

**ЯДРО ФИЗИКАСИ ИНСТИТУТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ  
ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.02/30.12.2019.ФМ/Т.33.01 РАҚАМЛИ  
ИЛМИЙ КЕНГАШ**

---

**ЯДРО ФИЗИКАСИ ИНСТИТУТИ**

**МУССАЕВА МАЛИКА АНВАРОВНА**

**LiF КРИСТАЛЛАРИДА ВА SiO<sub>2</sub> АСОСИДАГИ ШИШАЛАРДА  
РАДИАЦИОН–ИНДУЦИРЛАНГАН НАНОСТРУКТУРАЛАР**

**01.04.07-Конденсирланган ҳолат физикаси**

**Физика-математика фанлари доктори (DSc) диссертацияси  
АВТОРЕФЕРАТИ**

**Тошкент – 2022**

**Физика-математика фанлари доктори (DSc) диссертацияси  
автореферати мундарижаси**

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

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

<b>Муссаева Малика Анваровна</b> LiF кристалларида ва SiO <sub>2</sub> асосидаги шишаларда радиацион- индуцирланган наноструктуралар.....	3
<b>Муссаева Малика Анваровна</b> Радиационно-индуцированные наноструктуры в кристаллах LiF и стеклах на основе SiO <sub>2</sub> .....	33
<b>Mussaeva Malika Anvarovna</b> Radiation-induced nanostructures in LiF crystals and in SiO <sub>2</sub> based glasses.....	61
Эълон қилинган ишлар рўйхати Список опубликованных работ List of published works .....	67

**ЯДРО ФИЗИКАСИ ИНСТИТУТИ ХУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ  
ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.02/30.12.2019.ФМ/Т.33.01 РАҚАМЛИ  
ИЛМИЙ КЕНГАШ**

---

**ЯДРО ФИЗИКАСИ ИНСТИТУТИ**

**МУССАЕВА МАЛИКА АНВАРОВНА**

**LiF КРИСТАЛЛАРИДА ВА SiO<sub>2</sub> АСОСИДАГИ ШИШАЛАРДА  
РАДИАЦИОН–ИНДУЦИРЛАНГАН НАНОСТРУКТУРАЛАР**

**01.04.07-Конденсирланган ҳолат физикаси**

**Физика-математика фанлари доктори (DSc) диссертацияси  
АВТОРЕФЕРАТИ**

**Тошкент – 2022**

**Фан доктори (DSc) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида B2021.2.DSc/FM180 рақам билан рўйхатга олинган.**

Докторлик диссертацияси Ўзбекистон Республикаси Фанлар академияси Ядро физикаси институтида бажарилган.

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

**Илмий маслаҳатчи:**

**Ибрагимова Эльвира Меметовна**  
физика-математика фанлари доктори, профессор

**Расмий оппонентлар:**

**Мамадалимов Абдугафур Тешабоевич**  
физика-математика фанлари доктори, профессор,  
Ўзбекистон Республикаси Фанлар академияси  
академиги

**Нуритдинов Иззатилло**  
физика-математика фанлари доктори, профессор

**Ташмухамедова Дилноза Артикбаевна**  
физика-математика фанлари доктори, профессор

**Етакчи ташкилот:**

**Фарғона политехника институти**

Диссертация ҳимояси Ядро физикаси институти ҳузуридаги DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 рақамли Илмий кенгашнинг 2022 йил “\_\_\_” \_\_\_\_\_ соат \_\_\_ даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100214, Тошкент ш., Улуғбек қўрғони, ЯФИ; тел. (+99871) 289-31-41; факс (+99871) 289-36-65; e-mail: [info@inp.uz](mailto:info@inp.uz)).

Диссертация билан Ядро физикаси институтининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (\_\_\_\_\_ рақами билан рўйхатга олинган). (Манзил: 100214, Тошкент ш., Улуғбек шаҳарчаси, Ядро физикаси институти. Тел. (+99871) 289-31-19).

Диссертация автореферати 2022 йил “\_\_\_” \_\_\_\_\_ куни тарқатилди.  
(2022 йил “\_\_\_” \_\_\_\_\_ даги \_\_\_ рақамли реестр баённомаси).

