8 эВ (213 нм), 6.12 эВ (202 нм) и 6.4 эВ (193 нм) и FWHM (полная ширина на полувысоте) 0.51, 0.52, 0.64, 0.65, 0.5 и 0.4 эВ соответственно.

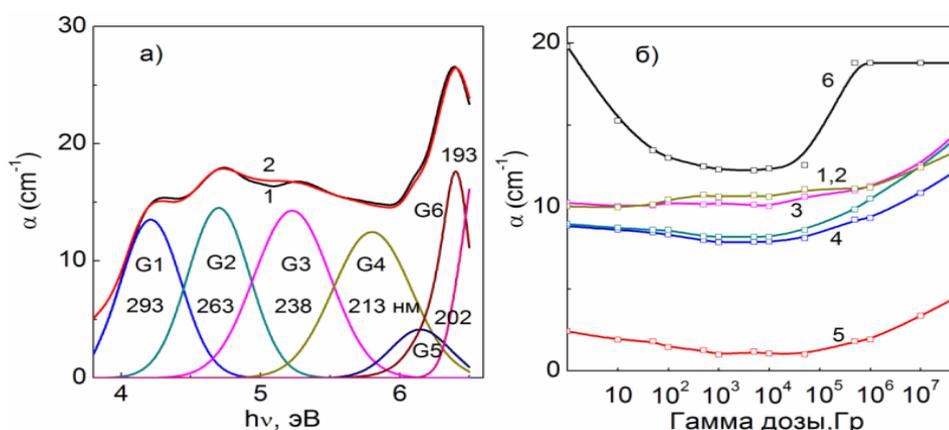


Рис. 2. а) Спектр поглощения кристалла LSO:Се после облучения дозой $5 \cdot 10^7$ Гр (кривая 1), его гауссианы (G1-293, G2-263, 193–G6, G3-238, G4-213, G5-202 нм) и их сумма (кривая 2); б) дозовые зависимости гауссианов: 293 нм, 263 нм, 238 нм, 213 нм, 202 нм и 193 нм (кривые 1÷6 соответственно)

На основе этого построены дозовые зависимости интенсивностей указанных полос, что позволило проанализировать кинетику накопления соответствующих центров окраски (смотрите Рисунок 2б).

Кислородные вакансии могут участвовать в зарядо-переносных переходах $O^{2-}-V_O$, энергия которых должна быть больше, чем энергия оптических переходов F^- (кислородная вакансия, захватившая два электрона) - и F^+ (кислородная вакансия, захватившая один электрон) центров. Согласно данным рентгено - и нейтронно-структурного анализов (Gustafsson T., *et.al.*, Acta Crystallographica Sec. C Cryst. Struct. Communic. 2001. 57(6), 668), наблюдаемая полоса ОП при 193 нм в необлученных образцах LSO:Ce (смотрите Рисунок 2а) обусловлена вакансиями кислорода в узлах O_5 , входящих в состав дефектов $Lu1-V_{O5}$, не связанных с атомами Si. Полоса при 5.8 эВ (213 нм) возможно связана с вакансиями в узлах O_4 комплексных дефектов $Si-V_{O4}-Lu1$. Полоса при 238 нм (смотрите Рисунок 1а, кривые 4 и 5) связана с F^- -центром, возможно, возникающим после разрушения самой длинной связи (0.26163 нм) $Lu1-O_2-Si$ с образованием заряженной вакансии V_{O2} - комплексного центра $Lu1-F-Si$. Полагаем, что полосы поглощения 263 и 293 нм ионов Ce^{3+} после гамма доз 10^5 Гр накладываются на другие полосы Ce^{4+} - и F^+ -центров окраски, соответственно. При этом образование F^+ -центра возможно в вакансии кислорода в $Lu-V_{O1}-Si$ ($Lu-F^+-Si$) центрах или $Ce-V_{O1}-Si$ ($Ce-F^+-Si$ ОП 293 нм). Далее эти центры окраски упрощенно обозначаются как Ce^{3+}/Ce^{4+} (263 нм) и Ce^{3+}/F^+ -центры (293 нм).

Измеренные дозовые зависимости (смотрите Рисунок 2б) интенсивности поглощения центров окраски, связанных с вакансиями кислорода $Lu1-V_{O5}$ (193 нм), $\equiv Si-V_{O4}-Lu1$ (213 нм), $Lu1-F-Si$ (238 нм), активаторными центрами Ce^{3+}/Ce^{4+} (263 нм) и Ce^{3+}/F^+ (293 нм), показывают, что до дозы гамма-облучения $5 \cdot 10^4$ Гр происходит зарядка существующих ростовых дефектов. Увеличение концентрации центров $\equiv Si-V_{O4}-Lu1$ (213 нм), $Lu1-F-Si$ (238 нм) и Ce^{3+}/F^+ (293 нм) при гамма-дозах $\geq 10^5$ Гр свидетельствует об их дополнительной генерации. Желтая окраска после облучения дозой $5 \cdot 10^6$ Гр обусловлена гауссианом 422 нм. Эти центры окраски могут стать конкурентами люминесцентным Ce^{3+} -центрам в захвате носителей зарядов в рекомбинационном процессе. Учет такой конкуренции важен, например, в экспериментах по физике высоких энергий, которые планируются до 2035 года, где кристаллы с высокой светимостью, используемые в ЛНС (HL-LHC), должны сохранять оптические и люминесцентные характеристики для поглощенных доз ионизирующего излучения выше 100 Мрад (10^6 Гр). В связи с этим, для выявления влияния генерированных центров окраски на активаторное свечение Ce^{3+} в кристалле LSO:Ce, нами были зарегистрированы спектры гаммалюминесценции (ГЛ) при 310 К (смотрите Рисунок 3а).

Как показано на рисунке 3а, в спектре гаммалюминесценции (ГЛ) образца LSO:Ce в первые 3 минуты воздействия γ -квантов наблюдается широкая полоса в диапазоне энергий от 2 до 3.5 эВ (от 620 до 354 нм) (кривая 1). Затем были зарегистрированы спектры ГЛ того же образца с интервалами времени от 6 до

10 минут до достижения дозы 10^4 Гр. После этого были получены спектры ГЛ для трех образцов, предварительно облученных дозами $5 \cdot 10^4$ и 10^5 , 10^6 и $5 \cdot 10^7$ Гр, соответственно. Учитывая количество полос свечения и их длины волн, полученные спектры ГЛ после каждой дозы гамма-облучения были разложены на гауссианы. На рисунке 3а при этом отчетливо видны известные полосы свечения с максимумами: 3.1 эВ (399 нм) (гауссиан G1) и 2.95 эВ (420 нм) (G2), связанные с Ce1-центрами (координированными семью ионами кислорода); 2.7 эВ (460 нм) (гауссиан G3), связанная с Ce2-центрами (координированными шестью ионами кислорода). После разложения на компоненты гауссиана спектров ГЛ, полученных при облучении дозами от 70 до $5 \cdot 10^7$ Гр, построены кинетические кривые изменения интенсивности компонент полосы ГЛ на 400, 420 и 460 нм, представленные на рисунке 3б (кривые 1-3).

