

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

YADRO FIZIKASI INSTITUTI

BUZRIKOV SHOVKAT NAXALOVICH

**NEYTRON, GAMMA VA ELEKTRON NURLANISH TA'SIRIDA LiF VA
NaCl KRISTALLARIDA NANOTUZILISHLARNING QAYTA
O'ZGARISHI**

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**

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

Buzrikov Shovkat Naxalovich

Neytron, gamma va elektron nurlanish ta'sirida LiF va NaCl kristallarida
nanotuzilishlarning qayta o'zgarishi..... 3

Бузриков Шовкат Нахалович

Преобразование наноструктур в кристаллах LiF и NaCl при
нейтронном, гамма– и электронном облучении..... 23

Buzrikov Shovkat Naxalovich

Transformation of nanostructures in LiF and NaCl crystals under neutron,
gamma and electron irradiation..... 43

E'lon qilingan ishlar ro'yxati

Список опубликованных работ
List of published works..... 48

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

YADRO FIZIKASI INSTITUTI

BUZRIKOV SHOVKAT NAXALOVICH

**NEYTRON, GAMMA VA ELEKTRON NURLANISH TA'SIRIDA LiF VA
NaCl KRISTALLARIDA NANOTUZILISHLARNING QAYTA O'ZGARISHI**

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 № B2024.4.PhD/FM1197 raqami 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-sahifasi (www.inp.uz) va «Ziyonet» Axborot ta'lim portalida (www.ziyonet.uz) joylashtirilgan.

Ilmiy rahbar:

Ibragimova Elvira Memetovna
fizika-matematika fanlari doktori, professor

Rasmiy opponentlar:

Baxramov Sa'dulla Abdullayevich
fizika-matematika fanlari doktori, professor, akademik

Saidahmedov Kaxraman Xusanovich
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: 100174, 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, YaFI. Tel. (+99871) 289-31-19).

Dissertatsiya avtoreferati 2025 yil « » _____ kuni tarqatildi.
(2025 yil " " _____ dagi _____ raqamli reestr bayonnomasi)

M. Yu. Tashmetov

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

O.R. Tojiboev

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

S.B. Igamov

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

KIRISH (falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasining annotatsiyasi)

Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati. So‘nggi yillarda litiy turli birikmalarining yuqori haroratli superior o‘tkazuvchanligi (akkumulyatoridagi qattiq elektrolit) va yadro reaktorlarida issiqlik tashuvchanligi keng miqyosda qiziqish uyg‘otdi. Atom elektr stansiyalarida issiqlik neytronlarini qayd qilish uchun ${}^6\text{Li}$ qoplamali ionizatsion kameralar qo‘llaniladi. Termoyadroviy reaktor qoplamasida $d+t \rightarrow \alpha+n+17.6 \text{ MeV}$ sintezda tritiy yig‘ish uchun ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$ yadro reaksiyasidan termoyadro energetikasida foydalaniladi.

Jahon amaliyotida kub simmetriyadagi eng zich anionli va eng katta ta‘qiqlangan zonasi 14 eV bo‘lgan LiF kristallari optik asboblarda, lazer texnologiyasida, shuningdek, radiatsiya tibbiyotida to‘qimalarga ekvivalent dozimetrlar (termo-lyuminescent va termo-ekzo-emissiya) sifatida keng qo‘llaniladi. Li nanozarralari ularning optik xususiyatlariga sezilarli darajada ta‘sir qiladi. Yuqori gigroskopiklik va past nurlanish barqarorligi tufayli NaCl kristallari radiatsiya dozimetriyasida qo‘llanilmadi, ammo yaqin va o‘rta infraqizil (IQ) diapazonida juda yuqori shaffofligi tufayli ular zamonaviy Fyurje- IQ spektrometrlarining ajralmas optik elementlari bo‘lib qoldi. Na nanozarrachalar yopishqoq neft qazib olish uchun ishlatiladi. Na tuzlari yadroviy reaktorlarda stintillyator detektorlari va sovutish suvi sifatida va yuqori darajadagi yadroviy chiqindilarni yo‘q qilish uchun NaCl matritsasi sifatida keng qo‘llaniladi. Shu munosabat bilan yadro reaksiyalari va atom siljishlari natijasida gamma kvantlar va boshqa yadro zarralari tomonidan induksiya qilingan strukturaviy nuqsonlar va fazaviy o‘zgarishlarni o‘rganish dolzarbdir.

Respublikamizda yadro tibbiyoti, atom energetikasi, shuningdek, yadro va radiatsiya texnologiyalari, jumladan, ixcham elektr akkumulyatorlarini rivojlantirishga katta e‘tibor qaratilmoqda. 1970-yillardan boshlab O‘zR FA YaFI da dozaga chiziqli bog‘liqlik buzilgan yuqori dozalarda induksiyalangan intensiv yutilish spektrlari o‘rganib kelinmoqda. Biroq, nano o‘lchamdagi nuqsonlar bilan tarqalish hissasini standart optik spektrofotometrlar yordamida eksperimental ravishda ajratib bo‘lmadi. So‘nggi paytlarda O‘zbekistonda elektron va zondli mikroskopiya usullari paydo bo‘ldi, bu esa nanozarrachalar bilan LiF va NaCl kristallarining tuzilishi va xossalarning radiatsion modifikatsiyasini o‘rganish uchun yangi imkoniyatlar ochdi. Ushbu fundamental tadqiqot va ishlanmalar dolzarb va talabga ega bo‘lib, bu yangi O‘zbekistonni 2022–2026-yillarda rivojlantirish strategiyasida¹ o‘z ifodasini topgan.

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

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

hujjatlarda belgilangan maqsad va vazifalarni amalga oshirishga ushbu dissertatsiya tadqiqoti muayyan darajada xizmat qiladi.

Tadqiqotning respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo‘nalishlariga mosligi. Dissertatsiya tadqiqoti respublika fan va texnologiyalar rivojlantirishning II. “Energiya, energiya tejash va muqobil energiya manbalari” ustuvor yo‘nalishiga muvofiq olib borilgan.

Muammoning o‘rganilganlik darajasi. Bugungi kunga qadar dunyoning ko‘pgina mamlakatlaridagi olimlar, jumladan, germaniyalik (G.Mie, F.Seitz, K.Shvarts), amerikalik (G.Akerman, G.A.Smit, G.X.Xubbell, R.L.Fleysheer), yaponiyalik (Y.Akashi, Y.Yoneda), inglizlik (C.R.A.Katlow, L.V.Xobbs, D.A.Yang), fransiyalik (F.Beuneu, C.Toulemond), italiyalik (G.Baldacchini, A.Sorensen), gollandiyalik (H.V. den Hartog, A.V.Sugonyako, D.I.Vainshteyn), rossiyalik (V.V.Klimova, L.A.Lisitsina, V.M.Lisitsin, A.A.Turkin, Ye.F.Martinovich, L.I.Bryukvina, S.N.Sulyanov), estoniyalik (Ch.B.Lushchik, Ye.Kotomin), ukrainiyalik (V.G.Radchenko, V.I.Dubinko), belorusiyalik (F.F.Komarov), misrlik (S.M.Abdou, X.Moharam), qozog‘istonlik (A.Akilbekov, A.Dauletbekova), o‘zbekistonlik (akademik Sh.A.Vaxidov, akademik M.X.Ashurov, B.Kaipov, E.M.Ibragimova, I.Nuritdinov, M.A.Mussaeva) va boshqa mutaxassislar LiF va NaCl monokristallari turli nurlanishlar ta‘sirida yaratilgan strukturaviy nuqsonlar va optik markazlarni o‘rganish bo‘yicha katta hajmdagi ishlarni amalga oshirdilar.

LiF asosida radiobiologiya va yadro tibbiyotida ionlashtiruvchi nurlanishning vakuumli ultrabinafsha, to‘qimalarga ekvivalent termolyuminescent (TLD) va termoelektr emissiya (TEE) dozimetrlari, zaryadlangan zarralar, neytrino va issiq neytronlarning yuqori sezgir stintilyatsion detektorlari, shuningdek, faol va passiv muhitlarda ranglanish markazlari uchun pikosekundli lazer optik elementlar ishlab chiqilgan. Cd va Ca aralashmalari bilan birgalikda faollashtirilgan NaCl monokristallari radiatsiya terapiyasi va radiodiagnostikada klinik dozimetriya uchun yuqori sezgir TLDlar sifatida taklif etiladi. Optik o‘lchovlardan dozaga bog‘liqlik izlar modeli asosida tavsiflanadi. Nanotexnologiya sohasida diametri 1 μm gacha va uzunligi taxminan 1sm bo‘lgan, o‘ziga xos mustahkamlikka ega bo‘lgan tuz va oksidlarning olish usuli ishlab chiqilgan. Ishqoriy metallarning kolloidlarini olishning termokimyoviy va ionlashtiruvchi (rentgen, tezashtirilgan ionlar) usullari ham ma‘lum.

Ammo, metall nanozarrachalarni sintez qilish uchun gamma-nurlanish va yo‘naltirilgan elektron, ion yoki lazer nurlari kabi intensiv yuqori energiyali radiatsiyani qo‘llanilishi bo‘yicha ishlar kam. Reaktorda LiF ni neytronlar bilan nurlanishiga oid maqolalar garchi 1950-yillarda nurlangan kristalda amorf Li kolloidlari, hamda fluor va He ning gaz pufakchalari topilgan bo‘lsada kam uchraydi.

Yadro energetikasi va yadro texnologiyalarining yuqori aktivlikdagi chiqindilarini utilizatsiya qilishda qattiq qabrlarga joylashtirishda radionuklid nurlanish energiyasini yutishi natijasida yuzaga keladigan tabiiy tosh tuzi NaCl ning radiolizi paytida strukturaviy o‘zgarishlar katta ahamiyatga ega. Biroq, XRD usullari amorf va kristall kirishma fazalarini aniqlagan bo‘lsada, sirt holatlari va fazaviy o‘zgarishlar, shuningdek, kristall matritsadagi nanometall interfeyslarning xususiyatlari yetarlicha

o'rganilmagan. Li-birikmalarida ^3H qanday holatda to'planishi o'rganilmagan, bu uning ekstraksiyasiga ta'sir qiladi. Elektron-pozitron juftliklari va yadro reaksiyasi mahsulotlarining LiF va NaCl ning nurlanishidagi ta'siriga qo'shgan hissasi ilgari ko'rib chiqilmagan.

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-tadqiqotlar rejasining № FA-F2-F120 "Kichik o'lchamli yuqori haroratli o'ta-o'tkazgichlar, yarimo'tkazgichli geterostrukturalar, metall va ularning oksidlarining elektron xossalari va radiatsiyaviy takomillashtirilishi"; № OT F2-26 "Elektron dastasida funksional nanostrukturalarni shakllantirish mexanizmlari" (2017-2020), shuningdek, O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2019-yil 21-noyabrdagi PQ-4526-son qarori bilan tasdiqlangan O'zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Yadro fizikasi institutining 2020–2024-yillarga mo'ljallangan "Nurlanish ta'sirida shisha va kristall matritsalaridagi nano o'lchamdagi qo'shimchalarning sintezi va modifikatsiyasi" va "Yuqori energiyali elektron nurlar ostida nanostrukturali sirt qatlamini olish usulini ishlab chiqish" mavzusidagi ilmiy loyihalar doirasida bajarilgan.

Tadqiqotning maqsadi optik jihatdan toza LiF va NaCl kristallarida tezlashtirilgan elektronlarning impulsli nurlari, reaktorning aralash neytron va gamma oqimlari va radionuklidlarning nurlanishi ta'sirida nanotuzulishlarning o'zgarish mexanizmlarini o'rganishdan iborat.

Tadqiqotning vazifalari:

LiF va NaCl kristallarida nostexiometrik sirt qatlamining struktura nuqsonlaridan nanozarrachalar shakllanishini o'rganish uchun 10^5 - 10^9 R doza oralig'ida energiyasi 1.17 va 1.33 MeV va quvvati 100 ~ 1000 R/s bo'lgan 270 va 320 K haroratda ^{60}Co manbali γ -kvantlar; 10^{14} - 10^{16} el/sm² dozalarda 0.1÷3 mA tokli 5 MeV energiyali elektron nurlar; atom reaktorida 10^{15} - 10^{18} n/sm² flyuens oralig'ida 10^{14} n/sm²·s li neytronlar oqimi va 3700 Gr/s li γ -kvantlar va radionuklidlar bilan nurlantirishni amalga oshirish;

energiodispersiya spektrometriya bilan elektron mikroskopiya metodida nurlanmagan va nurlangan sirt osti qatlamning nostexiometriyasining o'sishlar va yoriqlar mikroprofili va lokal element tahlilini o'tkazish;

HighScore, FullProf dasturlari va PDF-2013 va 2019 ma'lumotlar bazalaridan foydalangan holda rentgen nurlari difraksiya spektrlari yordamida nurlanishdan oldin va keyin sirtga yaqin qatlamning tuzilishi va fazaviy tarkibini aniqlash; nanozarrachalarning o'lchamlarini Sherrer formulasi bo'yicha hisoblash;

namunaning qalinligiga, dozasi va nurlanish quvvatiga, nurlanishdan keyin 300 K dagi so'nish vaqtiga bog'liq kimyoviy bog'lanishlarning tebranish chastotalari bo'yicha infraqizil yutilish va qaytarish spektrlarini Omniks ma'lumotlar bazasi bo'yicha va kirishma fazalarni IK diapozonida aniqlash;

namuna qalinligiga (1-10 mm), tushayotgan nurlanish oqimlarining yo'nalishlariga nisbatan orientatsiyasiga, haroratga, dozaga va nurlanish kuchiga, 300 K da so'nish vaqtiga bog'liq nurlanishdan keyingi optik yutilish va aks ettirish

spektrlarida rang markazlarni va nanoqo'shimchalarning yorug'likni sochishini farqlash; Smakula, Mie va Radchenko formulalari bo'yicha yakka va juft rang markazlarining kontsentratsiyasini va markazlar orasidagi masofani, nanozarrachalarning o'lchamlarini hisoblash;

Tadqiqot ob'ekti sifatida detektor va lazer elementlar uchun mo'ljallangan Leningrad optik-mexanika assotsiatsiyasida (LOMO, Rossiya) ishlab chiqarilgan optik toza va sifatli LiF va LiF:OH namunalari, shuningdek standart IQ oynalar (diametri 35 mm, qalinligi 4 mm) ko'rinishidagi sof NaCl ion monokristallarda nanozarrachalar va nanostrukturalar olingan.

Tadqiqotning predmetini radiatsion nurlanishi ta'sirida 14 eV (LiF) va 8,95 eV (NaCl) ta'qiqlangan zonaga ega ion kristalli matritsaning chipli va optik sayqallangan yuzasida nanozarrachalar va nanostrukturalarning hosil bo'lishining radiatsion mexanizmlari, shuningdek optik xususiyatlarning mikro va nano miqyosdagi tuzilishi va tarkibiga bog'liqligi tashkil etadi.

Tadqiqotning usullari: lokal element tarkibning rentgen energiya-dispersion tahlili; struktura va fazaviy tarkibning rentgen-difraksion tahlili; skanerlovchi elektron va zondli mikroskopiyasi, optik va IQ nurlanish spektroskopiyasi. Nanozarrachalarning o'lchamlari Mie va Sherrer formulalari yordamida optik sochilish va rentgen nurlari difraksiya spektrlaridan hisoblab chiqilgan.

Dissertatsiya tadqiqotining ilmiy yangiligi quyidagilardan iborat:

birinchi marta 5 MeV energiyali elektronlar va reaktorda n va γ nurlari bilan nurlangan LiF kristallarining sirt qatlamida, 1-5 mkm o'lchamdagi kvadrat yoriqlar va nano-orollar ko'rinishidagi kirishma fazalarining hosil bo'lishi topilgan; ularning soni va o'lchamlarining zarracha energiyasi, flyuens va nurlanish haroratiga bog'liqliklari aniqlangan;

birinchi marta reaktorda $5 \cdot 10^{15}$ dan $5 \cdot 10^{17}$ n/sm² gacha bo'lgan flyuenslar bilan nurlantirilganda LiF kristalida tritiy hosil bo'lishi (beta izotopi ³H₁) va LiH→LiT strukturaviy-fazali o'zgarish natijasida uning kubik panjara doimiysi 0.07 nmga zichlashishi va LiH fazasi nanozarralari hajmining pasayishi aniqlangan;

ilk bor LiF va NaCl ning optik spektrlarida $7 \cdot 10^5$ R dan yuqori gamma-dozalarda ajratilgan F -markazning ma'lum bandi o'rnida bo'lingan dublet paydo bo'lishi topilgan hamda LiF va NaCl uchun F - F markazlarining o'zaro ta'siri, optik rezonansning tarqalishi va noxiziqli effektlar uchun javobgar bo'lgan LiH va NaH nanozarrachalari va ularning F_n agregatlarining shakllanishi boshlanadigan chegaraviy masofalari mos ravishda 14,5 nm va 20 nm ekanligi aniqlangan;

birinchi marta Cl yetishmasligi va NaClO₃ nanofazasining shakllanishi bilan NaCl yuzasining dastlabki nostexiometriyasi aniqlangan: gamma va elektron nurlanish natijasida ularning o'sishi, Cl vakansiya agregatlari o'rnida NaH ning metall nanofazalari ip, bo'rtma, chuqurchalar ko'rinishida hosil bo'lishiga va F markazlarining intensiv yutilish zonasi atrofida kuchli salbiy dispersiyani keltirib chiqarishiga olib keladi;

ion kristallarda neytron, elektron va gamma nurlanish ta'sirida boshlanadigan yadroviy hamda struktura-faza o'zgarishlari bilan bog'liq radiatsiyaviy-indusirlangan nanozarrachalar va nanotuzilmalar hosil bo'lish mexanizmi aniqlangan.

Tadqiqotning amaliy natijalari quyidagilardan iborat:

XRD, SEM-EDS va FTIR usullari reaktoring aralash neytron va γ - oqimlarining ta'sirida yengil element birikmalarida yadro reaksiyalari mahsulotlarini va ular bilan bog'liq bo'lgan strukturaviy-fazali o'zgarishlarni aniqlash uchun ishlatilishi samarali ekanligi ko'rsatilgan;

litiy gidridlari nanofazalari va β -radioizotop ${}^3_1\text{H}$ hosil bo'lishi bilan LiF ning uzoq muddatli beta- emissiyasining olingan natijalari termoyadro reaksiyalari uchun yoqilg'i sifatida tritiyni ajratib olishda yo'qotishlarni baholashda foydalanish mumkinligi aniqlangan;

olingan natijalar va tadqiqot usullaridan NaH hosil bo'lishi va strukturaviy o'zgarishlarini hisobga olgan holda NaCl matritsada yuqori aktivli chiqindi omborlarida uzoq muddatli nurlanishlar dozimetriyasida qo'llanilishi mumkinligi aniqlangan;

LiF-OH ning 273 K da intensiv gamma nurlanishi natijasida olingan nanostrukturali kompozit passiv nano-pikosoniyali lazer modulyatorning barqaror chiziqli bo'lmagan funksiyasiga ega bo'lishi aniqlangan.