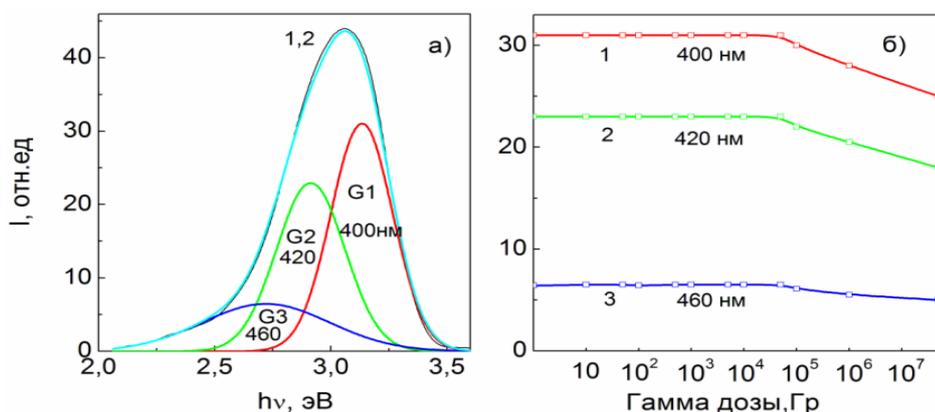


Рис. 3.а) Спектр гамма индуцированной люминесценции кристаллов LSO:Ce: а) исходные данные (кривая 1), гауссовы составляющие полосы (G1-400, G2-420, G3-460 нм) и их сумма (кривая 2); б) облученные образцы - дозовые зависимости полос 400 (1), 420 (2) и 460 нм (3)

Наблюдается интересное явление: при облучении до дозы $5 \cdot 10^4$ Гр интенсивность полос ГЛ с максимумами 400, 420 и 460 нм остается практически неизменной. Однако при дозах $\geq 10^5$ Гр наблюдается их снижение, что обусловлено уменьшением концентрации излучательных центров Ce1 и Ce2. В то же время, анализ кинетики изменения оптического поглощения при $\lambda \leq 330$ нм после доз $> 5 \cdot 10^5$ Гр показывает, что происходит увеличение концентрации центров окраски, связанных с дефектами: Lu1- V_{O5} (193 нм), $\equiv Si-V_{O4}$ (213 нм), Lu1-F-Si (238 нм) в матричной структуре, и около активаторов Ce^{3+}/Ce^{4+} (263 нм) и Ce^{3+}/F^+ (293 нм) (смотрите Рисунок 2б). Следовательно, можно полагать, что при гамма-воздействии ионы Ce^{3+} становятся глубокими ловушками захваченных из валентной зоны подвижных дырок



когда подвижный электрон захватывается из зоны проводимости на уровень 5d возбужденного состояния иона $(Ce^{3+})^*$ и переходит в основное 4f –состояние с испусканием фотона с энергией, соответствующей Ce1 или Ce2-центрам



Уменьшение выхода ГЛ активаторного свечения Ce^{3+} (центры Ce1 и Ce2) после дозы $\geq 10^5$ Гр (смотрите Рисунок 3б, кривые 1-3), по-видимому, связано с увеличением концентрации конкурирующих дополнительных вакансионных центров Lu1–F–Si (238 нм), Ce^{3+}/F^+ (293 нм) и $Ce^{4+}+V_O$ -центр (430 нм), которые захватывают термализованные электроны. В связи с этим, интересно было выявить связь между этими гамма-наведенными центрами окраски и известными пиками кривых термовысвечивания (КТВ) (опустошение носителей заряда из ловушек) в интервале температур 300–600 К (Dorenbos P., et.al., Jour. Phys. Condens. Matter. (1994). 6, 4167. Rakov A.F., Salikhbaev U.S, Islamov A.Kh., et.al. Jour. Lumin. (2010). 130 2004).

На рисунке 4а приведены интегральные кривые термовысвечивания активированных кристаллов LSO:Ce, облученных одинаковой дозой $2 \cdot 10^2$ Гр при температуре 310 К, зарегистрированные в интервале температур 300-600 К, через 3 минуты и 1, 3 и 10 часов (кривые 1-4 соответственно). Спектры ОП, измеренные до и после вышеуказанных времен выдержки, представлены на рисунке 4б, кривые 1-4. Кривые ТВ обычно содержат пять пиков: 335К, 390К, 440К, 475К и 540К (смотрите Рисунок 4а). Из их сравнения со спектрами ОП (смотрите Рисунок 4б) обнаружено следующее: i) амплитуда самого интенсивного пика КТВ при 335 К, зарегистрированного спустя 3 минуты после облучения (кривая 1), сильно уменьшается с увеличением времени выдержки при 300 К: до 1 часа (кривая 2) и 3 часов (кривая 3), а через 10 часов пик практически исчезает (смотрите Рисунок 4а, кривая 4). В отличие от этого пика, высокотемпературные пики КТВ при 390, 440, 475 и 540 К не зависят от времени выдержки (смотрите Рисунок 4а, кривые 1-4), что указывает на термическую стабильность соответствующих ловушек при 300 К; ii) в спектре оптического поглощения после облучения дозой $2 \cdot 10^2$ Гр интенсивность полосы при 193 нм сильно уменьшается (кривая 2) по сравнению с необлученным образцом (кривая 1) (смотрите Рисунок 4б). После 3 часов выдержки при 300 К (кривая 3) наблюдается ее увеличение, а через 10 часов ее интенсивность достигает уровня исходного необлученного образца (кривая 4) (смотрите Рисунок 3.4б). Это связано с тем, что соответствующая ловушка опустошается при 335 К. При этом заряженный дефект переходит в незаряженное состояние вследствие высвобождения электронов и их последующей рекомбинации с дырочным центром Ce^{4+} , что происходит в рамках медленного процесса послесвечения (фосфоресценция).

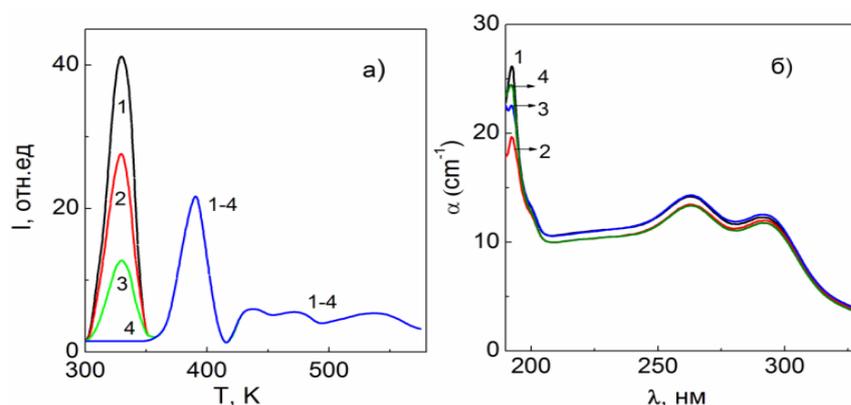


Рис. 4. а) Кривые термовысвечивания кристалла LSO:Ce, зарегистрированные после облучения дозой $2 \cdot 10^2$ Гр: через 3 минуты (1), 1 час (2), 3 часа (3) и 10 часов (4); б) спектры поглощения в УФ-области: исходный (кривая 1), после облучения дозой $2 \cdot 10^2$ Гр (2), а также через 1 час (3), и 10 ч (4) выдержки при 300 К

Этот процесс приводит к увеличению концентрации нейтральных центров $\text{Lu1-V}_{\text{O}_5}$ с незаряженным состоянием ловушки электронов V_{O_5} , расположенной вблизи центрального иона Ce^{3+} или Lu^{3+} . Следовательно, это объясняет рост концентрации нейтральных $\text{Lu1-V}_{\text{O}_5}$ -центров (полоса ОП 193 нм) в интервале дозы ($5 \cdot 10^5 \div 5 \cdot 10^7$) Гр (смотрите Рисунок 2б, кривая б), так как измерения спектров ОП проводились через неделю после каждого облучения. Кроме того, этот процесс связан с механизмом возникновения значительного послесвечения, обусловленного восстановлением нейтральных $\text{Lu1-V}_{\text{O}_5}$ -центров.

В отличие от гамма-излучения, которое воздействует на ядра, быстрые нейтроны и протоны в результате упругих столкновений в кристалле Lu_2SiO_5 преимущественно выбивают атомы кислорода из анионных узлов кислородной подрешетки, приводя к образованию френкелевских пар дефектов (собственные дефекты структуры). После захвата электронов эти дефекты превращаются в центры окраски типа F^- - и $F^{+\cdot}$ -центры. Более тяжелые ядра Lu смещаются менее эффективно. Исследование влияния комбинированного воздействия нейтронов и гамма-излучения на оптическую прозрачность и активаторное свечение имеет важное значение для экспериментальной физики высоких энергий.

В четвертой главе «**Нейтронно-индуцированные центры окраски и свечение и их влияние на активаторное свечение в сцинтилляционных монокристаллах $\text{Lu}_2\text{SiO}_5:\text{Ce}$** » представлены результаты исследования воздействия облучения быстрыми нейтронами на оптические характеристики LSO:Ce.

В спектрах ОП после минимального облучения флюенсом быстрых нейтронов 10^{15} см⁻² в LSO:Ce наблюдается увеличение интенсивности УФ поглощения в диапазоне 210–310 нм. При дальнейшем увеличении флюенса нейтронов до 10^{17} см⁻² интенсивность этого поглощения растет быстрее (смотрите Рисунок 5а, кривые 3, 4, 5). При этом после облучения γ -квантами ^{60}Co дозой $5 \cdot 10^7$ Гр уровень интенсивности поглощения приблизительно

соответствует уровню, наблюдаемому при флюенсе нейтронов 10^{15} см^{-2} (смотрите Рисунок 5а, кривые 2, 6). Следует отметить, что монокристаллы YSO и LSO имеют одинаковую моноклинную структуру $C2/c$ с двумя неэквивалентными металлическими узлами. В спектрах ОП номинально чистого кристалла YSO после облучения в реакторе при флюенсе нейтронов 10^{17} см^{-2} в УФ-области более отчетливо проявляется полоса с максимумом 300 нм, а также широкие полосы в интервалах 210–275 нм и 320–600 нм (смотрите Рисунок 5а,б, кривая 7).

В видимой области спектра ОП после облучения флюенсами $\geq 10^{16} \text{ см}^{-2}$ как в LSO:Ce, так и в номинально чистом кристалле YSO наблюдается увеличение интенсивности поглощения широкой бесструктурной полосы в диапазоне 380–600 нм (смотрите Рисунок 5б, кривые 3, 4, 5, 7). Кривая 5 (флюенс 10^{17} см^{-2}) была разложена на компоненты-гауссианы и представлена на вставке (с) рисунка 5б. Выделены три полосы с максимумами при 393 (кривая 2), 434 нм (3) и 538 нм (4). Такой же разбор спектра проводился и для образцов, облученных при флюенсах нейтронов в интервале от 10^{15} до 10^{17} см^{-2} , с целью выявления изменений интенсивности поглощения в области $> 375 \text{ нм}$ (смотрите Рисунок 5б, кривые 3,4,5). Этот диапазон перекрывает длину волны сцинтилляционного свечения в 420 нм в кристаллах LSO:Ce. Эти результаты подтверждают наши предположения о том, что полоса при 238 нм связана с F центром, полоса при 261 нм с комплексами $\text{Ce}^{3+}/\text{Ce}^{4+}$, а полоса ОП при 291 нм, обусловленная переходами ($4f \rightarrow 5d$) иона Ce^{3+} , накладывается на полосу F^+ -центра, ранее обозначенного как (Ce^{3+}/F^+).

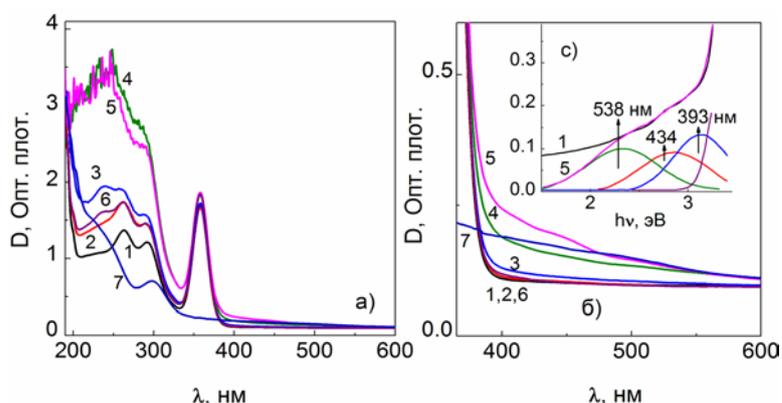


Рис.5. Спектры поглощения LSO:Ce в а) УФ и б) видимой областях: исходный образец (кривые 1) и после облучения флюенсами нейтронов 10^{15} (2), 10^{16} (3), $5 \cdot 10^{16}$ (4) и 10^{17} см^{-2} (5); после гамма облучения дозой $5 \cdot 10^7 \text{ Гр}$ (6) и номинально чистый кристалл YSO, облученный флюенсом 10^{17} см^{-2} (7); в) после флюенса нейтронов 10^{17} см^{-2} LSO:Ce (1), его гауссианы (393, 434 и 538 нм) и их сумма (5)

Большое количество дефектов в LSO:Ce генерируется при нейтронном облучении флюенсами $\geq 10^{16} \text{ см}^{-2}$ (смотрите Рисунок 5а, кривые 3,4,5) по сравнению с воздействием γ -квантов дозой $5 \cdot 10^7 \text{ Гр}$ (смотрите Рисунок 5,а,б, кривая б). Образующиеся при облучении нейтронами F и F^+ -центры, имеющие

высокую концентрацию, могут в процессе диффузии в решетке образовывать агрегаты, то есть $F+F^+ \rightarrow F_2^+$. Кроме того, вероятно, что значительное количество структурных дефектов, таких как вакансии кислорода и междоузельные атомы кислорода, способствует окислению ионов Ce^{3+} в Ce^{4+} в кристалле LSO:Ce. Далее рассмотрены центры окраски с характерными полосами ОП при 434 ($\text{Ce}^{4+} + V_{\text{O}}$) и 538 нм (агрегаты F_2^+). Эти приведенные дефекты конкурируют с ионами Ce^{4+} в захвате электронов в процессе рекомбинации при возбуждении гамма-квантами ^{60}Co . В связи с этим были зарегистрированы спектры ГЛ кристаллов, предварительно облученных нейтронами флюенсом 10^{15} , 10^{16} , $5 \cdot 10^{16}$ и 10^{17} см^{-2} , а также образцов, подвергшихся только гамма-облучению дозой $5 \cdot 10^7$ Гр.

Результаты показали, что при сравнении образцов, облученных флюенсом 10^{15} см^{-2} нейтронов и гамма-дозой $5 \cdot 10^7$ Гр интенсивность полосы ГЛ при 400 нм (Ce1-центр), снижалась приблизительно на 13 и 20 % соответственно. При дальнейшем увеличении флюенса нейтронов ($\geq 10^{16}$ см^{-2}) уменьшение интенсивности ГЛ было значительно более выраженным, например, при флюенсе 10^{17} см^{-2} оно достигало 70 %. В то же время в спектрах оптического поглощения (ОП) в УФ- и видимой областях наблюдается увеличение концентрации центров окраски, связанных с дефектами: F -центр (238 нм), $\text{Ce}^{3+}/\text{Ce}^{4+}$ (261 нм), Ce^{3+}/F^+ (291 нм), $\text{Ce}^{4+} + V_{\text{O}}$ (430 нм) и F_2^+ (538 нм) (смотрите Рисунок 5,а,б). Наблюдаемое сильное уменьшение выхода ГЛ активаторного свечения Ce^{3+} при флюенсах $\geq 10^{16}$ см^{-2} , объясняется следующим: по мере увеличения флюенса ($\geq 10^{16}$ см^{-2}) возрастает концентрация конкурирующих дополнительных вакансионных центров F (238 нм) и Ce^{3+}/F^+ (291 нм) (смотрите Рисунок 5а, кривые 2–6), которые захватывают термализованные электроны, а также способствуют переходу части ионов Ce^{3+} в Ce^{4+} в LSO:Ce. Кроме того, не исключается также процесс частичной реабсорбции свечения Ce^{3+} центрами окраски в полосах поглощения 393 нм и 430 нм, интенсивность которых увеличивается при флюенсе 10^{16} см^{-2} и продолжает расти до 10^{17} см^{-2} нейтронов (смотрите Рисунок 5б, кривые 3–5).