Tadqiqot natijalarining ishonchliligi bir-birini to'ldiradigan va o'zaro qarama-qarshiliklarsiz sifat va miqdoriy natijalarni tasdiqlovchi, yadro nurlanishining qattiq jismlar bilan o'zaro ta'siri mexanizmlari asosida ma'lumotlarning izchilligini va ularni izohlashni ta'minlovchi zamonaviy spektral tahlil usullari majmuasidan foydalanish bilan tavsiflanadi.

Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati. Tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati shundaki, nuqtaviy nuqsonlardan barqaror LiH va NaH nanostrukturalarining radiatsiya hosil bo'lish mexanizmini va ularning LiF va NaCl kristallarining optik reaksiyasiga ta'sirini eksperimental isbotlashdir. Radiometriya, rentgen nurlari difraksiyasi va kichik burchakli sochilishning optik yutilish/aks ettirish usullari bilan nanozarrachalarni identifikatsiyalash va o'lchamini baholash imkonini beradi, bu eksperimental nanofizika, radiatsiya materiallarishunosligi va yadro texnologiyalari uchun dolzarbdir. Nuqtaviy nuqsonlar va ularning agregatlari ulushi 10^{17} sm^{-3} dan oshmaydi, nanofazalar esa atom zichligi $>10^{21} \text{ sm}^{-3}$ bo'lgan butun sirtni qoplaydi va mikron yaqin sirt qatlamida nanofazalar yadro nurlanishining deyarli barcha yutilgan energiyasi ularning shakllanishiga sarflanadi.

Tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati shundan iboratki, 1,022 MeV dan yuqori energiyali qattiq ionlashtiruvchi γ nurlanish ta'sirida dielektrikning sirtga yaqin qatlamidagi nanostrukturallarning radiatsiyaviy o'zgarishi va 5 MeV energiyali tezashtirilgan elektronlar bo'yicha olingan eksperimental natijalar yadro energiyasi va noxiziqli optika uchun funksional nanostrukturali materiallarni yaratish uchun radiatsiya texnologiyalarida amaliy qo'llash potensialiga ega.

LiH va NaH elektr o'tkazuvchan nanostrukturali LiF va NaCl dielektriklarning nurlantirilgan nostexiometrik yuzasi elektr energiyasini to'plash/saqlash qurilmalari, atom energetikasining radioaktiv chiqindilarni yo'q qilish, shuningdek, radioaktiv qoldiqning nurlanish energiyasini elektr tokiga aylantirish tizimlarida amaliy qo'llash imkoniyati ega.

Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi. Aralash neytronlar oqimi, γ -kvant va elektron nurlanish ta'sirida LiF va NaCl kristallarida nanostrukturalarning o'zgarishi bo'yicha olingan natijalar asosida:

elektronlar, reaktorda n va γ -nurlanish oqimlari bilan nurlangan LiF kristallarining sirtga yaqin qatlamida nanoorollar shaklidagi kvadrat izlar va kirishma fazalarini aniqlash natijalari; reaktorda LiF ni nurlantirishda kubik panjara parametrlarini va LiH fazali nanozarrachalar hajmini kamaytirish; ajratilgan F -markazining ma'lum bandi o'rnida $7 \cdot 10^5$ R dan yuqori γ -dozalarda LiF va NaCl ning optik spektrlarida dublet bo'linish; F - F markazlarining o'zaro ta'siri ularning F_n agregatlari va LiH va NaH nanozarralari hosil bo'lishi bilan boshlanadigan aniqlangan maksimal masofalar; Cl tanqisligi bilan NaCl yuzasining dastlabki stixiometriyasi va NaClO₃ nanofazasining shakllanishi, uning o'sishi gamma va elektron nurlanish ostida iplar, bo'rtmalar, izlar shaklida metall NaH nanofazalari hosil bo'lishiga olib kelishi Rossiya Federatsiyasining "Perm milliy tadqiqot politexnika universiteti" Federal davlat avtonom oliy ta'lim muassasasida MIG-41 "Turli gaz muhitlarida gamma nurlarining konsentrlangan oqimlari bilan ishlov berishdan foydalangan holda funksional kompozit va polimer materiallarni yaratish modellari, usullari va raqamli texnologiyalari" (2021-2023) xalqaro loyihasi doirasida qo'llanilgan (Rossiya Federatsiyasi Perm milliy tadqiqot politexnika universiteti 2024-yil 15-noyabrdagi № 1167/UNI-sonli xati). Ilmiy natijalardan foydalanish yengil yadrolardagi ehtimoliy yadro reaksiyalarini aniqlash va modifikatsiyalangan polimer kompozitlarining mexanik deformatsiyalariga olib keladigan strukturaviy o'zgarishlar mexanizmini tushuntirish imkonini bergan;

neytron- γ -nurlanishdan so'ng ⁶Li ning α -yemirilishi natijasida LiF ning panjarali siqilish bilan LiH→LiT strukturaviy-fazali o'tishi O'zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi U.A. Arifov nomidagi Ion plazmasi va lazer texnologiyalari institutida "Dielektrik va ferroelektrik kristallarda nochizikli hodisalar, fazaviy o'tishlar va elastik, fotoelastik va superion xossalarning anizotropiyasi" (01.01.2021–31.12.2021), fundamental loyihasi doirasida foydalanilgan (O'zbekiston Respublikasi Fanlar Akademiyasining 2022 yil 26 dekabrdagi № 2/1255-3270-sonli xati). Ilmiy natijalardan foydalanish kubik litiy ftorid kristallarining asosiy kristallografik tekisliklari va yuzalarida ixtiyoriy yo'nalish bo'yicha samarali Gryunayzen konstantalarini aniqlash imkonini bergan.

Tadqiqot natijalarining aprobatsiyasi. Dissertatsiya ishining asosiy natijalari 12 ta xalqaro va respublika ilmiy-amaliy konferensiyalarida ma'ruza va muhokama qilingan.

Tadqiqot natijalarining e'lon qilinganligi. Dissertatsiya mavzusi bo'yicha jami 17 ta ilmiy ish, jumladan, Oliy attestatsiya komissiyasi tomonidan doktorlik dissertatsiyalari asosiy ilmiy natijalarini chop etish uchun tavsiya etilgan ilmiy nashrlarda 5 ta ilmiy maqola, shulardan 2 tasi xalqaro jurnallarda nashr etilgan.

Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi. Dissertatsiya kirish, to'rtta bob, xulosa, foydalanilgan adabiyotlar ro'yxatidan iborat. Dissertatsiyaning hajmi 110 betni tashkil etadi.

DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

Kirish qismida tadqiqotning dolzarbligi va zarurati asoslanadi, o'rganish bilan respublika fan va texnikasi rivojlanishining asosiy ustuvor yo'nalishlari o'rtasidagi bog'liqlik ko'rsatilgan, LiF va NaCl ning past nurlanish barqarorligi muammosini yetarli darajada o'rganilmaganligi qayd etilgan, muammoni bilish darajasi muhokama qilingan, maqsad va vazifalar shakllantirilgan, tanlangan ob'ektlar, tadqiqot predmetini belgilaydi va tadqiqot usullarini tavsiflaydi, ilmiy yangilikni yoritadi, olingan natijalarning ishonchligini asoslaydi, tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati qayd etiladi, ishning aprotatsiyasi haqida qisqacha ma'lumot, hajmi va dissertatsiyaning tuzilishi keltirilgan.

Dissertatsiyaning **“LiF va NaCl kristallari strukturasiidagi o'sish va radiatsiya nuqsonlari bo'yicha adabiyotlar sharhi”** deb nomlangan birinchi bobida nanozarralar va nanostrukturalarning eksperimental va nazariy tadqiqotlari bo'yicha adabiyot ma'lumotlari, xususan, nurlanish ostida yoki turli muhitlarda Li va Na nanozarrachalarni olishga bag'ishlangan ishlar keltirilgan. Shu paytgacha radiatsiya ta'siridan kelib chiqqan nuqta nuqsonlari bir xil hajmda yoki zarrachalar nurining yo'nalishi bo'yicha ma'lum bir kontsentratsiya gradienti bilan taqsimlanadi, bu tarqalish paytida energiyani bir xilda yo'qotadi deb taxmin qilingan. Muayyan nurlanish sharoitida KCl da uzoq muddatli elektron markazlar va LiF da yadro reaksiyalari mahsulotlari (^4He , ^3H) aniqlandi. RSA usuli ko'rsatdiki, LiF va NaCl da nanokristal fazalar (Li, Na) hosil bo'lishi bilan radiatsiya ta'sirida fazaviy o'tishlar sodir bo'ladi, lekin ular kimyoviy jihatdan agressivdir, shuning uchun tizimsiz va yetarli darajada batafsil o'rganilmagan.

Dissertatsiyaning **“Tadqiqotning ob'ektlari va eksperimental usullari”** deb nomlangan ikkinchi bobida optik toza LiF va NaCl kristallarini yetishtirish, ularning tuzilishi va optik xossalarini o'lchash va tahlil qilish usullari yoritilgan. LiF va NaCl kristallarining namunalari yadro nurlanish ta'sirini o'rganish uchun Davlat optika instituti (St.Peterburg) tomonidan taqdim etilgan. Tajribalarda ^{60}Co manbali silindrsimon geometriyali γ –nurlanish (o'rtacha energiya $\sim 1,25$ MeV), VVR-SM reaktorining faol zonasida aralash neytronlar va gamma, 5 MeV energiyaga ega elektron nurlanishlardan foydalanilgan.

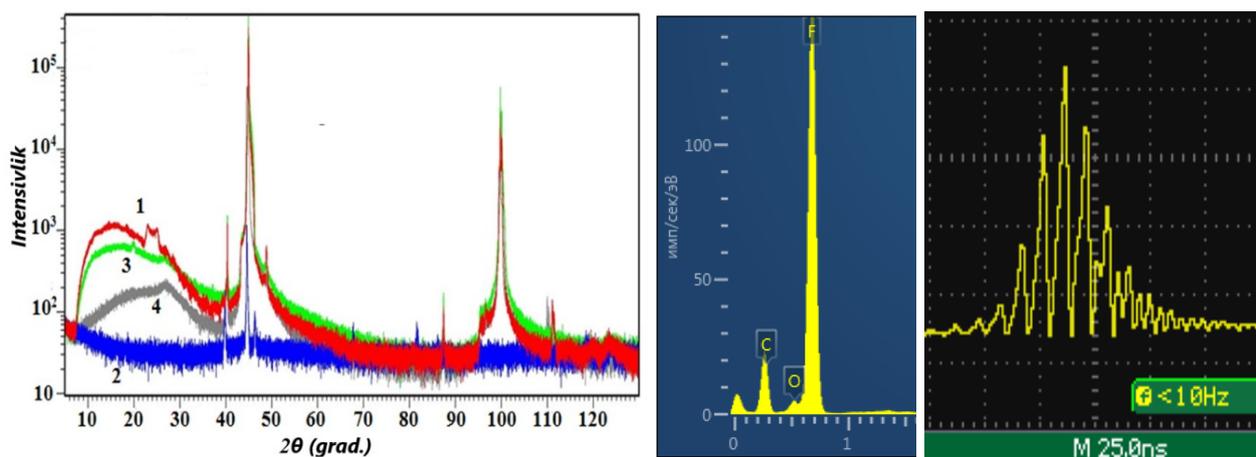
Sirtga sezgir va hajmli tahlil usullari majmuasi qo'llanildi: sirt yuzasiga yaqin mikro va nanostrukturalarning mahalliy element tarkibi skanerlovchi elektron mikroskopi (SEM) EVO MA10 (Zeiss) da 2–20 mkm shkalada EDS Aztek energiya-dispersiv tizimi (Oxford Instrum) bilan aniqlandi (xatolik $\pm 0,2\%$); namunalarning tuzilishi va fazaviy tarkibi, shuningdek, nanozarrachalarning o'lchamlari, tuzilishi va yo'nalishi 5-140⁰ da o'rnatish yordamida rentgen nurlari difraksiyasi Empyrean (PANalytical) difraktometrida o'rganildi. Ni-filtrli va Cu-katodli tezkor X-trubkasi bilan; Optik yutilish va aks ettirish spektrlari UV 3600 (Shimadzu) va SF-56 (LOMO) spektrofotometrlarida 190-1100 nm to'lqin uzunligi diapazonida 6 nm yoriq kengligi va 5 gacha optik zichlik bilan qayd etilgan va IQ o'tkazish/yutilish spektrlari/aks ettirishlar iS50 Nicolet (Thermoscience) spektrometrida 4000–400 sm^{-1}

to‘lqin soni oralig‘ida, sirt morfologiyasi SPM–9700 HT (Shimadzu) skanerlash zond mikroskopida amalga oshirilgan.

Dissertatsiyaning “Nurlanish ostida LiF kristallaridagi nanostrukturalarning hosil bo‘lish va o‘zgarish mexanizmlari” deb nomlangan uchinchi bobda kristall tuzilishi, kristall sirt morfologiyasi, faza va element tarkibi, optik va IQ diapazonlarida yutilish va aks ettirish spektrlari, reaktorning aralash neytron va gamma, elektronlar va gamma nurlanishdan oldin va keyin o‘rganish natijalari bayon etilgan.

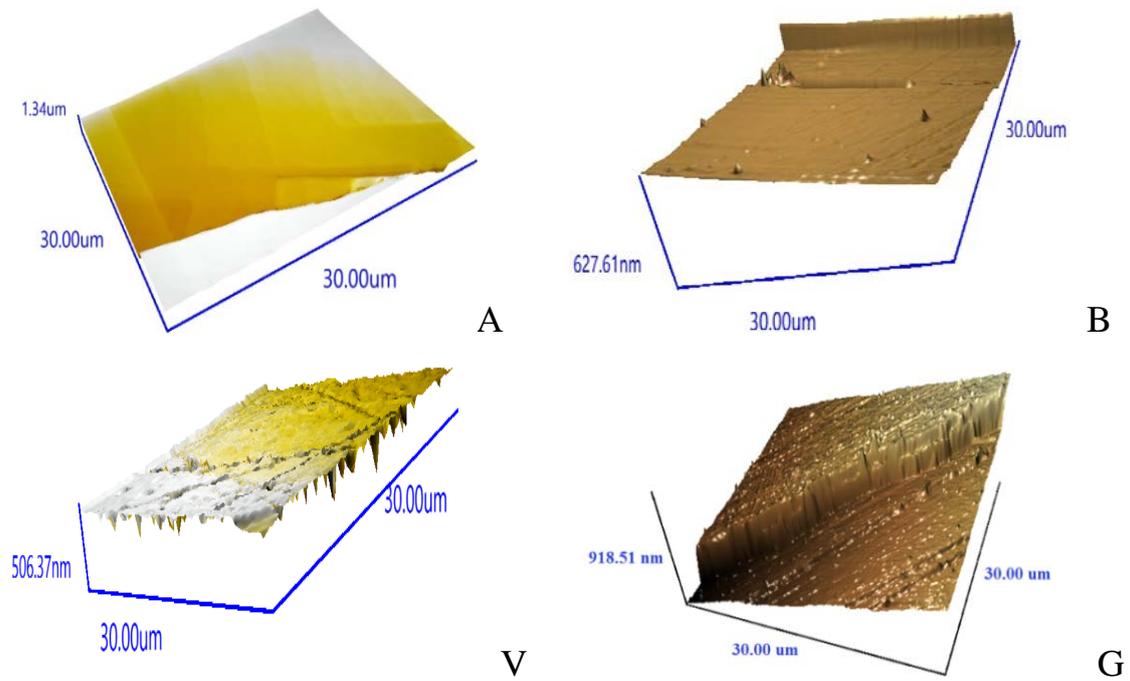
1-rasmda (o‘ngda) passiv pikosekundli lazer o‘tkazgichning optik chiziqli bo‘lmagan funksiyasini olish uchun optimal sharoitlarda (273 K da 10^8 R) nurlangan LiF:OH kristalining tashqi va ichki yuzalarning XRD spektrlari (chapda) ko‘rsatilgan, impuls 25 ns→pichki 20 ps.

Gamma nurlanish amorf nanofazalarda kichik burchakli ($15-20^\circ 2\theta$) sochilishni kamaytiradi va sirt qatlamida zichroq kristall faza hosil qiladi, uning aks etishi kattaroq burchaklarga siljiydi. LiF gamma nurlanishidan oldin va keyin sezilarli millimetr miqyosli har xillik aniqlandi, bu $\sim 2-3$ mm gacha bo‘lgan hisoblangan kirib borish chuqurligiga yaqin. EDS spektri Li K-chizig‘ini ajratmaydi, shuning uchun LiF ning nostoixiometriyasi va nurlanish mahsulotlarining tarkibi C va O to‘liq aniqlanmagan.