В связи этим представляло интерес выявить связь между нейтронно-наведенными центрами окраски, интегральными пиками КТВ (300÷600) К и активаторным свечением. Последовательно измерены спектры ОП образца LSO:Ce, облученного критическим флюенсом нейтронов $5 \cdot 10^{16}$ см^{-2} , при котором наблюдается максимальное снижение выхода ГЛ, а затем после нагрева до 605 К (для опустошения носителей заряда из ловушек). На рисунке 7а,б приведены спектры ОП в УФ (а) и видимой областях (б) исходного образца LSO:Ce (кривая 1), после облучения флюенсом нейтронов $5 \cdot 10^{16}$ см^{-2} (кривая 2), после нагрева до 600 К (для снятия КТВ и опустошения ловушек) (кривая 3), после дополнительного облучения малой гамма-дозой $4 \cdot 10^3$ Гр (кривая 4) для заполнения ловушек, а также после нагрева до 605 К (опустошения ловушек) при измерении КТВ (кривая 5).

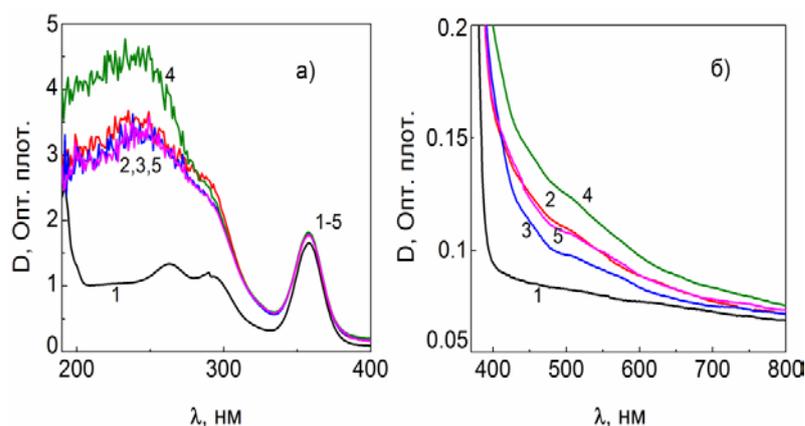


Рис.6. Спектры поглощения образца LSO:Се а) УФ и б) видимой областях: исходный образец (1), последовательно послеоблучения флюенсом нейтронов $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ (2), после нагрева до 605 К при измерении КТВ (3), после гамма облучения дозой $4 \cdot 10^3 \text{ Гр}$ (4) и еще после нагрева до 605 К при повторном измерении КТВ (5)

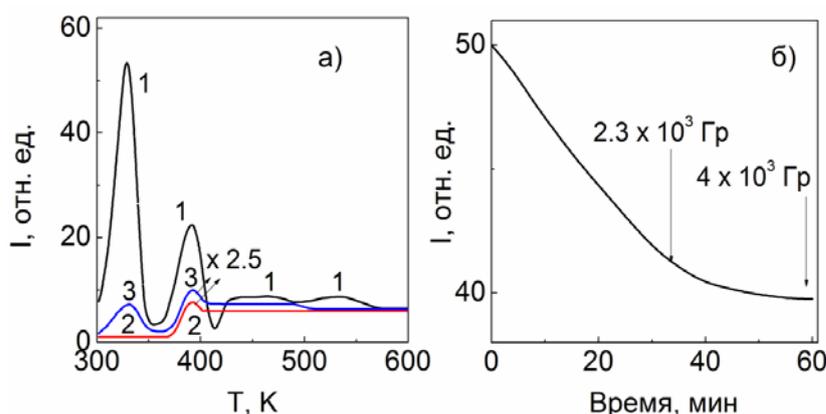


Рис. 7. Кривые ТВ двух кристаллов LSO:Ce (а): первый - только после гамма облучения дозой 10^3 Гр (1), второй - после облучения флюенсом $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ (2), а затем после гамма облучения дозой $4 \cdot 10^3 \text{ Гр}$ (3); б) второй - после нагрева до 605 К при измерении КТВ, затем дозная зависимость ГЛ на максимуме полосы 410 нм Се1-центра при 310 К

После нагрева облученного флюенсом нейтронов $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ образца LSO:Ce до 605 К при снятии кривых термовысвечивания, в его спектре ОП (смотрите Рисунок 7б, кривая 3) наблюдается уменьшение интенсивности полос при 393, 430 и 538 нм, находящихся в области от 390 до 600 нм (смотрите Рисунок 5б). При этом на интегральной кривой ТВ наблюдаются известные пики КТВ 390, 440, 475 и 540 К (смотрите Рисунок 7а, кривая 2). При последующем облучении образца γ -квантами дозой $4 \cdot 10^3 \text{ Гр}$ наблюдается сильное увеличение интенсивности полос ОП в области 238 нм (смотрите Рисунок 6а, кривая 4), а также 430 и 538 нм (смотрите Рисунок 6б, кривая 4), по сравнению со спектрами до нагрева (кривая 2) и после него (кривая 3).

Следует отметить, что интенсивность пиков КТВ в интервале температур от 300 до 600 К после облучения нейтронами сильно уменьшается (смотрите Рисунок 7а, кривая 2) по сравнению с интенсивностью после только γ -

облучения дозой $2.3 \cdot 10^3$ Гр (кривая 1). Такое снижение интенсивности пиков КТВ в образце LSO:Ce, облученном флюенсом нейтронов $5 \cdot 10^{16}$ см⁻², по-видимому, связано не только с образованием нейтронно-индуцированных центров окраски в УФ области, но также зависит от поглощения в видимой области спектра ОП (смотрите Рисунок 5б, кривые 3-5). Коррелированное уменьшение интенсивности полос ОП 393, 430 и 538 нм после нагрева до 605 К (при снятии кривых ТВ) в образце LSO:Ce (смотрите Рисунок 6б, кривая 3), а также снижение интенсивности пиков КТВ (смотрите Рисунок 7а, кривая 2) можно объяснить тем, что при передаче тепловой энергии от кристаллической решетки электронам, высвобожденным из ловушек (центров окраски) в зону проводимости, они мигрируют и излучательно рекомбинируют с дырками на Ce⁴⁺-центрах по реакции (3):



При этом сами дефекты, генерированные флюенсом нейтронов $5 \cdot 10^{16}$ см⁻², на которых возможна локализация заряда, могут остаться, что подтверждается при последующей генерации носителей гамма-дозой $2.3 \cdot 10^3$ Гр, которые захватываются этими индуцированными дефектами. Это приводит к росту полос ОП при 238 нм (*F*-центр), 430 (Ce⁴⁺+V_O-центра) и 538 нм (*F*₂⁺) (смотрите Рисунок 6а,б кривая 4). При этом часть дырок, согласно процессу (4):



захватывается Ce³⁺ с образованием дырочного Ce⁴⁺-центра. Последующий тепловой нагрев до 600 К приводит к снижению концентрации центров окраски до уровня, характерного для образца, облученного в реакторе (кривая 2): *F*-центр, связанный с полосой ОП в области 238 (смотрите Рисунок 6а, кривая 5); Ce⁴⁺+V_O-центр с 430 нм и *F*₂⁺ центр с 538 нм (смотрите Рисунок 6б кривая 5). О протекании таких процессов могут также свидетельствовать полученные результаты дозовой зависимости ГЛ в полосе Ce³⁺ при 410 нм в диапазоне до дозы $4 \cdot 10^3$ Гр (60 мин) при 310 К для образца, облученного флюенсом $5 \cdot 10^{16}$ см⁻² нейтронов и нагретого до 600 К (смотрите Рисунок 7б). Наблюдается быстрое линейное уменьшение интенсивности полосы ГЛ 410 нм на ~18% до γ -дозы $2.3 \cdot 10^3$ Гр за счет захвата дырок на Ce³⁺ и электронов в ловушки, с последующим насыщением ГЛ до дозы $4 \cdot 10^3$ Гр, что обусловлено установлением равновесия между количеством генерируемых пар электрон-дырка и актами излучательной рекомбинации на Ce³⁺. В то же время увеличивается интенсивность полос ОП при 238 нм (*F*-центр), 430 нм (Ce⁴⁺+V_O-центр) и 538 нм (V_{Luo/Si} или *F*₂⁺-центр) (смотрите Рисунок 6а,б, кривая 4).

Как было отмечено ранее, введение определенной концентрации ионов Ca²⁺ в виде примесных замещений в кристаллическую решетку LSO:Ce приводит к сокращению времени сцинтилляции, увеличению светового выхода в LSO:Ce;Ca и улучшению энергетического разрешения. Однако остается нерешенной задача обеспечения радиационно-оптической стабильности

материала, то есть сохранения его оптических характеристик при воздействии ионизирующего излучения.

В пятой главе диссертации «Влияние дополнительного легирования иона Са на гамма-индуцированные центры окраски и активаторное свечение в кристаллах $\text{Lu}_2\text{SiO}_5:\text{Ce}$ » представлены результаты воздействия гамма-квантов ^{60}Co на оптические свойства монокристаллов $\text{LSO}:\text{Ce}$, дополнительно легированных ионами Са в разных концентрациях. На рисунках 8.а,б представлены спектры ОП исходного кристалла $\text{LSO}:(0.1 \text{ ат. \% Ce})$ без кальция (кривая 1), а также образцов $\text{LSO}:(0.1 \text{ ат. \% Ce})$, легированных 0.1 ат. % Ca^{2+} (кривая 2) и 0.4 ат.% Ca^{2+} (кривая 3). Кроме того, приведены спектры после облучения γ - дозой до $5 \cdot 10^7$ Гр исходного $\text{LSO}:(0.1 \text{ ат. \% Ce})$ (кривая 4) и легированных 0.1 ат.% Ca^{2+} (кривая 5) и 0.4 ат.% Ca^{2+} (кривая 6). После облучения такой γ -дозой наблюдается увеличение интенсивности УФ ≤ 320 нм в результате генерации дефектов, связанных с центрами окраски типа F (238 нм), $\text{Ce}^{3+}/\text{Ce}^{4+}$ (260 нм) и Ce^{3+}/F^+ (295 нм) (смотрите Рисунок 8а, кривые 4,5,6).

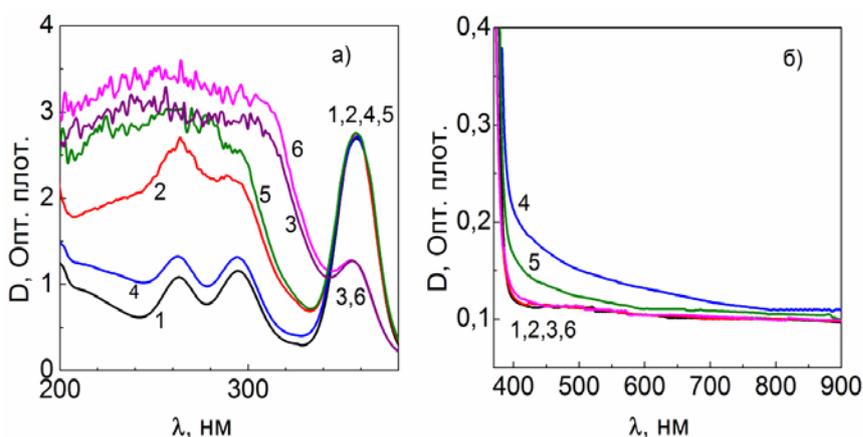


Рис.8. Спектры поглощения: (а) в УФ- и (б) в видимой области спектра: необлученных $\text{LSO}:(0.1 \text{ ат. \% Ce})$ (кривая 1), с 0.1 ат.% Ca^{2+} (2) и 0.4 ат.% Ca^{2+} (3), после γ -облучения дозой $5 \cdot 10^7$ Гр $\text{LSO}:(0.1 \text{ ат. \% Ce})$ (4), с 0.1 ат.% Ca^{2+} (5) и 0.4 ат.% Ca^{2+} (6)

В отличие от образцов $\text{LSO}:\text{Ce}$ (0.1 ат.% Ce) (кривая 4) и $\text{LSO}:\text{Ce},\text{Ca}$ (0.1 ат.%) (кривая 5), в образцах, легированных 0.4 ат.% Са (кривая 6) гамма-облучение не вызывало изменений в видимой области спектра оптического поглощения (смотрите Рисунок 8б), то есть признаки окрашивания отсутствовали. Это указывает на то, что легирование 0.4 ат.% Са не только увеличивает быстродействие $\text{LSO}:\text{Ce}$ (Wu Y., Koschan M., *et.al.*, Jour. Of Cryst. Growth. 2018. 362), но также стабилизирует пропускание в УФ (300÷400) нм и видимой областях спектра при высокой γ -дозе $5 \cdot 10^7$ Гр (смотрите Рисунок 8б, кривая 6). С целью выявления влияния ионов Ca^{2+} на активаторное свечение Ce^{3+} были измерены спектры гаммалюминесценции при 310 К в образцах с различными концентрациями Ca^{2+} (0%, 0.1%, 0.3% и 0.4% ат.).

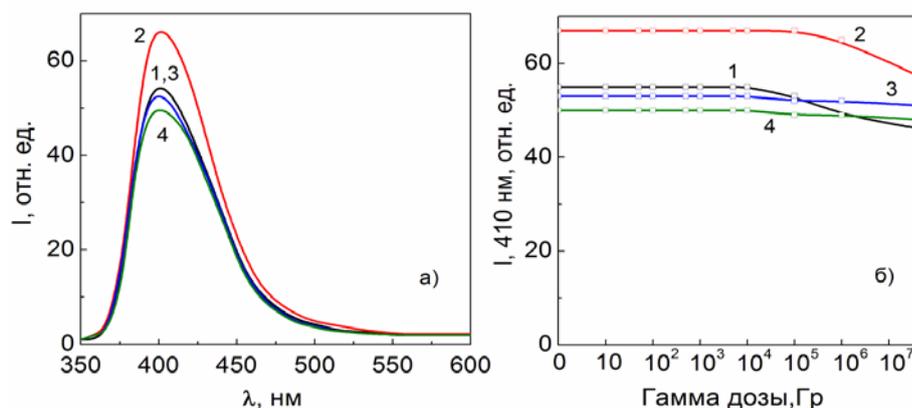


Рис. 9. а) Спектры гамма-люминесценции и б) дозовые зависимости полосы ГЛ 410 нм при 310 К в кристаллах LSO:(0.1ат %Ce) (1) и легированных 0.1ат %Ca (2), 0.3ат %Ca (3) и 0.4ат %Ca (4)

Как видно из рисунка 9а, независимо от содержания иона Ca^{2+} , в спектре ГЛ образцов имеется широкая полоса свечения Ce^{3+} в области от 350 до 550 нм (кривые 1-4). В отличие от LSO:Ce (кривая 1) в образце с 0.1 ат. %Ca (кривая 2) наблюдается увеличение интенсивности полосы свечения в максимуме 410 нм, связанной с переходом $5d \rightarrow 4f$ ионов Ce1-центров (смотрите Рисунок 9а). Далее с ростом концентрации Ca^{2+} 0.3 ат. % (кривая 3) и 0.4 ат. % (кривая 4), интенсивность ГЛ уменьшается приблизительно до уровня LSO:Ce, нелегированного ионами кальция. Поведение полосы свечения при 475 нм, связанной с Ce2-центрами (координированными шестью ионами кислорода), не изучалось из-за ее очень слабой интенсивности (основной вклад в свечение даёт Ce^{3+} в позиции Ce1- около 95%). Наблюдаемое в рекомбинационном процессе увеличение интенсивности полосы ГЛ при 410 нм, связанной с Ce1-центрами, в образце с 0.1 ат.% Ca^{2+} (кривая 2) по сравнению с исходным LSO:Ce (кривая 1) обусловлено более эффективной миграцией электронов к Ce1-центрам люминесценции. Однако, при увеличении концентрации до 0.4 ат.% Ca^{2+} возрастает вероятность замещения Ce1 стабильными Ce^{4+} , что приводит к уменьшению ГЛ Ce1 и увеличению быстродействия сцинтиллятора от 40 до 31 нс (Yang K., *et.al*, IEEE Transactions on Nuclear Science. 2009. 56 (5). –P.2960).