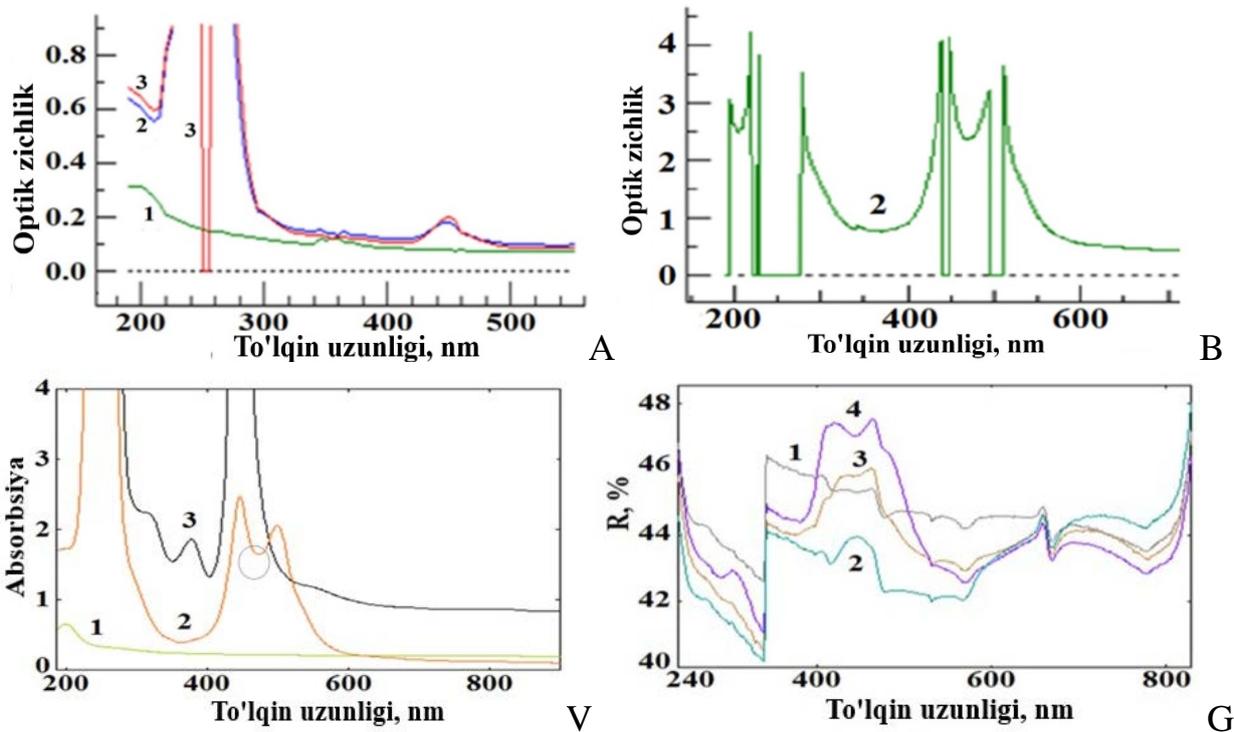
1-rasm. Chapda - LiF:OH kristalining nurlanmagan (1, 2) va ^{60}Co γ -nurlanishdan keyin 100 MR gacha 273 K (3, 4), tashqi (2, 4) va ichki (1, 3) kesilgan va kesilmagan yuzalarning rentgenogrammasi. Markazda – EDS spektri (3). O‘ngda-gamma nurlanishdan keyin LiF lazerli o‘tkazgichning osillogrammasi

2-rasmda zondni kontaktsiz skanerlashda turli harorat va dozalarda γ -nurlangan sirtning nanoprofilini ko‘rsatilgan. Silliq, nurlanmagan sirt (A) to‘g‘ridan-to‘g‘ri yoriqli qadamlarga ega. 273 K da 10^8 R doza nurlanishdan so‘ng (diffuziya qiyin), balandligi ~ 60 nm bo‘lgan, ~ 15 mkm bilan ajratilgan bir nechta nanokonuslar ko‘rinadi va chiziqli nuqsonda (yoriq) bir qancha nanokonuslar (B), lekin 320 K da (diffuziya samarali), konussimon chuqurliklar 0.5 mkm gacha hosil bo‘ladi. 320 K (havo) da 10^9 R doza bilan nurlanishdan so‘ng nanokristallitlarning zich tarmog‘i hosil bo‘ldi. Optik tadqiqotlarda hal qilinmagan muammo $F-F$ va $M-M$ markazlarining juftlashgan



2-rasm. LiF:OH sirtining nurlanmagan (A), ^{60}Co γ -nurlangan 10^8 R dozasi bilan 273 K (B) va 320 K (V) da 10^8 R, 320 K (G) da nanoprofilini

o'zaro ta'siri boshlanadigan aniq dozani olishdir, bu juda kichik dozani oshirish bosqichi bilan nurlanish orqali hal qilindi. 3-rasmda turli asboblarda olingan yutilish va aks ettirish spektrlari ko'rsatilgan.



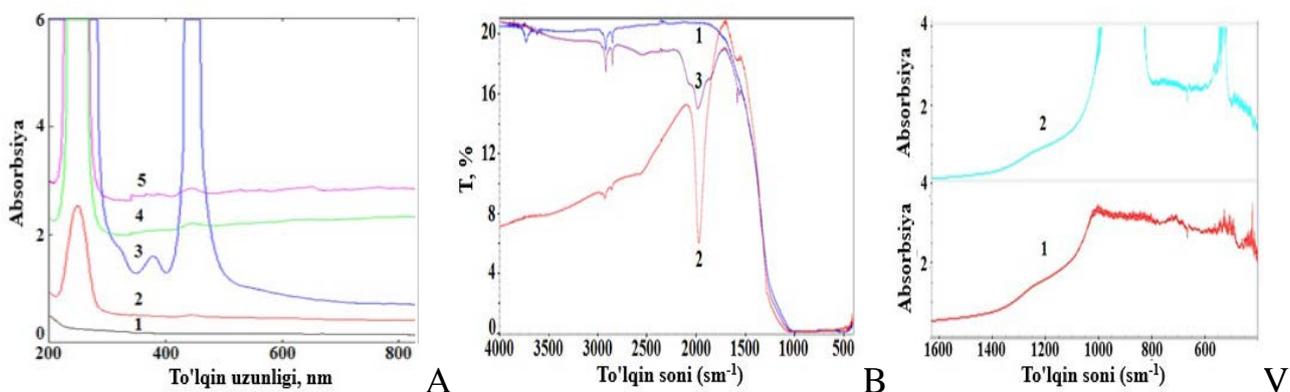
3-rasm. LiF:OH (2 mm) ning yutilish spektrlari: 1-nurlanmagan, 2,3 - $6 \cdot 10^5$ va $7 \cdot 10^5$ R dozali γ nurlanishdan keyin (A); 273 K da 10^8 R (B); 273 K (2) va 350 K (3) (V); va aks ettirish (G)-nurlanmagan (1), 10^8 R da 273 K (2), 320 K (3) va 350 K (4)

3-rasmdagi spektrlar (nurlanmagan namuna 1) 200 va 260 nm va 340-380 nm da hal qilinmagan chiziqlarga ega bo'lib, ular kirishma nanofazalari bilan bog'liq bo'lib, tushayotgan nurni yutish yoki aks ettirish o'rniga tarqaladi.

$6 \cdot 10^5$ R doza γ -nurlanishdan so'ng 250 nm dagi F -markazning yutilish zonasi to'yingan bo'ladi va $7 \cdot 10^5$ R dozada u bo'linadi, eng yaqin F -markazlari o'zaro ta'sir boshlanishi masofasiga yaqinlashganda, optik markazlarning konsentratsiyasidan $\sim 14,5$ nm deb baholanadi va $F-F$ dipol hosil qiladi (3-spektr, 3A-rasmga qarang).

Shu nuqtada, 450 nm da molekulyar M yoki (F_2) ga tegishli zaif tarmoq paydo bo'ladi, u $< 10^8$ R dozada to'yingandan so'ng ~ 22 nm masofada 440 va 500 nm bo'lingan dublet (3B, 2B, 3B, 3G, 4G spektrlari) bilan $M-M$ dipolini hosil qiladi. 273 K (2B, C) da 10^8 R dozada nurlanish R -markazlari (320 va 380 nm) va Li nanokolloidlari (550 nm) va axromatik sochilishning > 600 nm (340 K) da hosil bo'lishining oldini olishga imkon berdi. Doimiy masofasi 22 nm bo'lgan molekulyar $M-M$ markazlarining tartiblangan zich panjarasi hosil bo'lib, YAG:Nd³⁺ lazerining passiv pikosekundli LiF modulyatorining chiziqli bo'lmagan funksiyasini ta'minlaydi (o'ngdagi 1-rasmga qarang).

4-rasmda neytronlar va ⁶⁰Co gamma kvantlar bilan nurlangan LiF:OH ning ultrabinafsha nurda ko'rinadigan yutilish+tarqalishi va IQ o'tkazish va yutilish spektrlari ko'rsatilgan. LiF eng keng zonali dielektrik bo'lganligi sababli, har qanday kirishma nanofazasi torroq tarmoqli oralig'iga va boshqa bog'lanish energiyasiga ega bo'ladi. 3V va 4A-rasmdagi spektrlarni (3) taqqoslash shuni ko'rsatadiki, γ -doza 10^8 R va tez neytron oqimi 10^{16} sm⁻² bir xil tor zonali nanofazalar natijani beradi.

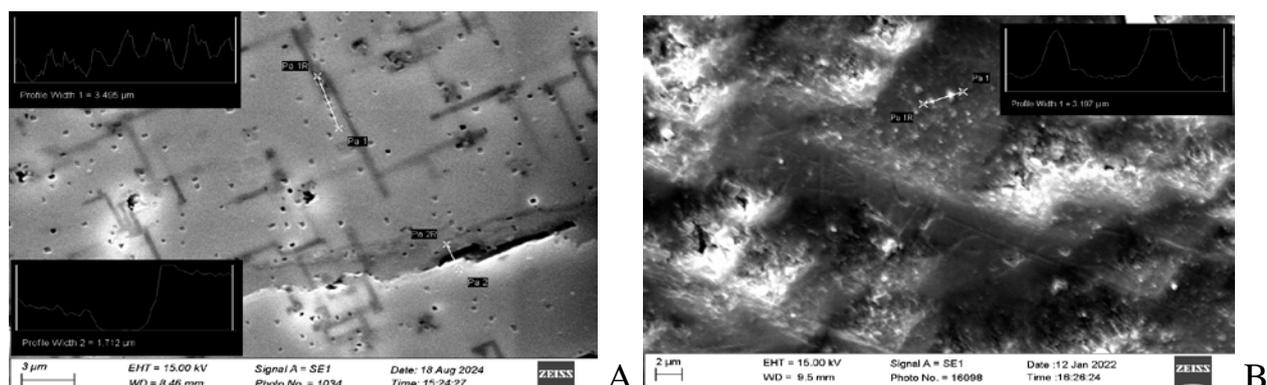


4-rasm. LiF:OH spektrlari 1– nurlanmagan; A) 2-5 neytron oqimining $5 \cdot 10^{15}$ dan $5 \cdot 10^{17}$ sm⁻² gacha ortishi bilan yutilish+sochilish, B) IQ o'tkazuvchanligi, 2 – namuna 10^9 R gamma nurlanish, 3 – namuna 10^{17} sm⁻² neytron oqimi V) IQ- nurlanish

Nurlanmagan namunada (4B-rasm) $3750-3650$ sm⁻¹ da zaif chiziqlar monomerik OH -guruhlariga, $2800-2900$ sm⁻¹ da zaif dublet, 1200 va 500 sm⁻¹ LiH ga va 1000 sm⁻¹ dagi Li-F cho'zilgan tebranishlarning asosiy bandiga tegishli. $\gamma - 10^9$ R ta'siridan so'ng, juda keng tarqalish hududi Li₂O nanofazasi tomonidan tarqaladigan hudud paydo bo'ladi.

5-rasm to'xtatilgan reaktorining gamma spektri va 5 MeV energiyali elektron nurlari bilan nurlangan sirtini ko'rsatadi. Ko'rinib turibdiki, kuchli nurlanish LiF

strukturasi kubik LiT nanokristallariga radiatsion-termik qayta kristallanishiga olib keladi.



5-rasm. To'xtatilgan reaktorda (A) gamma oqimi bilan 120 soatlik va elektron oqimi 10^{16} el/sm² dan keyin (B) LiF sirtining SEM mikroprofili. O'qlar va qo'shimchalar izlar va kristall fazalarning nano-profillarini ko'rsatadi

Nurlanishdan oldin F tanqisligi tufayli LiF yuzasida nanofaza hosil bo'ladi (diametri 42 nm bo'lgan LiOH qobig'ida diametri 8 nm bo'lgan metall Li), 200 nm zaif tarqalish zonasi uchun javobgardir (3-rasm 1-spektrlar). 1-jadvaldan ko'rinib turibdiki, tez neytronlarning past oqimli nurlanishidan so'ng litiy gidrid nanofazasi, yuqori oqim bilan esa zichroq kristall panjaraga ega bo'lgan litiy tritidi hosil bo'ladi.

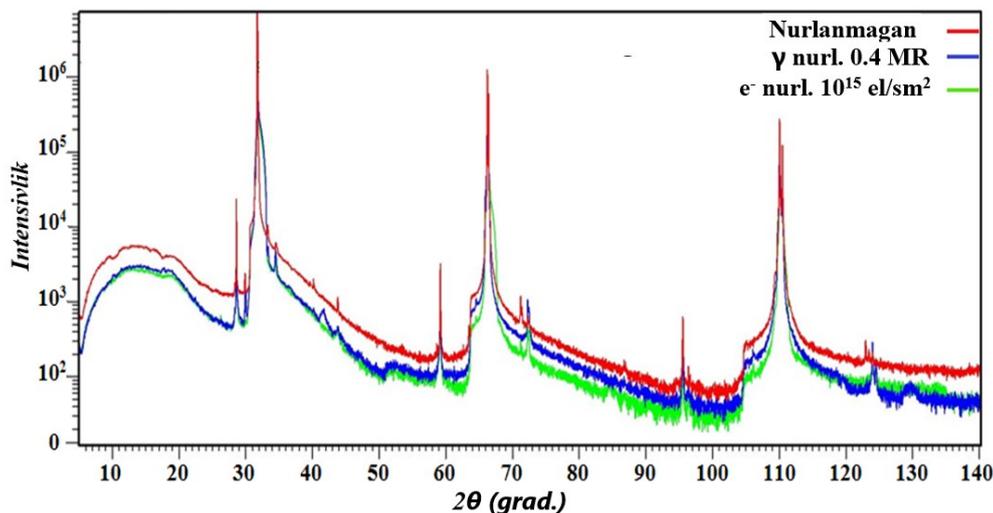
1-jadval

Reaktor faol zonasida nurlantirilgan LiF:OH kristallarining strukturasi

Faza	Fazoviy guruh	Singo niya	Panjara doimiysi, Å			O'lcham D, nm	Refleks 2θ _B grad
			a	b	c		
Nurlanmagan namuna							
LiF	Fm-3m	Kub	4.0270	4.0270	4.0270	104	44.91
Li	Im-3m	Romb	3.2850	3.2850	3.2850	8	48.9
LiOH	P4/nmm	Tetra-gon	3.5560	3.5560	4.3430	42	99.78
5·10 ¹⁵ n/sm ² dozada tez neytronlar bilan 17 minut davomida nurlantirilgan							
LiF	Fm-3m	Kub	4.0270	4.0270	4.0270	140	44.91
LiH gidrid	Fm-3m	Kub	4.0832	4.0832	4.0832	93	40.37
						134	100.09
5·10 ¹⁷ n/sm ² flyuens tez neytronlar bilan 28 soat 20 minut davomida nurlantirilgan							
LiF	Fm-3m	Kub	4.0500	4.0500	4.0500	151	44.61
LiT tridid	Fm-3m	Kub	4.0150	4.0150	4.0150	32	38.46
						117	99.51

Dissertatsiyaning “Nurlanishda NaCl kristallaridagi nanostrukturalarning hosil bo‘lish va o‘zgarishi mexanizmlari” deb nomlangan to‘rtinchi bobida yuqoridagi kristallarning kristall tuzilishi, OYU spektrlari, sirt morfologiyasini ionlashtiruvchi nurlanish bilan nurlanishdan oldin va keyin o‘rganish natijalari yoritilgan.

6-rasmda nurlanishdan oldin va ^{60}Co γ -nurlari va 5 MeV energiyali elektronlar bilan nurlantirishdan keyingi rentgen difraksiya spektrlari ko‘rsatilgan.



6-rasm. NaCl kristalining nurlanishdan oldin va 300 K da $4 \cdot 10^5$ R doza γ -nurlanish, shuningdek 400 nA tokda 10^{15} el/sm² elektron nurlanishdan keyin to‘liq rentgen nurlanish spektrlari

Spektrlar shuni ko‘rsatadiki, har bir yuqori intensivlikdagi (h00) matritsaning aks etishi rentgen nurlari va zaif bog‘langan valentlik elektronlari o‘rtasidagi o‘zaro ta’sir tufayli nokogerent Kompton sochilishi bilan birga keladi, bu Na va Cl kabi yorug‘lik elementlari holatida muhim ta’sirdir. $2\theta_B = 29.5^\circ$ da zaif aks ettirish (110) Na nanozarrachalariga tegishlidir.

Nurlanishdan keyin spektrning tizimli ravishda kichik burchaklar tomon siljishi kuzatiladi, ularning amplitudasining kamayishi va amplitudaning yarmi darajasida kengayishi o‘nlab natriy atomlarining tekis nanokolloid hosil bo‘lishi bilan xlorning sirtidan qo‘shimcha yo‘qolishi natijasida fazaviy o‘tishlar bilan bog‘liq.

2-jadvalda nurlanishdan oldin, gamma va elektron nurlanishdan keyin NaCl kristallarining strukturaviy parametrlari, fazaviy tarkibi (%), shuningdek nanofazalarning hisoblangan o‘lchamlari keltirilgan.

NaCl kristali sirtga yaqin qatlamining fazaviy tarkibi, hatto quruq idishda saqlangan bo‘lsa ham, 87% oksid fazalarini va faqat 1% Na va 4% Cl₂ ni o‘z ichiga oladi. Bu natija Belgiyalik Den Hartog guruhi ma’lumotlaridan juda farq qiladi. Bundan tashqari, γ -nurlanishning minimal dozasi dan keyingi tarkib - NaCl ning 50% ga kamayishi va kislorod o‘z ichiga olgan fazalarning qisqarishi ham kutilmagan bo‘ldi.