Далее, при гамма-облучении, были зарегистрированы спектры ГЛ этих же образцов при 310 К для изучения кинетики изменения активаторного свечения. Видно, что с увеличением времени облучения интенсивность полосы ГЛ при 410 нм в образце без Ca^{2+} остается неизменной до дозы $\sim 10^4$ Гр, а при дозах $\geq 10^5$ Гр начинает снижаться из-за уменьшения концентрации излучательных Ce1-центров. Это может быть обусловлено процессом реабсорбции свечения центрами окраски, имеющими широкую полосу поглощения в диапазоне 400–500 нм, которая отсутствует при высоких концентрациях 0.3 и 0.4 ат.% Ca (смотрите Рисунок 8б, кривая 6). При концентрациях 0.3 ат.% Ca^{2+} (кривая 3) и 0.4 ат.% Ca^{2+} (кривая 4) интенсивность полосы ГЛ 410 нм и оптическая прозрачность в видимой области спектра практически не изменяются даже при высокой дозе $5 \cdot 10^7$ Гр.

После гамма-облучения в широком интервале доз с ростом концентрации ионов $\text{Ca}^{2+} > 0.1 \text{ ат. \%}$ наблюдается усиление фиолетового окрашивания, которое является нестабильным и обесцвечивается в течение ~ 1 часа при 305 К. Далее было изучено влияние гамма-наведенной фиолетовой окраски на выход активаторного свечения в рекомбинационном процессе при различных температурах облучения.

На рисунке 10 представлены температурные зависимости интенсивности полосы ГЛ при 410 нм для кристаллов LSO:Ce без добавок Ca^{2+} (кривая 1) и с содержанием Ca^{2+} 0.4 ат.% (кривая 2). В интервале температур 310–460 К образец LSO:Ce (0.1 ат.%) без Ca^{2+} накопил дозу 675 Гр, а образец с Ca^{2+} (0.4 ат.%) набрал дозу 375 Гр в интервале температуре от 310 до 400 К. При этом интенсивность полосы снижалась до 10% от исходного значения. После охлаждения в гамма-поле до 310 К интенсивность ГЛ у образца без Ca практически восстановилась, и окраска не изменилась. В отличие от него, в образце с Ca^{2+} (0.4 ат.%) восстановления не наблюдалось, а тушение наступало уже при 325 К (кривая 2). При этом визуально наблюдалось желтое окрашивание, а в спектре ОП более отчетливо выделялась полоса поглощения в области 400–440 нм. Следуют отметить, что с увеличением времени выдержки при 305 К наблюдается постепенное снижение интенсивности полосы поглощения при 425 нм: спустя 2 часа, 4 часа и 24 часа. После 50 часов спектр восстанавливается до исходного состояния.

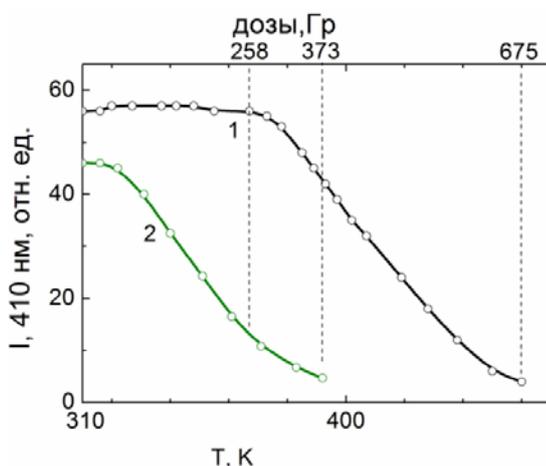


Рис. 10. Температурные зависимости интенсивности полосы ГЛ 410 нм в кристаллах LSO:Ce (0.1 ат.%) без Ca (1) и с 0.4 ат.% Ca^{2+} (2)

Большой ион Ca^{2+} (ионный радиус 1.00 Å) замещает меньший ион Lu^{3+} (0.85 Å) и порождает вакансию кислорода (V_{O}) для зарядовой компенсации Ca^{2+} . При этом механизм компенсации заряда, вероятнее всего, реализуется за счёт взаимодействия положительно заряженных V_{O} и отрицательно заряженных ионов замещения Ca_{Lu} в узлах лютеция. Можно предположить, что в процессе выращивания кристаллов LSO:Ce,Ca при концентрации $\text{Ca}^{2+} > 0.1 \text{ ат. \%}$ увеличение количества комплексных дефектов $\{\text{Ca}_{\text{Lu}} + V_{\text{O}} + \text{--- Ce}^{4+}\}$ приводит к снижению эффективности захвата электронов в V_{O} , так как вакансия

расположена не столь близко к иону Ce^{4+} . Следовательно, этот комплексный дефект роста вызывает увеличение поглощения в области 200–300 нм, связанного с ионами Ce^{4+} (смотрите Рисунок 8,а, кривые 2-5), повышение световыхода и 8-кратное уменьшение послесвечения, а также объясняет ряд наблюдаемых эффектов после гамма-облучения при повышенных температурах: фиолетовое окрашивание после дозы 10^2 Гр при 310 К; снижение температуры тушения полосы ГЛ центра Ce1 с 360 К (без Са) до 325 К (с 0,4 ат.% Са) (смотрите Рисунок 10, кривая 2); появление полосы ОП 425 нм при 373 К; желтое окрашивание, которое исчезает через 50 часов при 305 К. Повторное гамма-облучение при 310 К восстанавливает как высокую интенсивность полосы ГЛ 410 нм, так и фиолетовый оттенок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенных исследований по диссертации на соискание ученой степени доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам на тему «Рекомбинационное свечение церия в сцинтилляторных монокристаллах ортосиликата лютеция с дополнительной примесью Са и радиационно-наведенными центрами окраски» представлены следующие выводы:

1. Установлено, что при низких дозах гамма-облучения ($<5 \cdot 10^4$ Гр) уменьшение интенсивности полосы ОП 193 нм, связанной с нейтральным ростовым дефектом $\text{Lu1}-\text{V}_{\text{O}_5}$ -центра (исходное незаряженное состояние ловушки для электронов), обусловлено захватом электронов и переходом в заряженное состояние, нестабильное при 300 К.

2. Показано, что при низких гамма-дозах (200 Гр) появление интенсивного пика КТВ 335 К, снижение интенсивности полосы ОП 193 нм, а также последующее восстановление интенсивности полосы ОП 193 нм и исчезновение пика КТВ 335 К после до 10-часовой выдержки при 305 К обусловлены постепенным освобождением электронов и их рекомбинацией с дырочным Ce^{4+} центром. Этот процесс, возможно, объясняет механизм возникновения длительного послесвечения сцинтиллятора $\text{LSO}:\text{Ce}$.

3. Установлено, что в интервале доз гамма облучения $70 \div 5 \cdot 10^4$ Гр при 310 К интенсивность полос ГЛ 399 и 420 нм (Ce1 -центров) и 450 нм (Ce2 -центров) не изменяется, а при более высоких дозах ($>5 \cdot 10^4$ Гр) уменьшение их интенсивности обусловлено генерацией собственных дефектов в кристаллической структуре $\text{LSO}:\text{Ce}:\text{Si}-\text{V}_{\text{O}_4}$ (ОП 213 нм), $\text{Lu1}-\text{F}-\text{Si}$ (238 нм), $\text{Ce1}-\text{F}^+-\text{Si}$ (295 нм) и Ce^{4+} (263 нм). Также не исключен процесс частичной реабсорбции свечения Ce^{3+} (полосы ГЛ 399 и 420 нм) центром окраски в полосе 422 нм ($\text{Ce}^{4+}+\text{V}_{\text{O}}$), что связано с наблюдаемой желтой окраской при дозах облучения $> 5 \cdot 10^5$ Гр.

4. Показано, что уменьшение интенсивности полос ГЛ активаторного Ce^{3+} -центра с ростом флюенса быстрых нейтронов $>10^{15}$ см^{-2} объясняется двумя процессами: во-первых, реабсорбцией свечения Ce^{3+} в спектральной области

(380÷550) нм центрами окраски ($\text{Ce}^{4+} + V_{\text{O}}$ и V_{LuorSi}/F_2^+), концентрация которых растет до флюенса нейтронов 10^{17} см^{-2} ; во-вторых, данные по дополнительному облучению гамма квантами после нагрева до 605 К нейтронно-облученного образца позволяют предположить захват дырки Ce^{3+} - центром с образованием дырочных Ce^{4+} центров и увеличением концентрации электронных F и F_2^+ - центров.

5. Определен верхний предел стабильности сцинтилляторов на основе кристаллов LSO:Ce к воздействию гамма облучения (доза $5 \cdot 10^4$ Гр) и быстрых нейтронов (флюенс 10^{15} см^{-2}).

6. Установлено, что при выращивании кристаллов LSO:Ce,Ca с концентрацией 0.1 ат.% Ce и > 0.1 ат.% Ca образуются комплексные дефекты $\{\text{Ca}_{\text{Lu}} + V_{\text{O}} + \text{Ce}^{4+}\}$, которые под воздействием доз гамма облучения до $5 \cdot 10^7$ Гр при 310 К приводят к появлению фиолетовой окраски кристаллов и стабилизируют оптическую прозрачность в полосе гамма-люминесценции центра Ce1 при 410 нм, а также интенсивность активаторного свечения Ce.

7. Показано, что при повышении температуры гамма-облучения LSO:Ce (0.4 ат % Ca) от 325 до 400 К происходит тушение интенсивности полосы ГЛ 410 нм Ce1-центра (без примеси Ca^{2+} тушение наблюдается в диапазоне 370-475 К), что обусловлено преобладанием процесса реабсорбции сцинтилляционного свечения дефектными комплексами $\{\text{Ca}^{2+}_{\text{Lu}} + F^+ + \text{Ce}^{4+}_{\text{Lu}}\}$ в полосе ОП 425 нм. Оптическое поглощение при 425 нм и желтый цвет не стабильны при комнатной температуре (в течение 50 часов), в результате освобождения зарядов из ловушек.

8. Кристаллы LSO:Ce, дополнительно легированные ионами Ca^{2+} с концентрацией (0.3÷0.4) ат%, могут быть рекомендованы в качестве сцинтилляционного детектора гамма-излучения, поскольку выход полосы ГЛ 410 нм не изменяется до дозы $5 \cdot 10^7$ Гр. Однако для стабилизации выхода сцинтилляционного свечения и оптической прозрачности в области сцинтилляции не следует превышать рабочую температуру 325 К, выше которой световыход снижается. Это особенно важно, например, для ядерной медицинской диагностики в ПЭТ и экспериментов на Большом адронном коллайдере (HL-LHC).

**SCIENTIFIC COUNCIL DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 ON AWARD OF
SCIENTIFIC DEGREES AT THE INSTITUTE OF NUCLEAR PHYSICS**

INSTITUTE OF NUCLEAR PHYSICS

KUDRATOV KHIKMATULLA NORBOEVICH

**THE RECOMBINATION EMISSION OF CERIUM IN LUTETIUM
ORTHOSILICATE SINGLE CRYSTALS WITH ADDITIONAL Ca DOPANT
AND RADIATION- INDUCED COLOR CENTERS**

01.04.07 – Physics of condensed matters

DISSERTATION ABSTRACT
of the Doctor of Philosophy (PhD) on Physical and Mathematical Sciences

Tashkent – 2025

The topic of the dissertation for Doctor of Philosophy (PhD) in physical and mathematical sciences is registered with the Higher Attestation Commission under the Ministry of Higher Education, Science and Innovation of the Republic of Uzbekistan under number B2024.2. PhD/FM1110

The doctoral (PhD) dissertation was carried out at the Institute of Nuclear Physics of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan.

The abstract of the dissertation was posted in three (Uzbek, Russian, English (resume)) languages on the website of the Scientific Council at www.inp.uz and on the website of "ZiyoNet" information and educational portal at www.ziyo.net.

Scientific supervisor: **Islamov Akhatkul**
Candidate of Physical and Mathematical Sciences,
Senior Researcher

Official opponents: **Mussaeva Malika Anvarovna**
Doctor of Physical and Mathematical Sciences,
Senior Researcher

Atabaev Baxtiyor Gafurovich
Candidate of Physical and Mathematical Sciences,
Senior Researcher

Leading organization: **Samarkand State University named after Sharof Rashidov**

The defense of the dissertation will be held on "____" _____ 2025 at ____ at the meeting of the Scientific Council DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 at the Institute of Nuclear Physics (Address: 100214, Tashkent, Ulugbek settlement, Institute of Nuclear Physics. Tel.: (+99871) 289-31-41; fax: (+99871)289-36-65; e-mail: info@inp.uz).

The doctoral (PhD) dissertation can be looked through at the Information Resource Center of the Institute of Nuclear Physics (registration number _____) Address: Institute of Nuclear Physics, Ulugbek settlement, 100214, Tashkent city, tel. (+99871) 289-31-19.

The abstract of dissertation was distributed on "____" _____ 2025.
(Registry record No. _____ dated "____" _____ 2025).

M. Yu. Tashmetov
Chairman of the Scientific Council
on Award of Scientific Degrees,
D. Ph.-M.S., Professor

O.R. Todjiboev
Scientific Secretary of the Scientific
Council on Award of Scientific Degrees,
PhD Ph.-M.S., Senior Researcher

S.B. Igamov
Chairman of the Scientific Seminar
at the Scientific Council on Award
of Scientific Degrees, D. Ph.-M.S.,
Senior Researcher

INTRODUCTION (thesis annotation)

The aim of the research work is to study the mechanism of influence of radiation-generated color centers without and with the participation of calcium ions on the transfer of absorbed energy to the activator cerium ions in the scintillating single crystals of Lutetium oxyorthosilicate.

The tasks of the research work:

to study the kinetics of the accumulation of color centers in the LSO:Ce single crystals after gamma-quanta irradiation to a dose of 50 MGy (above the limit of the scintillator's resource for high-energy physics);

to study the kinetics of the color centers relaxation through thermostimulated light-emission (300÷620) K after irradiation of LSO:Ce single crystals with gamma quanta (up to 100 Gy) and different duration (up to 10 hours) at 300 K; find the relation of color centers with carriers traps;

to study the kinetics of gamma-stimulated recombination activator luminescence in the LSO:Ce single crystal after gamma-quanta irradiation (70 Gy to 50 MGy); find the dose range of stability and the relation of the scintillator's degradation with the specified color centers;

to determine the effect of gamma + neutron-induced color centers in the fast neutron fluence range (from 10^{15} to 10^{17} cm⁻²) on gamma-stimulated activator luminescence at 310 K (temperature in the gamma channel) for high-energy physics;

to study the effect of gamma-quanta and additional doping of Lu₂SiO₅:Ce single crystals with Ca²⁺ ions on the optical transparency window and light output;

to recommend the improving of the optical and luminescent characteristics of the crystals for applications in medicine and high-energy physics.