Nurlanmagan, gamma va elektron nurlanishdan keyin NaCl ning faza tarkibi (%)

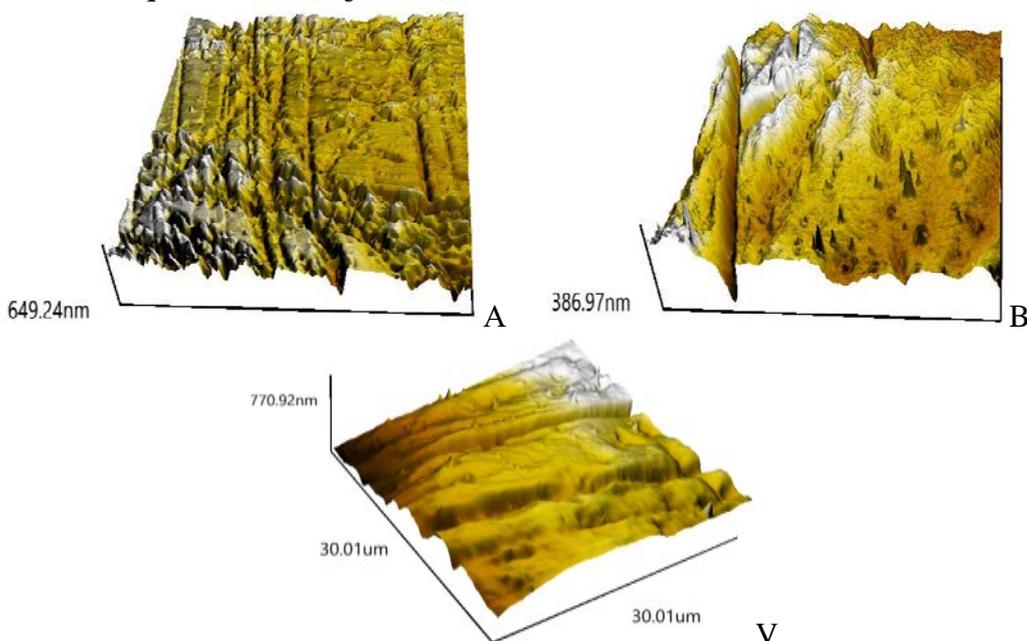
Faza, miqdori %	Fazoviy guruh	Singoniya	Panjara doimiysi, Å			O'lam	Refleks
			<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	D, nm	$2\theta_B$, gr.
Nurlanmagan							
Na- 1	Im-3m	Kub	4.221	4.221	4.221	28	29.82
NaCl - 6	Fm-3m	Kub	5.453	5.453	5.453	31	28.65
						101	31,18
NaClO ₃ - 47	P213	Kub	6.340	6.340	6.340	66	66.32
Na ₂ O - 40	Fm-3m	Kub	5.560	5.560	5.560	95	110.12
⁶⁰ Co gamma kvantlar bilan $4 \cdot 10^5$ R dozada nurlantirilgan							
NaCl - 46	Fm-3m	Kub	5.640	5.640	5.640	71	27.32
						43	31.17
NaH - 8	Fm-3m	Kub	4.890	4.890	4.890	75	45.44
Na ₂ O - 18	Fm-3m	Kub	5.550	5.550	5.550	86	110.02
NaClO ₃ - 5	P213	Kub	6.340	6.340	6.340	28	66.29
NaOH - 22	Bmmb	Ortorombik	3.399	3.399	11.377	32	56.14
10^{15} el/sm ² dozada 5 MeV energiyali elektronlar bilan nurlantirilgan							
NaCl - 2	Fm-3m	Kub	5.707	5.707	5.707	213	28.61
						188	31.72
NaH - 27	Fm-3m	Kub	4.880	4.880	4.880	126	45.45
NaClO ₃ - 67	P213	Kub	6.570	6.570	6.570	166	66.24
NaOH - 4	Fm-3m	Kub	5.100	5.100	5.100	97	56.14

Keyingi nurlanish xlor yetishmaydigan faza va NaH nanokolloidlarning hosil bo'lishiga olib keladi, bu sirtning element tarkibini EDS spektral tahlili bilan yaxshi tasdiqlangan, garchi vodorod bu usul bilan aniqlanmasa ham (3-jadval).

Sof NaCl kristalining sirtga yaqin qatlamining mahalliy element tarkibi (og'%) nurlanishdan oldin va gamma nurlanishdan keyin ko'rsatilgan dozalarda qiymatlari

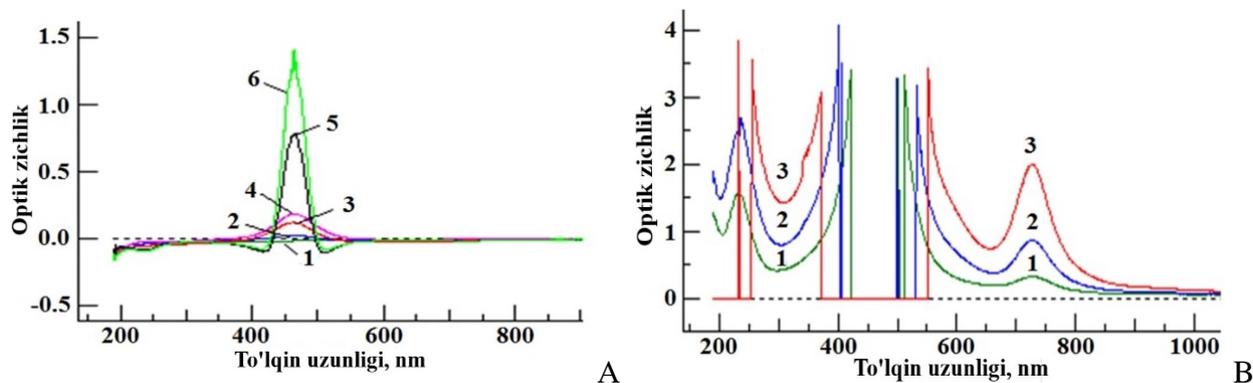
Element	Lokal element tarkibi %								xatolik %
	NaCl	Nurlanmagan			Doza 10^7 R		Doza $3 \cdot 10^7$ R		
Spektrlar	–	12	13	14	10	11	15	16	
Na	39.35	44.8	44	44.2	54.6	52.6	52.7	50.9	0.2–0.6
Cl	60.65	55.2	56	55.8	45.4	47.4	44.4	46.3	0.2–0.6
O	–	–	–	–	–	–	2.9	2.8	0.5–0.7

7-rasmda γ -nurlanishdan oldingi va keyingi sirt profillari ko'rsatilgan. Ko'rinib turibdiki, sirtning dastlabki optik sayqallanishining dag'alligi (Z shkalasi bo'yicha) tez-tez nano o'lchovli kanallar va dominant kub fazalari NaClO_3 va Na_2O o'sishi tufayli 650 nm ga yetadi. Eng anizotropik ortorombik faza, Cl_2 va nano o'lchamdagi kubik HCl va Na , aftidan, kanal devorlaridagi nanogrooveslarda joylashgan. Nurlanishdan so'ng radiatsion kuchaygan diffuziya tufayli dag'allik ikki baravar kamayadi, natijada NaCl matritsasi ochiladi va yangi NaH fazasi 100 nm balandlikdagi uchli konuslar ko'rinishida shakllanadi, xlarning yo'qolishi natijasida nanodag'allik chuqurlashadi (3-jadval).



7-rasm. 30×30 mkm maydondagi NaCl kristalining sayqallangan yuzasining nano o'lchamdagi profili: A – nurlanmagan namuna, B - $3 \cdot 10^7$ R γ -dozadan keyin, V - 10^{15} el/sm² elektronlar oqimi bilan nurlangandan keyin

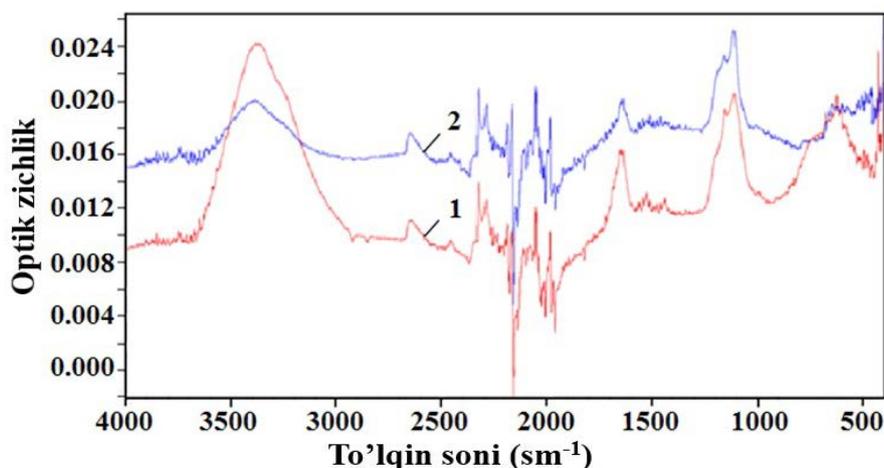
Ilgari, ishqoriy galoid kristallarda sirt holatlari faqat adsorbsiyalangan gaz molekullari va metall kolloidlari bilan bog'liq edi, ammo kirishma Na fazasi aniqlangan. Shunday qilib, mahalliy element tarkibi, strukturaviy va fazaviy tahlillar va sirt morfologiyasining eksperimental natijalari o'zaro izchil va ishonchli. 8-rasmda $2 \cdot 10^4$ R dan $3 \cdot 10^7$ R gacha bo'lgan dozani to'plash bosqichlarida o'lchangan NaCl kristallarining yutilish spektrlari ko'rsatilgan. F - markaz diapazonining bo'linishi $5 \cdot 10^5$ R dozasida, elektr dipol o'zaro ta'siri bo'lgan juftlashgan $F-F$ markazlari hosil bo'lganda paydo bo'ladi. Birinchi marta F -markazining intensiv yutilish zonasi atrofida aniq dispersiya aniqlandi, bu hatto salbiy qiymatlarni ham oladi (8A rasm 5 va 6 spektrlar). Bu shuni anglatadiki, bu yorug'lik chizig'i samarali tarzda aks ettiriladi, bu anion vakansiyalari joyida metall klasterlarni tavsiflaydi.



8-rasm. NaCl kristalining yutilish spektrlari: A) 1–nurlanmagan, past γ -dozadan keyin: 2– $2 \cdot 10^4$ R, 3– $5 \cdot 10^4$ R, 4– 10^5 R, 5– $2 \cdot 10^5$ R, 6– $3 \cdot 10^5$ R; B) yuqori dozalarda 1– $7 \cdot 10^5$ R, 2– 10^7 R, 3– $3 \cdot 10^7$ R

8B rasmda ko‘rsatilganidek, nurlanish dozasi qanchalik yuqori bo‘lsa, juftlashgan markazlarning konsentratsiyasi (molekulyar markazlar toifasi), har bir juftlikdagi markazlar orasidagi masofalar qanchalik yaqin bo‘lsa, elektronlararo o‘zaro ta‘sir darajalari shunchalik kuchli bo‘ladi va shunga mos ravishda ular orasidagi bo‘linish shunchalik katta bo‘ladi.

9-rasmda detektorning $2200\text{--}2000\text{ cm}^{-1}$ diapazonidagi instrumental olib tashlanmaydigan shovqinini hisobga olmagan holda NaCl ning yutilish spektrlari ko‘rsatilgan.



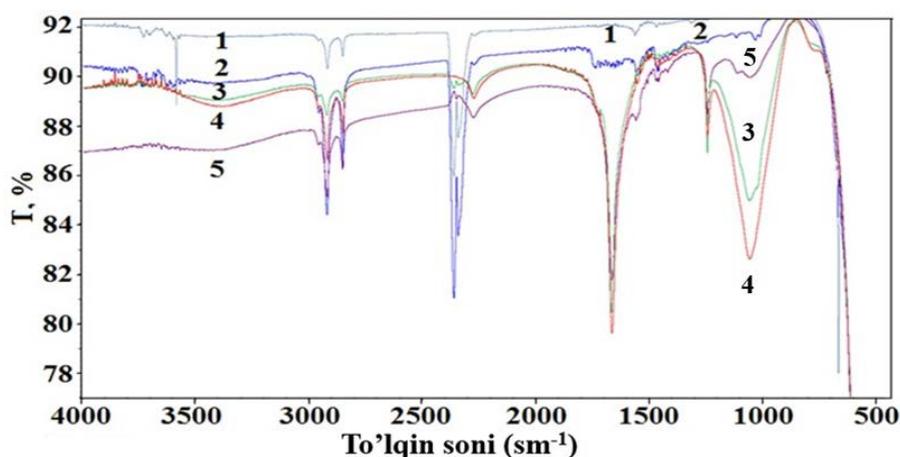
9-rasm. NaCl kukunining FTIR spektrlari: 1 - nurlanmagan, 2 - ^{60}Co γ -kvant bilan quvvati 140 R/s, havoda 300 K da 10^6 R dozagacha nurlangan

Nurlanmagan namuna uchun 1 spektr (9-rasm) $3200\text{--}3400$ va $1800\text{--}1400\text{ cm}^{-1}$ da Na–OH bog‘lanishlari bilan bog‘liq bo‘lgan, nurlanishdan so‘ng kamayib boruvchi intensiv chiziqlarni ko‘rsatadi.

Bundan tashqari, 850 cm^{-1} da U-markazlari (anion pozitsiyalarda vodorod ionlari) intensivligi ham kamaydi. Shu bilan birga, fon signalining kuchayishi fononlarning tarqalishining bu nanozarralar yuzasida Na-H va metall Na borligidan kelib chiqqan tebranish elektronlari va bog‘langan protonlarga ta‘siri bilan

izohlanadi. Yopiq izolyatsiyalangan tizim sharoitida nurlantirilganligi sababli, hodisa γ -foton oqimi bundan mustasno, kukun yuzasida kuzatilgan faza tarkibi saqlanib qolgan muvozanat fazoviy zaryad potensialiga mos keladi (qondiradi). 2 jadvalda keltirilgan olingan natijalar adabiyot ma'lumotlariga mos keladi. Adabiyotda radiatsiya ta'siri ostida bo'lgan rang markazlari asosiy va sirtidagi anion va kation pastki panjaralardagi vakansiya-intersial atom juftliklari bilan bog'liq bo'lganligi sababli, aslida sirtga yaqin mikro qatlamda yanada murakkab nanofazalar topilgan, tarqalish shaklidagi optik spektrlarni ham hisobga olish kerak. 10-rasmda barcha kirishma fazalar va ularning nurlanish natijasidagi o'zgarishlari ko'rinadigan o'tkazish spektrlari ko'rsatilgan.

Na nanozarrachalarining radiatsiya ta'sirida o'sishi yorug'likning kuchli tarqalishiga olib keladi, bu Drude nazariyasi tomonidan metallar uchun tavsiflanadi. Nurlanish dozasining oshishi bilan IQ yutilish zonalarining harakati sirtning element va fazaviy tarkibidagi o'zgarishlar bilan yaxshi bog'liqdir.



10-rasm. Nurlanmagan (1) va 132 R/s intensivlikda 300 K haroratda γ -nurlanishdan keyin $3 \cdot 10^5$ R (2), $7 \cdot 10^5$ R (3), 10^7 R (4) va $3 \cdot 10^7$ R (5) dozalarda, shuningdek 6 oy davomida qorong'uda (3) ta'sir qilishdan keyin NaCl kristalining IQ uzatish spektrlari

Nurlanish bilan NaH parchalanadi va 2300 cm^{-1} da mos keladigan band zaiflashadi. Aksincha, ClO_3 bilan bog'liq bo'lgan 1670 cm^{-1} diapazon 1 MR dan yuqori dozada tez o'sib boradi va barqarorlashadi. NaOH hissasi kam, ammo Na_2O fazasi o'sadi. Fermi rezonansi shartiga ko'ra, IGKda asosiy tebranish zonalarini α , l , δ va ν_s chastotalari ma'lum miqdoriy nisbatlarda bo'ladi: NaCl: $2\nu_\alpha$ (620 cm^{-1} tor va kuchli) + ν_δ (1610 cm^{-1}) = ν_s (2850 cm^{-1}). Nurlanishdan so'ng, OH 3720 cm^{-1} va N_2O 3580 cm^{-1} tor ko'zgarilari yoq, [Aleksiev P.D. Optika va Spektroskopiya 1985. – T.59 (3). –S.567–572.] ish natijalaridan farqli o'laroq, IGKlar OH guruhlari bilan maxsus doping qilingan va γ fotonlar bilan nurlangan.

XULOSA

“Neytron, gamma va elektron nurlanish ta'sirida LiF va NaCl kristallarida nanotuzilishlarning qayta o'zgarishi” mavzusidagi fizika-matematika fanlari

bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiya ishining natijalari asosida quyidagi xulosalar keltiriladi:

1. Maqsadga erishish uchun tezlashtirilgan elektronlarning impulsli nurlari, aralash neytron va gamma oqimlari va radionuklidlarning nurlanishi ta'sirida nanostrukturalarning optik jihatdan toza LiF va NaCl kristallarida o'zgarishi mexanizmlari va muammolarni hal qilish uchun adekvat zamonaviy spektral va strukturaviy usullar, shuningdek, yuqori aniqlikdagi mikroskoplar tanlangan. Mikrolokal elementlarni tahlil qilish uchun EDS tizimi alohida e'tiborga loyiqdir, bu yadro zarralari izlari tarkibidagi farqni va kristallarning atrofidagi sirtini o'lchash, boshqa spektral usullar uchun mavjud bo'lmagan muammolarni hal qilish imkonini berdi.

2. Radiolizning birinchi va ikkinchi bosqichlarida sodir bo'ladigan Frenkel juftlari, Li yoki Na kolloidlari va F yoki Cl vakansiya agregatlari hosil bo'lishidan tashqari, bu yadro qo'zg'alishlari elektron-pozitron juftlari, sirtning sirtga yaqin qatlamida nanofazalar hosil qiluvchi qoldiq mahsulotlar - barqaror izotoplar aniqlandi, shuning uchun muddati o'tgan LiF va NaCl detektorlarini termik tiklash mumkin emas; Shikastlangan qatlamni mexanik yoki kimyoviy olib tashlash talab etiladi.

3. Sirtga yaqin qatlamda nanometal-dielektrik fazalar chegarasida optik rezonans sochilish natijasida yuzaga keladigan LiF va NaCl ning optik spektrlarida $7 \cdot 10^5$ R gamma dozalarida ajratilgan F markazining ma'lum diapazoni o'rnida parchalangan Tamm dubleti paydo bo'lishi, yaqin juft $F-F$ markazlari orasidagi maksimal masofa LiF va NaCl da mos ravishda 14.5 va 20 nm ekanligi aniqlandi. Yutilish va tarqalish zonalarini farqlash mezoni: to'lqin uzunligi yutilish tasmasi o'rnida qaytarish tasmasi paydo bo'ladi va fotooqartma yo'q.

4. Cl va F ning yo'qolishi tufayli Na-Cl va Li-F bog'lanishlarning bo'ylama (cho'zilgan) tebranishlari sohasining so'nishi aniqlandi, IQ spektrlarida nuqsonli va kirishma markazlarining tebranishlari aniqlandi;

5. Birinchi marta ikkita mustaqil usullardan (EDS va XRD) eksperimental ma'lumotlarga asoslanib, NaCl va LiF monokristalining sirtining boshlang'ich (o'sish) nonstoixiometriyasining indunsirlangan gamma bilan bog'liq bo'lmagan stoixiometriyaga ta'siri, nuqta nuqsonlarini yig'ish va nanozarrachalarning (metall gidrid yoki boshqa nanofazalar) o'sishi o'rganildi.

6. Havoda ^{60}Co ning $4 \cdot 10^5 - 3 \cdot 10^7$ R dozali bilan 320 K haroratda γ -nurlanishida qiymati 15% og'irlikgacha bo'lgan Cl hamda O ni yo'qotishi bilan aralashma fazalarining radiolizi kechishi isbotlangan. Kichik dozada (<1 MR) nurlanishdan so'ng $\text{NaClO}_3 \rightarrow \text{NaCl}$ va $\text{Na}_2\text{O} \rightarrow \text{NaOH} \rightarrow \text{NaH}$ fazalar o'zgaradi, ular yuqori gamma dozadan keyin (>30 MR) esa NaH faza nanokonuslari (78%) ko'rinishida boshqalardan ustunlik qiladi va NaOH (6%) faza NaCl (14%) kristalining yuzasida ajralgan yupqa nano qatlam hosil qiladi.

7. LiF:OH ning gamma-nurlanish orqali siljigan atomlarning tarqalishiga to'sqinlik qiladigan past haroratda olingan nanostrukturali kompozit muvaffaqiyatli va uzoq vaqt davomida passiv nanopikosoniyali lazer modulyatorida uch o'lchovli fazali panjara sifatida ishlaydi va hatto lazerli oqartirishga ham sezgir emas.

Yengil ishqoriy metallarning gidridlarini hosil qilish natijalaridan litiy birikmalaridan foydalangan holda tritiy olish, tadqiqot reaktorlari va atom energetika ob'ektlarida neytron-gamma oqimlarining dozimetriyasida qo'llanilishi mumkin.

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

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

БУЗРИКОВ ШОВКАТ НАХАЛОВИЧ

**ПРЕОБРАЗОВАНИЕ НАНОСТРУКТУР В КРИСТАЛЛАХ LiF И NaCl
ПРИ НЕЙТРОННОМ, ГАММА– И ЭЛЕКТРОННОМ ОБЛУЧЕНИИ**

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 № B2024.4.PhD/FM1197

Докторская диссертация выполнена в Институте ядерной физики Академия наук Республики Узбекистан.

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

Научный руководитель:	Ибрагимова Эльвира Меметовна доктор физико-математических наук, профессор
Официальные оппоненты:	Бахрамов Саъдулла Абдуллаевич доктор физико-математических наук, профессор, академик Саидахмедов Кахраман Хусанович 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: 100174, г. Ташкент, пос. Улугбек, ИЯФ АН РУз. 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, поселок Улугбек, ИЯФ АН РУз. 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. В последние годы различные соединения лития привлекают широкий интерес благодаря их высокотемпературной суперионной проводимости (в качестве твердого электролита в аккумуляторах) и применению в качестве теплоносителя в атомных реакторах. Для регистрации тепловых нейтронов на АЭС используются ионизационные камеры с покрытием из ${}^6\text{Li}$. В термоядерной энергетике используется ядерная реакция ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$, обеспечивающая генерацию трития в blankets термоядерного реактора в процессе синтеза $d+t \rightarrow \alpha+n+17.6 \text{ МэВ}$.

В мировой практике кристаллы LiF с плотнейшей анионной упаковкой кубической симметрии и максимальной шириной запрещенной зоны 14 эВ широко применяются в оптических приборах, лазерной технике, а также в радиационной медицине в качестве тканеэквивалентных дозиметров (термолюминесцентных и термоэкзоэмиссионных). Наночастицы Li существенно влияют на их оптические характеристики. Из-за высокой гигроскопичности и низкой радиационной стабильности кристаллы NaCl не нашли применения в радиационной дозиметрии, но благодаря исключительно высокой прозрачности в ближнем и среднем ИК-диапазоне они остаются незаменимыми оптическими элементами современных Фурье-ИК-спектрометров. Наночастицы Na применяются для добычи вязкой нефти. Соли Na широко используются в качестве сцинтилляторных детекторов и теплоносителей в атомных реакторах, а также в виде NaCl- матрицы для захоронения высокоактивных ядерных отходов. В связи с этим исследования дефектов структуры и фазовых превращений, наведенных гамма-квантами и другими ядерными частицами в результате ядерных реакций и атомных смещений, вновь приобретают актуальность.

В нашей Республике уделяется большое внимание развитию ядерной медицины, атомной энергетике, а также ядерных и радиационных технологий, включая компактные электроаккумуляторы. С 1970-х годов в ИЯФ АН РУз исследуются спектры наведенного интенсивного поглощения при высоких дозах, где нарушается линейная зависимость от дозы. Однако вклад рассеяния на наноразмерных дефектах не удалось выделить экспериментально на стандартных оптических спектрофотометрах. В последнее время в Узбекистане стали доступны методы электронной и зондовой микроскопии, что открыло новые возможности для исследования радиационной модификации структуры и свойств кристаллов LiF и NaCl с наночастицами. Эти фундаментальные исследования и разработки актуальны и востребованы, что отражено в Стратегии¹ развития нового Узбекистана на 2022–2026 гг.

¹Указ Президента Республики Узбекистан № УП-60 «О Стратегии развития нового Узбекистана на 2022-2026 годы» от 28 января 2022 г.

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

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики. Диссертационное исследование выполнено в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий республики II. «Энергетика, энергосбережение и альтернативные источники энергии».

Степень изученности проблемы. К настоящему времени учеными во многих странах мира, в том числе немецкими (G.Mie, F.Seitz, K.Schwartz), американскими (G.Ackermann, G.A.Smith, G.H.Hubbell, R.L.Fleischer), японскими (Y.Akashi, Y.Yoneda), английскими (C.R.A.Catlow, L.W.Hobbs, D.A.Young), французскими (F.Beuneu, C.Toulemond), итальянскими (G.Baldachini, A.Sorensen), голландскими (H.W.denHartog, A.V.Sugonyako, D.I.Vainshtein), российскими (В.В.Климова, Л.А.Лисицына, В.М.Лисицын, А.А.Туркин, Е.Ф.Мартынович, Л.И.Брюквина, С.Н.Сульянов), эстонскими (Ч.Б.Лущик), украинскими (В.Г.Радченко, В.И.Дубинко), беларусскими (Ф.Ф.Комаров), египетскими (S.M.Abdou, H.Moharam), казахстанскими (А.Акилбеков, А.Даулетбекова), узбекистанскими (академик Ш.А.Вахидов, академик М.Х.Ашуров, Б.Каипов, Э.М.Ибрагимова, И.Нуритдинов, М.А.Муссаева) и другими специалистами выполнен большой объем работ по исследованию дефектов структуры и оптических центров, созданных при воздействии различных излучений на монокристаллы LiF и NaCl.

На основе LiF разработаны оптические элементы для вакуумного ультрафиолета, тканеэквивалентные термолюминесцентные (ТЛД) и термоэкзоэмиссионные (ТЭЭ) дозиметры для радиобиологии и ядерной медицины, высокочувствительные сцинтилляционные детекторы заряженных частиц, нейтрино и тепловых нейтронов, а также активные и пассивные элементы на центрах окраски для перестраиваемых пикосекундных лазеров. Монокристаллы NaCl, соактивированные примесями Cd и Ca, предложены в качестве высокочувствительных ТЛД для клинической дозиметрии при лучевой терапии и радиодиагностике. Дозовые зависимости из оптических измерений описаны на основе модели треков. В области нанотехнологий разработан способ получения нитевидных кристаллов солей и оксидов диаметром до 1 μm и длиной порядка 1 см с уникальной прочностью. Известны также термохимический и ионизационный (рентген, ускоренные ионы) способы получения коллоидов щелочных металлов.

Однако применение высокоэнергичного излучения (гамма-квантов, направленных электронных, ионных и лазерных пучков) для получения наночастиц металлов изучено недостаточно. Еще меньше исследований посвящено облучению LiF нейтронами в реакторе, хотя еще в 1950-х годах в облученном кристалле обнаружены аморфные коллоиды Li и газовые пузыри, приписанные He. При утилизации высокоактивных ядерных отходов в твердых захоронениях большое значение имеют структурные преобразования при радиолизе природной каменной соли NaCl, вызванные поглощением энергии излучения радионуклидов. Однако поверхностные состояния и фазовые превращения, а также свойства интерфейсов нанометалла в матрице кристалла изучены недостаточно, хотя методы XRD обнаруживали аморфные и кристаллические примесные фазы. Состояние ^3H , накопленного в Li-соединениях, влияющее на его извлечение, остается неясным. Вклады электрон-позитронных пар и продуктов ядерных реакций в отклик LiF и NaCl при облучении ранее не рассматривались.

Связь диссертационного исследования с научно-исследовательскими работами научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационная работа выполнена в рамках научно-исследовательских проектов Института ядерной физики АН РУз по темам: № ФА-Ф2-Ф120 «Электронные свойства и радиационная модификация низкоразмерных высокотемпературных сверхпроводников, полупроводниковых гетероструктур, металлов и их оксидов» (2012–2016); ОТ-Ф226 «Механизмы формирования функциональных наноструктур в пучке электронов» (2017–2020), а также 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 темам: «Радиационно-индуцированный синтез и модификация наноразмерных включений в стеклянных и кристаллических матрицах» и «Разработка способа получения наноструктурированного слоя поверхности под пучком электронов высокой энергии».

Целью исследования является изучение механизмов преобразования наноструктур в оптически чистых кристаллах LiF и NaCl под воздействием импульсных пучков ускоренных электронов, смешанных нейтронных и гамма-потоков реактора и излучений радионуклидов.

Задачи исследования:

формирование наночастиц из дефектов структуры нестехиометрического поверхностного слоя путем облучения потоками нейтронов 10^{14} н/см²с и γ -квантов 3.3×10^{15} кв/см²с (3700 Гр/с) в атомном реакторе ВВР-СМ в стандартном Al-контейнере до флюенсов 10^{15} – 10^{18} н/см², а также излучениями радионуклидов после его остановки; открытой поверхности-пучками ускоренных электронов с энергией 5 МэВ при плотности тока $0.1 \div 3$ μA дозами 10^{14} – 10^{16} эл/см², сходящимися потоками 10^{12} – 10^{13} кв/см²с ($100 \div 1000$ Р/с) γ -квантов ^{60}Co с энергиями 1.17 и 1.33 МэВ до доз 10^5 – 10^9 Р при 270 и 320 К;

анализ микропрофилей треков и наростов, локального элементного состава нестехиометрии исходного и облученного приповерхностного слоя методами электронной микроскопии с энергодисперсионной спектрометрией;

определение структуры и фазового состава приповерхностного слоя до и после облучения по спектрам рентгеновской дифракции с использованием программ HighScore, FullProf и баз данных PDF-2013 и 2019; расчет размеров кристаллических наночастиц по формуле Шеррера;

идентификация спектров ИК поглощения и отражения по частотам колебаний химических связей по базе данных Omnic в зависимости от толщины образца, дозы и мощности облучения, времени релаксации при 300 К после облучения; определение примесных фаз по ИК-полосам;

различение центров окраски и рассеяния света нановключениями в спектрах оптического поглощения и отражения в зависимости от толщины образца (1-10 мм), ориентации относительно направлений падающих потоков излучений, дозы и мощности облучения, а также времени релаксации при 300 К после облучения;

расчет концентрации одиночных и парных центров окраски, расстояния между центрами размеров наночастиц по формулам Смакула, Мие и Радченко.

Объектом исследования являются наночастицы и наноструктуры в модельных ионных монокристаллах оптической чистоты и качества LiF и LiF:OH, предназначенных для детекторов и лазерных элементов, а также в чистых кристаллах NaCl в виде стандартных ИК-окошек (диаметр 35 мм, толщина 4 мм), изготовленных на Ленинградском оптико-механическом объединении (Санкт-Петербург, Россия).

Предметом исследования являются радиационные механизмы образования наночастиц и наноструктур на колотой и оптически полированной поверхности ионной кристаллической матрицы с шириной запрещенной зоны 14 эВ (LiF) и 8.95 эВ (NaCl) при воздействии ядерных излучений, а также зависимости оптических свойств от структуры и состава в микро- и наноразмерном масштабе.

Методы исследования: рентгеновский энергодисперсионный анализ локального элементного состава; рентгенодифракционный анализ структуры и фазового состава; сканирующая электронная и зондовая микроскопия, спектроскопия оптического и ИК-излучения. Размеры наночастиц рассчитывали по спектрам оптического рассеяния и рентгеновской дифракции с использованием формул Мие и Шеррера.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

впервые в приповерхностном слое кристаллов LiF, облученных электронами с энергией 5 МэВ, а также потоками *n*- и γ -излучения в реакторе, обнаружены квадратные треки размером 1-5 $\mu\text{м}$ и примесные фазы в форме nanoостровков; определены зависимости их количества и размеров от энергии частиц, флюенса и температуры облучения;

впервые обнаружено и определено уменьшение параметров кубической решетки на 0.07 нм и размеров наночастиц фазы LiH при облучении LiF в реакторе флюенсами от $5 \cdot 10^{15}$ до $5 \cdot 10^{17}$ н/см² в результате образования трития (бета-радиоизотопа $^3\text{H}_1$) и структурно–фазового преобразования LiH→LiT;

впервые в оптических спектрах LiF и NaCl при γ -дозах выше $7 \cdot 10^5$ Р на месте известной полосы изолированного *F*-центра обнаружен расщепленный дублет и определено предельное расстояние, при котором начинается взаимодействие *F-F* центров с образованием их агрегатов F_n и наночастиц LiH и NaH, ответственных за оптическое резонансное рассеяние и нелинейные эффекты: 14.5 нм для LiF и 20 нм для NaCl;

впервые определена исходная нестехиометрия поверхности NaCl с дефицитом Cl и образованием NaClO₃ наночастиц, рост которой при гамма- и электронном облучении приводит к образованию на месте агрегатов вакансий Cl металлических наночастиц NaH в виде нитей, бугорков, треков, вызывающих сильную отрицательную дисперсию вокруг интенсивной полосы поглощения *F*-центров;

установлен радиационно-индуцированный механизм образования наночастиц и наноструктур в ионных кристаллах, обусловленный ядерными и структурно-фазовыми преобразованиями, инициируемыми нейтронным, электронным и гамма-облучением.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

показано, что комплекс методов сканирующей электронной микроскопии с энергодисперсионной системой, рентгеноструктурного анализа и инфракрасной фурье спектроскопии является эффективным для обнаружения продуктов ядерных реакций и связанных с ними структурно-фазовых превращений в соединениях легких элементов при воздействии смешанных нейтронных и γ -поток реактора, а также пучков ускоренных электронов и ^{60}Co γ -излучения;

установлено, что полученные результаты длительной бета-эмиссии из LiF, обусловленной образованием β -излучающего радиоизотопа $^3\text{H}_1$ и наночастиц гидридов лития, могут быть использованы для оценки потерь при извлечении трития в качестве топлива для термоядерных реакций;

установлено, что полученные результаты и методы исследований могут быть применены для дозиметрии длительных облучений в депозитариях высокоактивных отходов в матрице NaCl с учетом образования NaH и структурных изменений;

выявлено, что наноструктурный композит, полученный интенсивным γ -облучением LiF-ОН при 273 К, приобретает стабильную нелинейную функцию пассивного нано-пико-секундного лазерного модулятора добротности.

Достоверность результатов исследования обеспечивается применением комплекса современных спектральных аналитических методов, взаимодополняющих и подтверждающих качественные и количественные результаты без противоречий, обеспечивающих согласованность данных и их

интерпретацию на основе механизмов взаимодействия ядерных излучений с твердыми телами.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость работы заключается в экспериментальном доказательстве механизма радиационного образования стабильных наноструктур LiH и NaN из точечных дефектов и их влияния на оптический отклик кристаллов LiF и NaCl. Сочетание методов радиометрии, рентгеновской дифракции и малоуглового рассеяния с оптическим поглощением/отражением позволило идентифицировать и оценить размеры наночастиц, что актуально для экспериментальной нанофизики, радиационного материаловедения и ядерных технологий. Оценена максимальная концентрация точечных дефектов и их агрегатов $< 10^{17} \text{ см}^{-3}$, тогда как нанофазы покрывают всю поверхность микрослоем с атомной плотностью $> 10^{21} \text{ см}^{-3}$, поглощая практически всю энергию ядерных излучений.

Практическая значимость состоит в том, что полученные экспериментальные результаты по радиационному преобразованию наноструктур в приповерхностном слое диэлектрика при воздействии жесткого γ -облучения с энергией выше 1.022 МэВ (порог генерации электрон-позитрон-пар) и пучка ускоренных электронов 5 МэВ имеют потенциал практического применения в радиационных технологиях создания функциональных наноструктурных материалов для ядерной энергетики и нелинейной оптики. Облученная нестехиометричная поверхность диэлектриков LiF и NaCl с электропроводящими наноструктурами LiH и NaN обладает потенциалом практического применения в устройствах накопления/хранения электроэнергии, захоронения радиоактивных отходов атомной энергетики, а также в системах преобразования энергии излучений радиоактивных осколков в электрический ток.

Внедрение результатов исследования. На основе полученных результатов по преобразованию наноструктур в кристаллах LiF и NaCl при облучении смешанными потоками нейтронов, электронов и γ -квантов:

результаты по обнаружению в приповерхностном слое кристаллов LiF, облученных электронами, потоками n - и γ -излучения в реакторе, квадратных треков и примесных фаз в форме nanoостровков; уменьшения параметров кубической решетки и размеров наночастиц фазы LiH при облучении LiF в реакторе; расщепленного дублета в оптических спектрах LiF и NaCl при γ -дозах выше $7 \cdot 10^5 \text{ Р}$ на месте известной полосы изолированного F -центра; определение предельного расстояния, при котором начинается взаимодействие F - F центров с образованием их агрегатов F_n и наночастиц LiH и NaN; исходной нестехиометрии поверхности NaCl с дефицитом Cl и образованием NaClO_3 нанофазы, рост которой при гамма- и электронном облучении приводит к образованию металлических наночастиц NaN в виде нитей, бугорков, треков использованы в рамках Международного проекта МИГ-41 «Модели, методы и цифровые технологии для создания

функциональных композиционных и полимерных материалов с помощью их обработки концентрированными потоками гамма-квантов в различных газовых средах» (2021–2023) (Письмо Пермского национального исследовательского политехнического университета, Российская Федерация, №1167/УНИ от 15.11.2024 г.). Использование научных результатов позволило выявить вероятные ядерные реакции в легких ядрах и объяснить механизм структурных изменений, приводящих к механическим деформациям модифицированных полимерных композитов;

результаты по обнаружению структурно-фазового перехода $\text{LiH} \rightarrow \text{LiT}$ с уплотнением решетки после $n+\gamma$ облучения LiF в результате α -распада ${}^6\text{Li}$ использованы в рамках фундаментального проекта «Нелинейные явления, фазовые переходы и анизотропия упругих, фотоупругих и суперионных свойств в диэлектрических и сегнетоэлектрических кристаллах» (01.01.2021–31.12.2021) Института ионно-плазменных и лазерных технологий имени У.А. Арифова АН РУз (Письмо Академии наук Республики Узбекистан № 2/1255-3270 от 26.12.2022 г.). Использование научных результатов позволило определить эффективные константы Грюнайзена вдоль произвольного направления в основных кристаллографических плоскостях и поверхностях кубических кристаллов фторида лития.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 12 международных и республиканских научно–практических конференциях.