The objects of the research work are scintillator single crystals of lutetium orthosilicate Lu₂SiO₅:Ce, activated by Cerium ions and additionally doped with various concentrations of Calcium ions.

The subject of the research work are the radiation-induced processes of generation of electron-hole pairs and defect pairs, the migration and localization of charge carriers, their influence on the light output of Ce³⁺ ions as the main characteristics of the scintillator.

Scientific novelty of the research work:

it has been found that after low doses (up to $5 \cdot 10^4$ Gy) of gamma irradiation, a decrease in the concentration of neutral Lu1–V_{O5} centers (uncharged state of electron traps), whose origin is associated with a growth defect, that is, with the technological process, is caused by electron capture. Such a charged center is unstable at 300 K;

the mechanism of afterglow in the LSO:Ce scintillator is explained by the fact that with an increase in exposure time up to 10 hours at 300 K after a gamma dose of 200 Gy, the Lu1–V_{O5} center is restored and the intensity of the 335 K thermoluminescence peak decreases as a result of the release of electrons from traps (Lu1–V_{O5} centers) and their subsequent recombination with Ce⁴⁺ hole centers;

it has been proved that at higher gamma doses $>5 \cdot 10^4$ Gy of LSO:Ce irradiation, in addition to the generation of intrinsic defects in the crystal structure: i) $\equiv\text{Si}-\text{V}_{\text{O}4}$

(absorption band 213 nm), ii) Lu1-F-Si (absorption band 238 nm), iii) Ce³⁺/F⁺ (absorption band 295 nm), and impurity centers Ce³⁺/Ce⁴⁺ (absorption band 263 nm), defective Ce⁴⁺+V_O centers are also formed with a characteristic absorption band at 422 nm, responsible for the appearance of yellow coloration;

at higher ⁶⁰Co γ-doses >5·10⁴ Gy and fast neutron fluences >10¹⁵ cm⁻² in the recombination process, all the aforementioned generated defects become competitors of the luminescent Ce³⁺-centre in electron capture or partially reabsorbed with an absorption band of 422 nm;

it has been found that in the doping of LSO:Ce,Ca crystals with concentrations of 0.1 at.% Ce and > 0.1 at.% Ca, complex elongated defects {Ca_{Lu}+V_O + --Ce⁴⁺_{Lu}}, which under the influence of gamma quanta at a dose up to 5·10⁷ Gy at 310 K, cause the crystals to turn violet and stabilize the recombination process of Ce-activator luminescence by eliminating reabsorption of the crystals (ensuring optical transparency in the scintillation region).

Implementation of the research results. Based on the obtained results of studying the recombination luminescence of Cerium in scintillating single crystals of Lutetium orthosilicate with additional Ca dopant and radiation-induced color centers:

results on reducing the concentration of neutral Lu1-V_{O5}-centers, which are growth defects and act as electronic traps, after gamma-irradiation with doses up to 5·10⁴ Gy; generation of new Ce⁴⁺+V_O defective centers at gamma-irradiation doses greater than 5·10⁴ Gy, manifesting as a characteristic yellow color of crystals; formation of complex elongated defects, causing a violet color of crystals under the influence of gamma-irradiation and stabilizing the recombination processes of Ce⁴⁺, ensuring optical transparency in the scintillation region; the identified mechanism for the occurrence of afterlight in the LSO:Ce scintillator is used in the educational process within the bachelor's program for the courses "Biomedical Engineering" and "Medical Biology" (textbook "Medical Electronics," S.Kh. Umarov, Bukhara: Durdona, 2024), (Letter of Bukhara State Medical Institute No. 230 dated 21.02.2025). The use of the obtained results contributed to the deepening of students' knowledge of the motivation for choosing scintillation detectors for positron emission tomography and single-photon emission computed tomography systems operating under the influence of gamma quanta, taking into account the characteristics of optical crystals.

Structure and volume of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, five chapters, a conclusion and a list of references. The volume of the dissertation is 125 pages.

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

I bo'lim (I часть; part I)

1. Islamov A.Kh., Ibragimova E.M., Kudratov Kh.N., Vildanov R.R. Effect of Gamma-Induced Defects on the Activator Glow in the $\text{Lu}_2\text{SiO}_5:\text{Ce}$ Scintillator Crystals // Physics of the Solid State. – Pleiades publishing, United States, 2022. – Vol. 64. No. 7. – pp. 362–371. (№1. Web of Science; IF=0.895)

2. Islamov A.Kh., Ibragimova E.M., Kudratov Kh.N., Rasulkulova D.S. Effect of thermic annealing on gamma-induced color centers and activator luminescence in $\text{Lu}_2\text{SiO}_5:\text{Ce}$ scintillator crystals // Optics and Spectroscopy. –Maik Nauka Publishing/ Springer SBM, 2023. – Vol. 131. No8. – pp. 997-1002. (№1. Web of Science; IF=0,7).

3. Islamov A.Kh., Ibragimova E.M., Kudratov Kh.N., Khayitov I.A., Vildanov R.R. Effects of Fast Neutrons and Gamma Components on Color Centers and Activator Glow in $\text{Lu}_2\text{SiO}_5:\text{Ce}$ Scintillator Crystals // Optical Materials. – Elsevier, 2023. – Vol. 145. – id. 114459. (№1. Web of Science; IF=3,8).

4. Islamov A.Kh., Ibragimova E.M., Kudratov Kh.N., Khayitov I.A., Vildanov R.R. Effect of Ca co-doping on gamma-stimulated luminescence of $\text{Lu}_2\text{SiO}_5:\text{Ce}$ // Optical Materials. – Elsevier, 2024. – Vol.154. – id. 115699. (№1. Web of Science; IF=3,8).

II bo'lim (II часть; part II)

5. Исламов А.Х., Кудратов Х.Н., Ибрагимова Э.М. Эффекты гамма кванта на активаторное свечение в сцинтилляторных кристаллах $\text{Lu}_2\text{SiO}_5:\text{Ce}$ // IV International scientific forum “Nuclear Science and Technologies” September 26-30, 2022. – Almaty, Kazakhstan, 2022. – pp.144.

6. Islamov A.Kh, Kudratov Kh.N. The reason for the slow response of scintillation crystals $\text{Lu}_2\text{SiO}_5:\text{Ce}$ // The International Conference “Nuclear Medicine”, October 3-5, 2023. Bukhara. – Tashkent, 2023. – pp.30.

7. Исламов А.Х., Кудратов Х.Н. Эффекты быстрых нейтронов на центрах окраски и активаторное свечение в сцинтилляторных кристаллах $\text{Lu}_2\text{SiO}_5:\text{Ce}$ // Ядро физикаси институти ёш физиклари анжумани, 9-10 Октябр 2023. – Ташкент, 2023. – 86 б.

8. Исламов А.Х., Кудратов Х.Н. Механизмы передачи энергии электронных возбуждений в сцинтилляторных кристаллах $\text{Lu}_2\text{SiO}_5:\text{Ce}$, облученных в реакторе. // “Фундаментальные и прикладные проблемы современной физики”: Международная конференция 19-21 октября 2023. – Ташкент: Физико-технический институт НПО “Физика-Солнце” АН РУз, 2023. – С.54-55.

9. Исламов А.Х., Кудратов Х.Н. Влияние дополнительного легирования ионами Са на гамма-индуцированное свечение ионов Се в кристаллах Lu_2SiO_5 // Fizikada fundamental va amaliy tadqiqotlar: Xalqaro konferensiya, 24-25-may, 2024. – Toshkent: Ozbekiston Milliy universiteti, 2024. – 20-21 b.