Опубликованность результатов исследований. По теме диссертации опубликованы 17 научных работ, в том числе 5 статей в научных изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией для публикации основных научных результатов докторских диссертаций, из них 2 в зарубежных научных журналах.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы. Объем диссертации составляет 110 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснованы актуальность и востребованность исследования, показана связь исследования с основными приоритетными направлениями развития науки и технологий в Республике, отмечена недостаточная степень изученности проблемы низкой радиационной стабильности LiF и NaCl , сформулированы цель и задачи, выбраны объекты, определен предмет исследования и описаны методы исследования, выделена научная новизна, обоснована достоверность полученных результатов, отмечена научная и практическая значимость полученных результатов исследования, приведены краткие сведения об апробации работы, объеме и структуре диссертации.

В первой главе **«Обзор литературы по ростовым и радиационным дефектам структуры кристаллов LiF и NaCl»** описаны экспериментальные и теоретические исследования наночастиц и наноструктур, в частности получение наночастиц Li и Na при облучении или в различных средах.

В моделях генерации дефектов в случае облучения гамма-квантами и нейтронами радиационно-наведенные точечные дефекты распределены равномерно в объеме, либо с некоторым градиентом концентрации вдоль направления пучка частиц, равномерно теряющих энергию при рассеянии. В определенных условиях облучения обнаружены долгоживущие электронные центры в KCl, продукты ядерных реакций (^4He , ^3H) в LiF. Методом XRD показано, что в NaCl и LiF происходят радиационно-индуцированные фазовые переходы с формированием нанокристаллических фаз (Li, Na), однако они химически агрессивны, поэтому исследованы несистематично и недостаточно подробно.

Во второй главе **«Объекты и экспериментальные методы исследований»** описаны методы выращивания особо чистых кристаллов LiF и NaCl, измерения и анализа их структуры и оптических свойств. Образцы кристаллов LiF и NaCl предоставлены Государственным оптическим институтом (Ст.Петербург) для исследований воздействия ядерных излучений. Использовали облучения ^{60}Co γ -лучами (энергии 1.17 и 1.33 МэВ, превышающие порог генерации электрон-позитронных пар 1.022 МэВ), смешанными потоками нейтронов и гамма (n - γ -) в каналах активной зоны реактора ВВР–СМ и только бета+гамма- сразу после его остановки, а также пучком электронов с энергией 5 МэВ.. Условия облучений обоснованы задачей синтеза наночастиц из агрегатов дефектов.

Использован комплекс поверхностно-чувствительных и объемных методов анализа: микропрофиль и локальный элементный состав микро-структур определяли на сканирующем электронном микроскопе (SEM) EVO MA10 (Zeiss) с энергодисперсионной системой EDS Aztec (Oxford Instrum) (ошибка $\pm 0.2\%$); структуру и фазовый состав образцов исследовали на рентгеновском дифрактометре (XRD) Empyrean (PANalytical) в 5–140 град. с Ni -фильтром и светосильной X-трубкой с Cu-катодом, а размеры наночастиц считали по формуле Шеррера; спектры оптического поглощения (ОП) и отражения (ОО) снимали на спектрофотометрах UV3600 (Shimadzu) и СФ-56 (ЛОМО) при ширине щели 6 нм в интервале длин волн 190–1100 нм и оптических плотностей до 5, а концентрацию центров окраски считали по формуле Смакулы; ИК-спектры пропускания/поглощения/отражения снимали в интервале волновых чисел 4000–400 см^{-1} на Фурье-спектрометре iS50 Nicolet (Thermosciencе), нанопрофиль поверхности измеряли бесконтактно в сканирующем зондовом микроскопе SPM–9700 HT (Shimadzu).

В третьей главе **«Механизмы образования и преобразования наноструктур в кристаллах LiF при облучении»** описаны результаты исследования кристаллической структуры, морфологии поверхности кристаллов, фазового и элементного состава, спектры поглощения и

отражения в оптическом и ИК диапазонах, до и после облучений нейтрон+гамма-излучениями реактора, электронами и гамма-лучами.

Рисунок 1 (слева) показывает XRD спектры внешней и внутренней поверхностей кристалла LiF:ОН, облученного в оптимальных условиях (10^8 Р при 273 К) для приобретения оптической нелинейной функции пассивного пикосекундного лазерного затвора (справа), импульс 25 нс→пички 20 пс.

Гамма-облучение уменьшает малоугловое ($15-20^\circ 2\theta$) рассеяние на аморфных нанофазах и образует в приповерхностном слое более плотную кристаллофазу, рефлексы которой сдвинуты в сторону больших углов рассеяния. Обнаружена значительная неоднородность в миллиметровом масштабе до и после гамма-облучения LiF, что близко к расчетной глубине проникновения $\sim 2-3$ мм. Спектр EDS не различает К-линию Li, поэтому нестехиометрия LiF и содержание продуктов облучения С и О точно не определены.

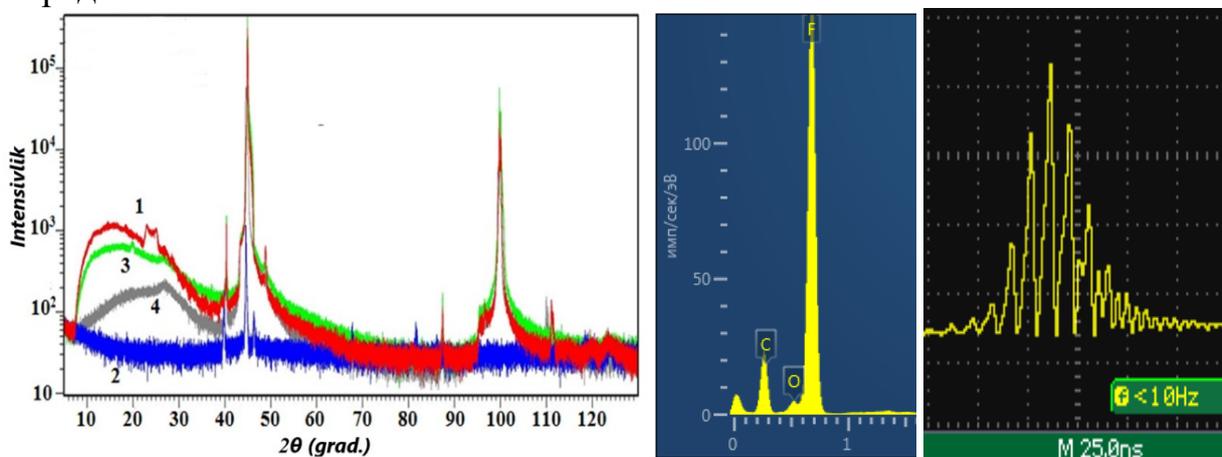


Рис. 1. Слева- рентгенограммы кристаллов LiF:ОН необлученного (1,2) и после ^{60}Co γ -облучения до 10^8 Р при 273 К (3,4) внешней полированной (2,4) и внутренней сколотой (1,3) поверхностей. Центр- спектр EDS (3). Справа – осциллограмма лазерного затвора LiF после γ -облучения

Рисунок 2 показывает нанопрофиль поверхности, γ -облученной при разных температурах и дозах, при бесконтактном сканировании зонда.

Гладкая необлученная поверхность (А) имеет прямые сколотые ступени. После облучения дозой 10^8 Р при 273 К (диффузия затруднена) видны несколько наноконусов высотой ~ 60 нм, разделенных ~ 15 μm , а на линейном дефекте (сколе) формируется ряд наноконусов (Б), но при 320 К (диффузия эффективна) видны конусные углубления до 0.5 μm . После облучения дозой 10^9 Р при 320 К (воздух) образовалась плотная сетка нанокристаллитов.

Нерешенная задача в оптических исследованиях – уловить точную дозу, при которой начинается парное взаимодействие $F-F$ и $M-M$ центров, которая была решена путем облучения с очень малым шагом роста дозы. На рисунке 3 приведены спектры поглощения и отражения, снятые на разных приборах.

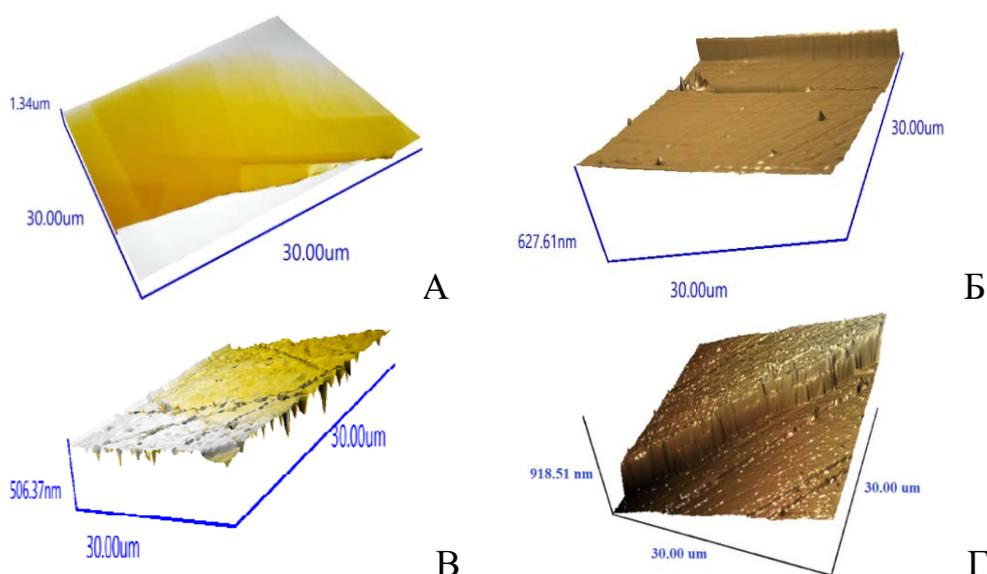


Рис. 2. Нанопрофиль поверхности LiF:OH исходной (А), ^{60}Co γ -облученной дозами 10^8 Р при 273 К (Б) и 10^9 Р при 320 К (В), 10^9 Р при 320 К (Г)

Спектры (1 необлученного образца) на рисунке 3 имеют неразрешенные полосы при 200 и 260 нм и 340–380 нм, которые связаны с примесными нанофазами, рассеивающими падающий свет, а не поглощающие или отражающие его.

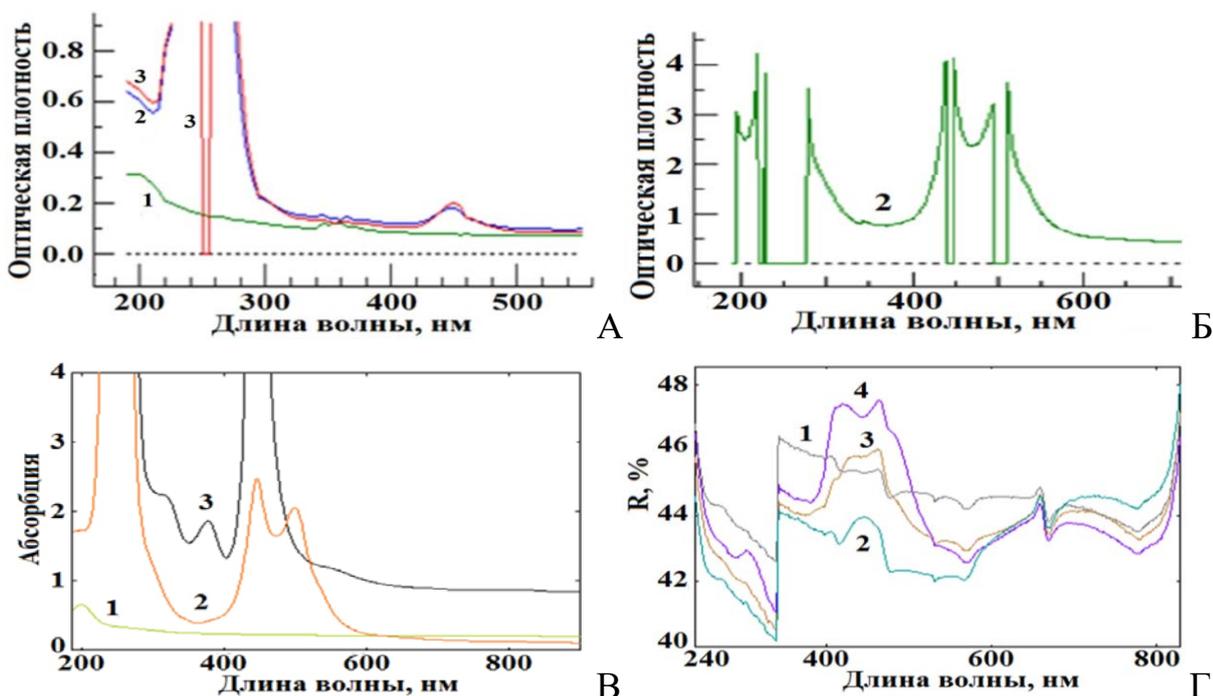


Рис. 3. Спектры поглощения LiF:OH (2 мм): 1- исходный, 2,3 – γ -дозы $6 \cdot 10^5 \text{ Р}$ и $7 \cdot 10^5 \text{ Р}$ (А); 10^8 Р при 273 К (Б); при 273 К (2) и 350 К (3) (В); и отражения (Г) – исходный (1), 10^8 Р при 273 К (2), 320 К (3) и 350 К (4).

После γ - облучения дозой $6 \cdot 10^5 \text{ Р}$ полоса поглощения при 250 нм F -центра насыщается и при дозе $7 \cdot 10^5 \text{ Р}$ расщепляется, когда ближайшие F -центры приближаются на расстояние начала взаимодействия, оцениваемое

~14.5 нм из объемной концентрации оптических центров, и образуют $F-F$ -диполь (спектр 3, смотрите рисунок 3А).

В этот момент появляется слабая полоса при 450 нм, приписываемая молекулярным M или (F_2), которые после насыщения при дозе $<10^8$ Р образуют диполь $M-M$ на расстоянии ~22 нм с расщепленным дублетом 440 и 500 нм (спектры 3Б, 2В, 3В, 3Г, 4Г). Облучение дозой 10^8 Р при 273 К (2Б, В) позволило избежать образования R -центров (320 и 380 нм) и нанокolloидов Li (550 нм) и ахроматического рассеяния в области > 600 нм, которые образуются при 350 К (4). Сформировалась упорядоченная сверхрешетка молекулярных $M-M$ центров с постоянным расстоянием 22 нм, обеспечивающая нелинейную функцию пассивного пикосекундного LiF модулятора добротности лазера на YAG:Nd³⁺ (смотрите рисунок 1справа).

На рисунке 4 даны спектры УФ-видимого поглощения+рассеяния и ИК-пропускания и поглощения LiF:OH, облученных нейтронами и гамма квантами ⁶⁰Co.

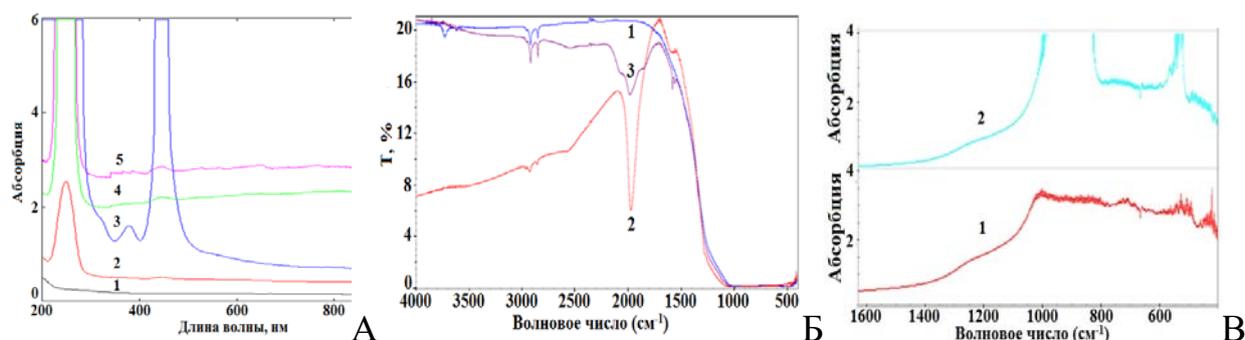


Рис. 4. Спектры LiF:OH: 1– необлученный образец. А)

поглощение+рассеяние: спектры 2-5 соответствуют увеличению флюенса нейтронов от $5 \cdot 10^{15}$ до $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$; Б) ИК-пропускание: 2 – образец облучен γ -дозой 10^9 Р, 3 – образец облучен флюенсом нейтронов 10^{17} см^{-2} ; В) ИК-поглощение

Поскольку LiF является самым широкозонным диэлектриком, то любая примесная нанофаза будет иметь более узкую зону и другую энергию связи. Сравнение спектров (3) (смотрите рисунки 3В и 4А) показывает, что γ -доза 10^8 Р и флюенс быстрых нейтронов 10^{16} см^{-2} дают одинаковый результат – нанофазы с узкими зонами. В необлученном образце (рисунок 4Б) слабые полосы при $3750-3650 \text{ см}^{-1}$ относятся к мономерным OH, слабый дублет при $2800-2900 \text{ см}^{-1}$ и полосы 1200 и 500 см^{-1} относятся к LiH, а основная полоса валентных колебаний Li-F при 1000 см^{-1} . После 10^9 Р появляется область рассеяния нанофазой Li₂O. На рисунке 5 показана поверхность, облученная гамма-спектром остановленного реактора и пучком электронов с энергией 5 МэВ.

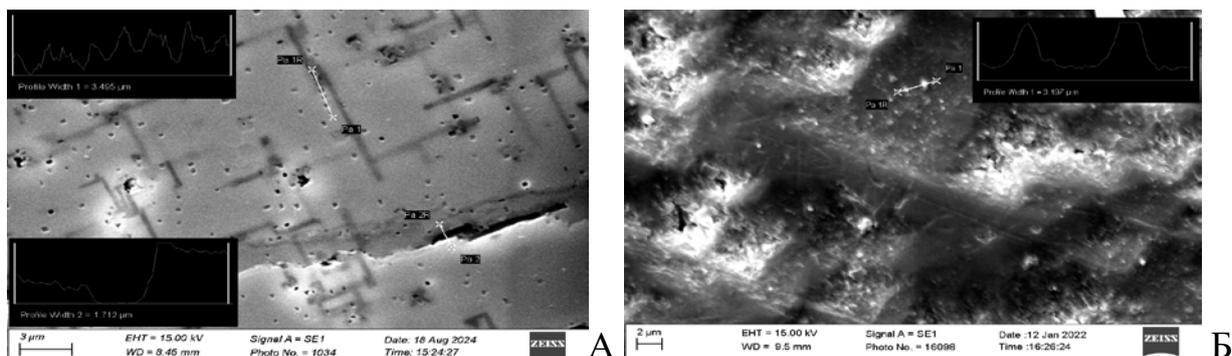


Рис. 5. SEM поверхности LiF после 120 часов облучения гамма-спектром в остановленном реакторе (А) и флюенсом электронов 10^{16} эл/см² (Б). Стрелки и вставки показывают nano-профили треков и кристаллофаз

Видно, что интенсивное облучение вызывает радиационно-термическую рекристаллизацию структуры LiF в кубические нанокристаллы LiT. До облучения на поверхности LiF из-за дефицита F образуется нанофаза (металлический Li диаметром 8 нм в оболочке LiOH диаметром 42 нм), которая отвечает за слабую полосу рассеяния 200 нм (смотрите рисунок 3, спектры 1).

Таблица 1 показывает, что после облучения малым флюенсом быстрых нейтронов образуется нанофаза гидроксида лития, а большим флюенсом – тритида лития, который имеет более плотную кристаллическую решетку.

Таблица 1

Структура кристаллов LiF:OH, облученных в активной зоне реактора

Фаза	Пространственная группа	Сингония	Параметры решетки, Å			Размер D, нм	Рефлекс $2\theta_B$, гр.
			a	b	c		
Необлученный образец							
LiF	Fm-3m	Куб	4.0270	4.0270	4.0270	104	44.91
Li	Im-3m	ромб	3.2850	3.2850	3.2850	8	48.9
LiOH	P4/nmm	тетрагон	3.5560	3.5560	4.3430	42	99.78
Облучен флюенсом быстрых нейтронов $5 \cdot 10^{15}$ н/см ² в течение 17 минут							
LiF	Fm-3m	Куб	4.0270	4.0270	4.0270	140	44.91
LiH гидрид	Fm-3m	куб	4.0832	4.0832	4.0832	93	40.37
						134	100.09
Облучен флюенсом быстрых нейтронов $5 \cdot 10^{17}$ н/см ² в течение 28 часов 20 минут							
LiF	Fm-3m	куб	4.0500	4.0500	4.0500	151	44.61
LiT тритид	Fm-3m	куб	4.0150	4.0150	4.0150	32	38.46
						117	99.51

В четвертой главе «Механизмы образования и преобразования наноструктур в кристаллах NaCl при облучении» описаны результаты исследования кристаллической структуры, спектры ОП, морфологии поверхности указанных выше кристаллов до и после облучения ионизирующими излучениями. На рисунке 6 показаны спектры рентгеновской дифракции до и после облучения γ -лучами ^{60}Co и электронами энергией 5 МэВ. Спектры показывают, что каждый матричный рефлекс (h00) высокой интенсивности сопровождается некогерентным Комптоновским рассеянием, обусловленным взаимодействием между рентгеновскими лучами и слабосвязанными валентными электронами, что является важным эффектом в случае легких элементов, таких как Na и Cl. Слабый рефлекс (110) при $2\theta_{\text{Б}} = 29.5^\circ$ был приписан наночастицам Na. После облучения наблюдается систематическое смещение рефлексов в сторону меньших углов, снижение их амплитуды и уширение на уровне половины амплитуды, что обусловлено фазовыми переходами в результате дополнительной потери хлора с поверхности с образованием плоского нанокolloида из десятков атомов натрия.

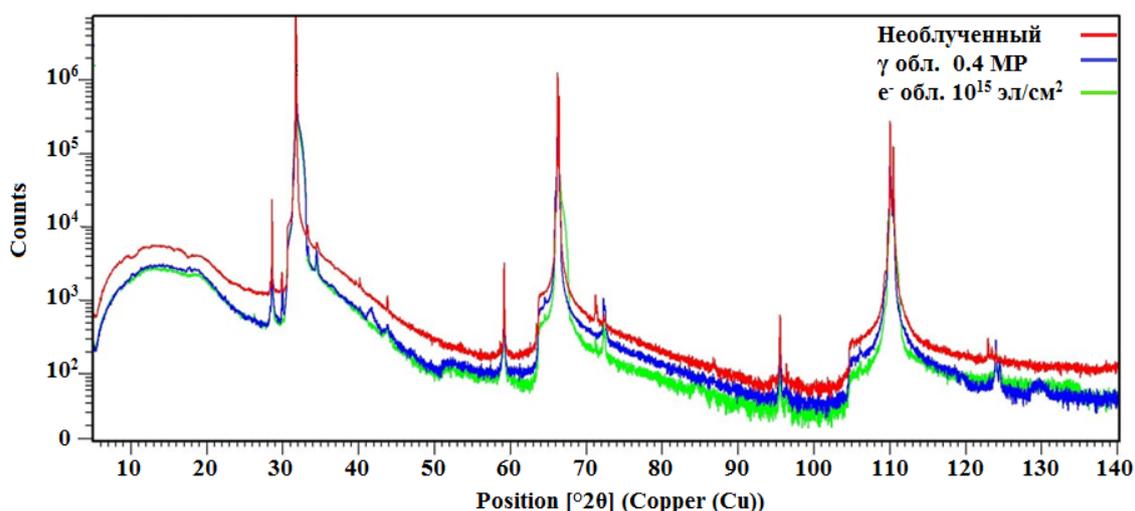


Рис.6. Полные спектры рентгеновской дифракции кристаллов NaCl до и после γ -облучения дозой $4 \cdot 10^5$ Р при 300 К, а также электронного облучения флюенсом 10^{15} эл/см 2 при токе пучка 400 нА/см 2

В таблице 2 представлены структурные параметры, фазовый состав (%) кристаллов NaCl до облучения, после гамма и электронного облучения, а также расчетные размеры наночастиц. Фазовый состав приповерхностного слоя кристалла NaCl даже при сохранении в сухом контейнере с силикагелем содержит 87% оксидных фаз и только 1% Na и 4% Cl $_2$. Этот результат сильно отличается от данных группы Ден Хартога из Бельгии. Также неожиданным оказался состав после минимальной дозы гамма-облучения – восстановление NaCl до 50% и уменьшение кислород-содержащих фаз на поверхности. Последующее облучение приводит к образованию хлор-дефицитной фазы и нанокolloидов NaN, что хорошо подтверждается EDS спектральным

Таблица 2

Фазовый состав (%) исходного, облученного гамма и электронами NaCl

Фаза, содержание %	Простр анстве нная группа	Сингония	Параметры решетки, Å			Раз- мер D, нм	Реф- лекс 2θ _Б , гр.
			a	b	c		
Необлученный							
Na- 1	Im-3m	Куб	4.221	4.221	4.221	28	29.82
NaCl - 6	Fm-3m	Куб	5.453	5.453	5.453	31	28.65
						101	31.18
NaClO ₃ - 47	P213	Куб	6.340	6.340	6.340	66	66.32
Cl ₂ - 4	Cmca	Орторомбик	6.290	4.500	8.210		
HCl - 2	Fm-3m	Куб	5.482	5.482	5.482		
Na ₂ O - 40	Fm-3m	Куб	5.560	5.560	5.560	95	110.12
Облучение гамма квантами ⁶⁰ Со дозой 4·10 ⁵ Р при 300 К							
NaCl - 46	Fm-3m	Куб	5.640	5.640	5.640	71	27.32
						43	31.17
NaH - 8	Fm-3m	Куб	4.890	4.890	4.890	75	45.44
Na ₂ O - 18	Fm-3m	Куб	5.550	5.550	5.550	86	110.02
NaClO ₃ - 5	P213	Куб	6.340	6.340	6.340	28	66.29
NaOH - 22	Bmmb	Орторомбик	3.399	3.399	11.377	32	56.14
Облучения электронами с энергией 5 МэВ флюенсом 10 ¹⁵ эл/см ² при 300 К							
NaCl - 2	Fm-3m	Куб	5.707	5.707	5.707	213	28.61
						188	31.72
NaH - 27	Fm-3m	Куб	4.880	4.880	4.880	126	45.45
NaClO ₃ - 67	P213	Куб	6.570	6.570	6.570	166	66.24
NaOH - 4	Fm-3m	Куб	5.100	5.100	5.100	97	56.14

анализом элементного состава поверхности (смотрите таблицу 3), хотя водород этим методом не детектируется.

Таблица 3

Локальный элементный состав (вес.%) разных участков поверхности кристалла NaCl (второй столбик – стехиометрическое отношение согласно химической формуле) до и после гамма-облучения

Элемент	Локальный элементный состав (вес.%)								Ошибка, %
	NaCl	Необлученный			Доза 10 ⁷ Р		Доза 3·10 ⁷ Р		
Образец	NaCl	12	13	14	10	11	15	16	
Спектры	–								
Na	39.35	44.8	44	44.2	54.6	52.6	52.7	50.9	0.2–0.6
Cl	60.65	55.2	56	55.8	45.4	47.4	44.4	46.3	0.2–0.6
O	–	–	–	–	–	–	2.9	2.8	0.5–0.7

На рисунке 7 показаны профили поверхности до и после γ -облучения. Видно, что шероховатость (по шкале Z) исходной оптической полировки поверхности достигает 650 нм за счет частых наноразмерных каналов и наростов доминирующих кубических фаз NaClO_3 и Na_2O .

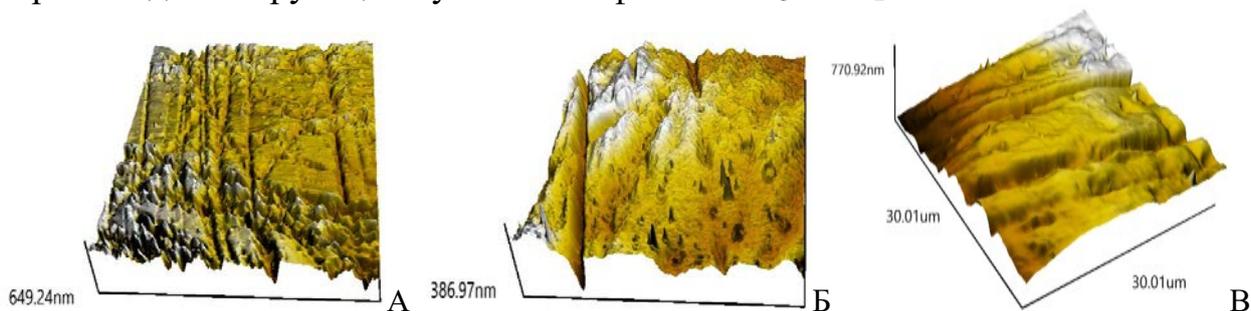


Рис.7 Наноразмерный профиль полированной поверхности кристалла NaCl на площади $30 \times 30 \mu\text{m}$: А- необлученный образец, Б- после γ - облучения дозой $3 \cdot 10^7 \text{ P}$, В- после облучения электронами флюенсом 10^{15} эл/см^2

Самая анизотропная орторомбическая фаза Cl_2 и наноразмерные кубические HCl и Na , по-видимому, расположены в нанобороздках на стенках каналов. После облучения глубина борозд и высота пиков уменьшаются вдвое вследствие радиационно-усиленной диффузии, в результате чего открывается матрица NaCl , а новая фаза NaN формируется в виде остроконечных конусов высотой до 100 нм; нанобороздки углубляются в результате потери хлора (смотрите таблицу 3).

Ранее поверхностные состояния в щелочно-голоидных кристаллах приписывали только сорбированным молекулам газов и коллоидам металла, хотя примесная фаза Na и была обнаружена. Таким образом, экспериментальные результаты EDS, XRD и SPM морфологии поверхности взаимно согласуются и поэтому достоверны. На рисунке 8 показаны спектры поглощения кристаллов NaCl , измеренные по ступеням накопления дозы от $2 \cdot 10^4 \text{ P}$ до $3 \cdot 10^7 \text{ P}$. Расщепление полосы F -центра появляется при дозе $5 \cdot 10^5 \text{ P}$, когда образуются парные $F-F$ центры с электрическим дипольным взаимодействием. Впервые обнаружена выраженная дисперсия вокруг

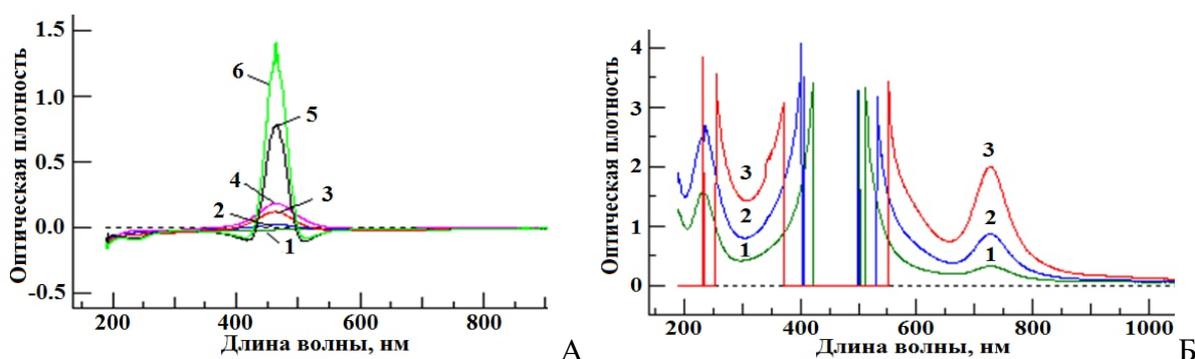


Рис.8. Спектры поглощения кристаллов NaCl : А) 1–необлученный, после малых γ -доз: 2– $2 \cdot 10^4 \text{ P}$, 3– $5 \cdot 10^4 \text{ P}$, 4– 10^5 P , 5– $2 \cdot 10^5 \text{ P}$, 6– $3 \cdot 10^5 \text{ P}$; Б) большие дозы: 1– $7 \cdot 10^5 \text{ P}$, 2– 10^7 P , 3– $3 \cdot 10^7 \text{ P}$

интенсивной полосы поглощения F -центра, которая принимает даже отрицательные значения (смотрите рисунок 8А, спектры 5 и 6). Это означает, что данная полоса света эффективно отражается, что характеризует металлические кластеры на месте вакансий анионов. На рисунке 8 Б видно, что чем выше доза облучения, тем выше концентрация парных центров (категория молекулярных центров), тем ближе расстояния между центрами в каждой паре, тем сильнее межэлектронное взаимодействие и соответственно тем больше расщепление между уровнями. На рисунке 9 представлены спектры поглощения NaCl без учета аппаратного неустранимого шума детектора в диапазоне $2200\text{--}2000\text{ см}^{-1}$. Спектр 1 (смотрите рисунок 9) для необлученного образца показывает хорошо известные интенсивные полосы $3200\text{--}3400$ и $1800\text{--}1400\text{ см}^{-1}$, приписываемые Na-OH, которые уменьшаются после облучения.

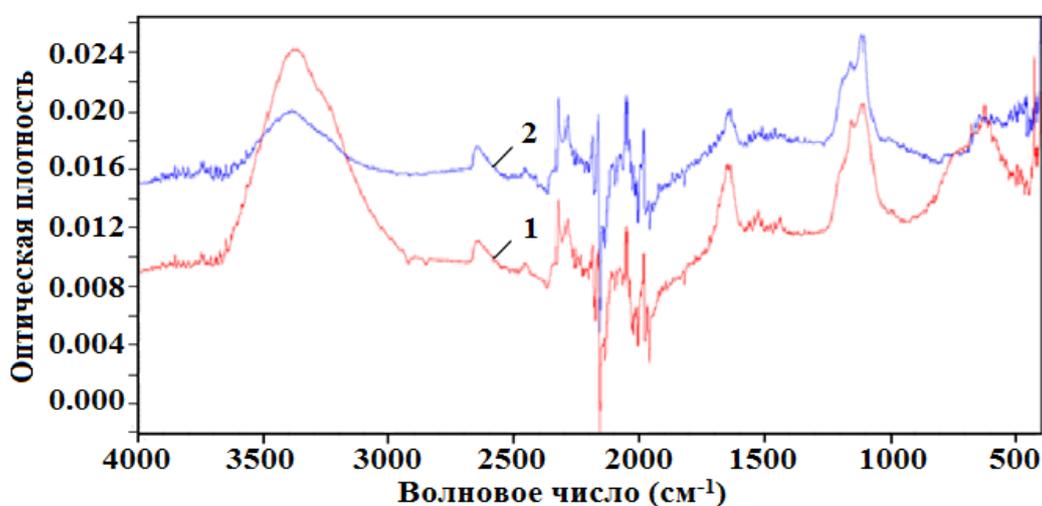


Рис. 9. FTIR-спектры порошка NaCl: 1 – необлученный; 2 – облученный γ -квантами ^{60}Co при мощности 140 P/c на воздухе при 300 К до дозы 10^6 P

Кроме того, интенсивность U-центров (ионы водорода в анионных позициях) при 850 см^{-1} также снижается. В то же время увеличение фонового сигнала объясняется эффектом рассеяния фононов на колеблющихся электронах и связанных протонах на поверхности этих наночастиц, обусловленных присутствием Na-H и металлического Na. Поскольку облучали в условиях замкнутой изолированной системы, за исключением падающего потока гамма-квантов, наблюдаемый фазовый состав на поверхности порошка соответствует (удовлетворяет) поддерживаемому равновесному потенциалу пространственного заряда. Полученные результаты были сопоставлены с данными, приведенными в таблице 2, и оказались согласующимися между собой. В литературе радиационно-наведенные центры окраски обычно приписываются только парам вакансия-междоузельный атом в анионной и катионной подрешетках в объеме и на поверхности. Однако в приповерхностном слое были обнаружены более сложные нанопазы, поэтому следует учесть и их вклад в оптические спектры

в виде рассеяния. На рисунке 10 приведены спектры пропускания, где видны все примесные фазы и их изменения в результате облучения.

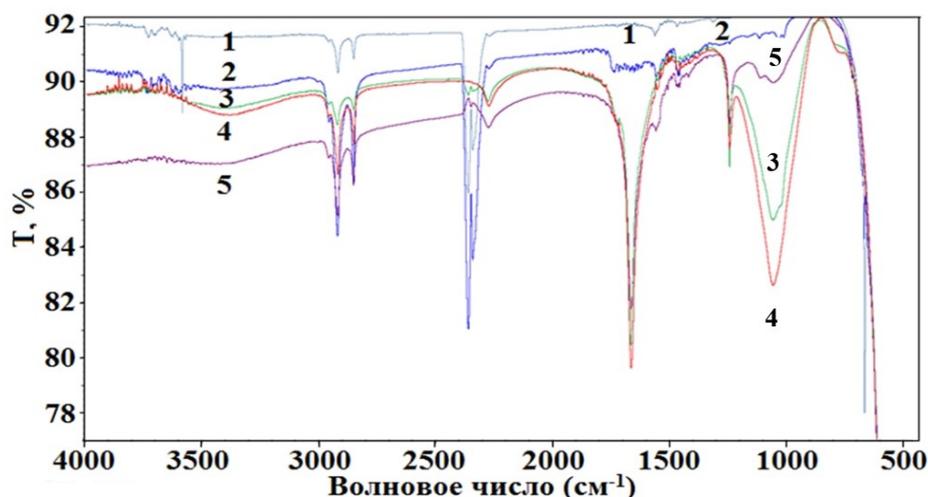


Рис.10. ИК спектры пропускания NaCl необлученного (1) и после гамма-облучения дозами $3 \cdot 10^5$ Р (2), $7 \cdot 10^5$ Р (3), 10^7 Р (4) и $3 \cdot 10^7$ Р (5) при интенсивности 132 Р/с и температуре 300 К, а также после обесцвечивания в процессе релаксации в течение 6 месяцев (3)

Радиационно-индуцированный рост наночастиц Na вызывает интенсивное рассеяние света, описываемое теорией Друде для металлов. Поведение ИК-полос поглощения с увеличением дозы облучения хорошо коррелирует с изменениями элементного и фазового состава поверхности. Под воздействием облучения гидрид натрия распадается, что сопровождается ослаблением соответствующей полосы 2300 см^{-1} . Напротив, интенсивность полосы SiO_2 при 1670 см^{-1} быстро увеличивается при дозах выше 10^6 Р. Вклад NaOH незначителен, но количество Na_2O возрастает. Согласно условию Ферми-резонанса, частоты основных колебательных полос α, l, δ и ν_s в ЦГК находятся в определенных количественных отношениях: NaCl: $2\nu_\alpha(620 \text{ очень узкая и интенсивная}) + \nu_s(1610) = \nu_s(2850) \text{ см}^{-1}$. После облучения исчезают узкие рефлексии OH (3720 см^{-1}) и H_2O (3580 см^{-1}), в отличие от результатов работы [Алексеев П.Д. Оптика и Спектроскопия 1985. – Т.59 (3). –С.567–572.], где ЦГК специально легировали OH-группами и облучали гамма-квантами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе полученных результатов исследования, проведенного по теме диссертации доктора философии (PhD) “Преобразование наноструктур в кристаллах LiF и NaCl при нейтронном, гамма- и электронном облучении” представлены следующие выводы.

1. Для достижения цели и решения поставленных задач были выбраны адекватные современные спектральные и структурные методы, а также микроскопы высокого разрешения. Особо следует отметить EDS систему микролокального элементного анализа, которая позволила измерить разницу

состава треков ядерных частиц и окружающей поверхности кристаллов, решать задачи недоступные другим спектральным методам.

2. Определено, что кроме генерации пар Френкеля, коллоидов Li или Na и агрегатов вакансий F или Cl, происходящих на первом и втором этапах процесса радиолиза (разрушение химических связей, испарение анионов из ионных соединений и самодиффузия катионов с образованием коллоидов), ядерные возбуждения также генерируют электрон-позитронные пары и оставляют продукты, формирующие нанофазы в приповерхностном микрослое. В результате детекторы LiF и NaCl с истекшим сроком годности не могут быть термически восстановлены. Для их восстановления потребуется механическое или химическое удаление пораженного слоя.

3. Установлено, что при γ -дозах от $7 \cdot 10^5$ P в оптических спектрах LiF и NaCl на месте известной полосы изолированного F-центра появляется расщепленный дублет Тамма, обусловленный оптическим резонансным рассеянием на межфазных границах нанометалл-диэлектрик в приповерхностном слое. Найдено предельное расстояние между близкими парами F-F центров: 14.5 в LiF и 20 нм в NaCl. Критерием различения полос поглощения и рассеяния является появление полосы отражения с длиной волны, равной полосе поглощения, а также отсутствие фотообесцвечивания.

4. Обнаружено ослабление полосы продольных (stretching) колебаний связи Na-Cl и Li-F из-за потери Cl и F, в ИК- спектрах идентифицированы колебания дефектных и примесных центров.

5. Впервые на основании экспериментальных данных двух независимых методов (EDS и XRD) исследовано влияние исходной (ростовой) нестехиометрии поверхности монокристалла NaCl и LiF на гамма-радиационно-наведенную нестехиометрию, агрегацию точечных дефектов и рост наночастиц (металл-гидрида или других нанофаз).

6. Доказано, что при γ -облучении на воздухе при 320 K дозами $4 \cdot 10^5 \div 3 \cdot 10^7$ P происходит радиолиз примесных фаз с потерей до 15 вес % Cl, а также O. При малых дозах облучения ($< 10^6$ P) эти фазы преобразуются: $\text{NaClO}_3 \rightarrow \text{NaCl}$ и $\text{Na}_2\text{O} \rightarrow \text{NaOH} \rightarrow \text{NaN}$. При больших γ -дозах ($> 3 \cdot 10^7$ P) фаза NaN (78%) в виде наноконусов становится преобладающей, а фаза NaOH (6%) образует островковую нано пленку на поверхности {100} кристалла NaCl (14%).

7. Полученный гамма-облучением LiF:OH при низкой температуре, препятствующей диффузии смещенных атомов, наноструктурный композит успешно и длительно работает как трехмерная фазовая решетка в пассивном нано-пико-секундном лазерном модуляторе добротности и не подвержен даже лазерному фотообесцвечиванию.

Результаты по образованию гидридов легких щелочных металлов могут быть применены для получения трития, дозиметрии нейтрон-гамма потоков на исследовательских реакторах и объектах ядерной энергетики с использованием соединений лития.

**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

BUZRIKOV SHOVKAT NAXALOVICH

**TRANSFORMATION OF NANOSTRUCTURES IN LiF AND NaCl
CRYSTALS UNDER NEUTRON, GAMMA AND ELECTRON
IRRADIATION**

01.04.07 – Condensed matter physics

**DISSERTATION ABSTRACT
of the doctor of philosophy (PhD) on physical and mathematical sciences**

Tashkent – 2025

The theme of the dissertation of the doctor of philosophy (PhD) on physical and mathematical sciences was registered by the Supreme Attestation Commission of the Ministry of Higher Education, Science and Innovation of the Republic of Uzbekistan under № B2024.4.PhD/FM1197.

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.ziyonet.uz.

Scientific supervisor:	Ibragimova Elvira Memetovna doctor of physical and mathematical sciences, professor
Official opponents:	Baxramov Sadulla Abdullayevich doctor of physical and mathematical sciences, professor, academician Saidakhmedov Kakhraman Khusanovich 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 No.DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 at the Institute of Nuclear Physics (Address: Ulugbek settlement, 100124 Tashkent city. 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 Centre of the Institute of Nuclear Physics (registered under No. _____) Address: Ulugbek settlement, 100124 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. Tojiboev
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 of the Scientific Council
on award of scientific Degrees, D.Ph-M.S., senior researcher

INTRODUCTION (annotation of PhD dissertation)

The aim of the research work is the mechanisms of transformation of nanostructures in optically pure crystals of LiF and NaCl under the influence of pulsed beams of accelerated electrons mixed neutron and gamma fluxes of the reactor and radiation of radionuclides.

The tasks of the research work:

formation of nanoparticles from structural defects of a non-stoichiometric surface layer by irradiation with: neutron fluxes of 10^{14} n/cm²s and γ -quanta of 3700 R/s in the WWR-SM nuclear reactor to fluences of $10^{15} - 10^{18}$ n/cm² and only gamma after shutdown; electron beams with an energy of 5 MeV at beam current density of $0.1 \div 3$ μ A/cm² to doses of $10^{14} - 10^{16}$ el/cm²; with ⁶⁰Co γ -quanta of 1.17 and 1.33 MeV in the dose range of $10^5 - 10^9$ R and dose rates of 100~1000 R/s at 270 and 320 K;

analysis of microprofiles of tracks and growths, local elemental analysis of non-stoichiometry of the initial and irradiated near-surface layer using electron microscopy with energy-dispersive spectrometry;

determination of the structure and phase composition of the near-surface layer before and after irradiation by X-ray diffraction spectra using HighScore, FullProf and PDF-2013 and 2019 databases; calculation of the size of nanoparticles using the Scherrer formula.

identification of infrared absorption and reflection spectra by the vibration frequencies of chemical bonds using the Omnic database depending on the sample thickness, the dose and dose rate of irradiation, and the relaxation time at 300 K after irradiation; determination of impurity phases by IR bands;

distinguishing between color centers and light scattering by nano-inclusions in optical absorption and reflection spectra depending on the sample thickness, orientation relative to the directions of incident radiation fluxes, temperature, dose and dose rate, relaxation time at 300 K after irradiation;

calculation of the concentration of single and paired color centers and the distance between the centers, the size of nanoparticles, by using the formulas of Smakula, Mie and Radchenko;

The objects of the research work are nanoparticles and nanostructures in model ionic single crystals of optical pure and quality LiF and LiF:OH for detectors and laser elements, pure NaCl crystals in the shape of standard IR windows (diameter 35 mm, thickness 4 mm), manufactured at the Leningrad Optical and Mechanical Association (LOMO, Russia).

The subject of the research work is the radiation mechanisms of the formation of nanoparticles and nanostructures on the cleaved and optically polished surface of the ionic crystal matrix with a band gap of 14 eV (LiF) and 8.95 eV (NaCl) under the influence of nuclear radiation and the dependence of optical properties on the structure and composition at the micro- and nanoscale.

Scientific novelty of the research work:

for the first time in the near-surface layer of LiF crystals irradiated with 5

MeV electrons, n and γ fluxes in the reactor, square tracks with sizes of 1-5 μm and impurity phases in the form of nano-hillocks were detected; their number and sizes depend on the impact particle energy and fluence, irradiation temperature;

for the first time a decrease in the cubic lattice parameters by 0.07 nm and the sizes of LiH phase nanoparticles were determined upon irradiation of LiF in the reactor with fluences from $5 \cdot 10^{15}$ to $5 \cdot 10^{17}$ n/cm² as a result of formation of Tritium (beta radioisotope ³H₁) and structural and phase transformation of LiH→LiT;

for the first time in the optical spectra of LiF and NaCl at γ -doses above $7 \cdot 10^5$ R, a split doublet was detected in place of the known band of an isolated F -center, and the limiting distance was determined to be 14.5 nm and 20 nm, respectively, for LiF and NaCl, when the interaction of F - F centers begins with the formation of their F_n aggregates and Li and Na nanoparticles responsible for optical resonance scattering and nonlinear effects;

for the first time, the initial non-stoichiometry of the NaCl surface with a Cl deficiency and the formation of the NaClO₃ nanophase, which grows under gamma and electron irradiation, was determined, therefore, in place of the anion vacancy aggregates, metallic NaH nanophases in the shape of threads, tubercles, tracks are formed and cause strong negative dispersion around the intense absorption band of F -centers;

a radiation-induced mechanism for the formation of nanoparticles and nanostructures in ionic crystals has been established, caused by nuclear and structural-phase transformations initiated by neutron, electron and gamma irradiation.

Implementation of the research results. Based on the obtained results on the transformation of nanostructures in LiF and NaCl crystals under irradiation with mixed flows of neutrons, electrons and γ -quanta:

results on detection of square tracks and impurity phases in the form of nano-hillocks in the near-surface layer of LiF crystals irradiated with electrons, n and γ -radiation fluxes in a reactor; decreasing of the cubic lattice parameters and sizes of LiH phase nanoparticles during irradiation of LiF in WWR-reactor; split doublet in the optical spectra of LiF and NaCl at γ -doses above $7 \cdot 10^5$ R in place of the known band of an isolated F -center; determination of the maximum distance at which the interaction of F - F centers begins with the formation of their F_n aggregates and LiH and NaH nanoparticles; the initial non-stoichiometry of the NaCl surface with Cl deficiency and the formation of the NaClO₃ nanophase, the growth of which under gamma and electron irradiations causes the formation of metallic NaH nanophases in the form of threads, tubercles, tracks were used within the framework of the International Project MIG-41 “Models, methods and digital technologies for creating functional composite and polymeric materials by treating them with concentrated gamma-quantum fluxes in various gas environments” (2021–2023) (Letter of the Perm National Research Polytechnic University, Russian Federation, No. 1167/UNI dated 11/15/2024). Using these scientific results made it possible to identify probable nuclear reactions in light nuclei and explain the mechanism of structural changes resulting in mechanical deformations of modified polymer

composites. The results of the detection of the structural-phase transition $\text{LiH} \rightarrow \text{LiT}$ with lattice compaction after neutron- γ -irradiation of LiF due to α -decay of ${}^6\text{Li}$ were used within the framework of the fundamental project “Nonlinear phenomena, phase transitions and anisotropy of elastic, photoelastic and superionic properties in dielectric and ferroelectric crystals” (2021) of the Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies named after U.A. Arifov of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan (Letter of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan № 2/1255-3270 dated 12/26/2022). The use of scientific results made it possible to determine the effective Gruneisen constants along an arbitrary direction in the main crystallographic planes and surfaces of cubic lithium fluoride crystals.

Structure and volume of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, four chapters, a conclusion, a list of references and contains 110 pages.

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

I bo'lim, (I часть; part I)

1. Бузриков Ш.Н., Муссаева М.А., Ибрагимова Э.М. Электронная микроскопия и локальный элементный состав кристаллов LiF, облученных электронами // Вестник молодых ученых АН РУз. – Ташкент, 2019. – №1(3). – С.36–39 (01.00.00)
2. Ибрагимова Э.М., Бузриков Ш.Н., Искандаров Н.Э., Муссаева М.А. Радиолиз и структурные преобразования поверхности кристалла хлорида натрия при гамма-облучении // Узбекский физический журнал. – Ташкент, 2020. – №.5(22). – С.291–301 (01.00.00. №5)
3. Ибрагимова Э.М., Бузриков Ш.Н., Муссаева М.А., Искандаров Н.Э. Элементный состав и дефекты структуры гамма облученных кристаллов NaCl // Вестник молодых ученых АН РУз. – Ташкент, 2020. – №3–4(4). – С.35–41 (01.00.00)
4. Ibragimova E.M., Buzrikov Sh.N., Mussaeva M.A. Growth of nano structures on surface of NaCl powder under gamma irradiation // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing: United Kingdom, 2021. – Vol.2036. – id. 012016 (№3. Scopus; IF=0.482).
5. Ibragimova E.M., Buzrikov Sh.N., Iskandarov N.E., Mussaeva M.A., Nazarov Kh.T. Growth of Li–B nanocrystals on the surface of LiF laser crystal at ⁶⁰Co gamma-irradiation // Juniper Online Journal Material Science. – Juniper Publishers: USA, 2021. – Vol.6. – No.4. – pp.1–7 (№15. DRJI; IF=1,518).

II bo'lim (II часть; part II)

6. Ibragimova E.M., Buzrikov Sh.N., Iskandarov N.E., Mussaeva M.A., Nazarov Kh.T. Structure–phase transformations in LiF powders and crystals irradiated in nuclear reactor and ⁶⁰Co gamma–source // Materials science. Non–equilibrium phase transformations. – Sofia (Bulgaria), 2021. – Vol.7. – Issue 2. – pp. 60–63.
7. Муссаева М.А., Ибрагимова Э.М., Бузриков Ш.Н. Анизотропия оптического поглощения металлических наночастиц в кристаллах LiF// Сборник тезисов докладов Республиканской научно–практической конференции молодых ученых. 18 декабря 2014. – Ташкент: АН РУз, 2014. – С.43–44.
8. Муссаева М.А., Ибрагимова Э.М., Бузриков Ш.Н. Терморadiационное воздействие на кристаллы LiF // Проблемы физики и роль одаренной молодежи в ее развитии: Материалы Республиканской конференции, 19–20 мая 2017. – Ташкент: НУУз, 2017. – С.43–46.
9. Ибрагимова Э.М., Бузриков Ш.Н., Муссаева М.А., Искандаров Н.Э. Элементный состав и дефекты структуры гамма облученных кристаллов NaCl // Ядерная физика и ядерные технологии: VI Республиканская

- конференция молодых физиков Узбекистана, 1-2 декабря 2020. – Ташкент: ИЯФ АН РУз, 2020. – С.157–167.
10. Ибрагимова Э.М., Бузриков Ш.Н., Муссаева М.А. Рост наноструктур на поверхности порошка NaCl при гамма-облучении // Лазерные, плазменные исследования и технологии: VII Международная конференция, 23-26 марта 2021. – Москва: НИЯУ МИФИ, 2021. – С.211–212.
 11. Ибрагимова Э.М., Бузриков Ш.Н., Муссаева М.А. Структурно-фазовые превращения в кристаллах LiF и LiF:OH, облученных в реакторе ВВР-СМ и ^{60}Co γ -источнике // Атом. Наука. Технологии: I Международная школа-конференция, 14-16 апреля 2021. – Алматы: ИЯФ МЭ РК, 2021. – С.32.
 12. Buzrikov Sh.N., Ibragimova E.M., Iskandarov N.E., Mussaeva M.A. Structural-phase transformations in LiF and NaCl crystals under intensive gamma radiation // “Science and Innovation”: International Conference of Young Scientists. 17 November 2021. –Tashkent: Center for Advanced Technologies, 2021. – pp.325–327.
 13. Ибрагимова Э.М., Бузриков Ш.Н., Муссаева М.А. Структурно-фазовые превращения в кристаллах LiF, облученных нейтронами и гамма-лучами реактора // “Яримўтказгичлар ва полимерлар физикасининг долзарб муаммолари” мавзусидаги Республика илмий-амалий анжумани материаллари, 1 февраль 2022.–Тошкент: ЎЗМУ, 2022. –С.164–167.
 14. Ibragimova E.M., Buzrikov Sh.N., Iskandarov N.E., Mussaeva M.A., Nazarov Kh.T. Structure-phase transformations in LiF crystals initiated by nuclear reactions // Spring Meeting of the European Materials Research Society, Virtual conference. May 30- June 3, 2022. – Strasbourg, France, 2022. –Presentation G.V.2.2
 15. Ибрагимова Э.М., Бузриков Ш.Н., Муссаева М.А. Обнаружение нанофаз из стабильных продуктов ядерных реакций в кристалле фторида лития // Современные проблемы физики конденсированного состояния – «СПФКС-2024»: Тезисы научной конференции, 29 февраля-1 марта 2024. – Бухара: Бухарский инженерно-технологический институт, 2024.– С. 22-26.
 16. Ibragimova E.M., Mussaeva M.A., Buzrikov Sh.N., Iskandarov N.E. Assembling of Ordered Nano-Micro-Structures at Intensive Irradiation of Crystals and Alloys // The third International Forum “Physics-2024”: Book of Abstracts. April 23-25, 2024. Samarkand. – Tashkent: INP, 2024. – pp.61.
 17. Ибрагимова Э.М., Бузриков Ш.Н., Муссаева М.А. Получение трития из фторида лития облучениями в реакторе и ускорителе электронов // «Современные проблемы и перспективы развития физики»: Сборник тезисов международной научно-практической конференции. 22–23 октября 2024. – Наманган: Наманганский государственный университет, 2024. – С. 244–245.