**М.Ю. Ташметов**

Илмий даражалар берувчи Илмий кенгаш раиси, ф.-м.ф.д., профессор

**О.Р.Тожибоев**

Илмий даражалар берувчи Илмий кенгаш илмий котиби, ф.-м.ф. PhD

**С.В. Артёмов**

Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш ҳузуридаги илмий семинар раиси ўринбосари, ф.-м.ф.д., профессор

## **КИРИШ (докторлик (DSc) диссертацияси аннотацияси)**

**Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати.** Ҳозирги кунда дунёда самарали катализ, интенсив люминесценция, юқори электр ўтказувчанлиги ва гигант парамагнетизм каби ноёб функционал хусусиятларга эга наноструктуралар материаллар тадқиқига катта эътибор берилмоқда. Улар учта ходисага: нанозаррада атомлар сони  $10^3$ – $10^6$  оралиғида бўлганда сиртнинг ҳажмга нисбати юқори қийматга эга бўлиши, ички ва ташқи квант-ўлчамли эффектлар, ҳамда диэлектрик муҳитда металл нанозарралар ичидаги (сирт плазмон резонанси) ва улар орасидаги кучли электродинamik ўзаро таъсирларга асосланади.

Жаҳонда диэлектрик матрицалардаги турли хил шаклга эга бўлган электр ўтказувчан нанозарраларнинг пайдо бўлиши ва ўзаро таъсир механизмларини, шунингдек, нанометалл-диэлектрик интерфейсларидаги жараёнлар механизмини аниқлаш нанофизиканинг долзарб муаммосидир. Турғун функционал наноструктураларни яратиш нанотехнологиялар соҳаси ривожига муҳим аҳамиятга эга.

Республикада ядровий ва қайта тикланадиган энергетика ривожлантирилмоқда ва унинг ривожини учун янги наноструктуралар материалларини яратиш технологиялари ишлаб чиқилмоқда. Шунинг учун диэлектрик кристалларда ва шишаларда енгил ва оғир металллар нанозарраларини ўрганиш ҳамда радиацион майдонларда ишлашга мўлжалланган, фазавий таркиби ва хусусиятлари радиацион технологиялар асосида назорат қилинадиган нанокомпозитлар ишлаб чиқиш долзарблик касб этади. 2017–2021 йилларда Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегиясида<sup>1</sup> бу каби фундаментал тадқиқотлар ва ишланмаларга устувор аҳамият қаратилган.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2013 йил 1 мартдаги ПФ-4512-сон “Муқобил энергия манбаларини янада ривожлантириш чоратадбирлари тўғрисида”, 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сон “2017–2021 йилларда Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси” тўғрисида фармонлари, 2017 йил 17 февралдаги ПҚ-2789-сон “Фанлар Академияси фаолияти, илмий-тадқиқот ишларини ташкил этиш, бошқариш ва молиялаштиришни янада такомиллаштириш бўйича чоратадбирлар тўғрисида”ги қарорлари ҳамда ушбу соҳадаги бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишда ушбу диссертация тадқиқоти муайян даражада хизмат қилади.

**Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги.** Мазкур тадқиқот Республика фан ва

---

<sup>1</sup>Ўзбекистон Республикаси Президентининг «2017–2021 йилларда Ўзбекистон Республикасини ривожлантиришнинг бешта устувор йўналиши бўйича Ҳаракатлар стратегияси» тўғрисидаги 2017 йил 7 февралдаги № ПФ-4947-сон Фармони.

технологиялари ривожланишининг II. «Энергетика, энергия ва ресурс тежамкорлиги» устувор йўналишига мувофиқ бажарилган.

**Диссертация мавзуси бўйича хорижий илмий тадқиқотлар шарҳи<sup>2</sup>.** LiF сингари ишқорий-галоид кристаллари асосида кўп мақсадларда фойдаланиш учун мўлжалланган янги оптикавий материаллар яратиш бўйича тадқиқотлар дунёнинг етакчи илмий марказларида ва олий таълим муассасаларида, шу жумладан: Физика институти ва Тарту университети (Эстония), Давлат оптика институти, Томск политехника университети (Россия), Евроосиё миллий университети (Қозоғистон), Криворожск миллий университети ва Монокристаллар институти (Украина), Политехника университети (Франция), Oak Ridge миллий лабораторияси (АҚШ), "Ла Сапиенца" университети (Италия) ва бошқа муассасаларида олиб борилади.

Радиация таъсирига чидамли шишалар, турли таркибдаги шишаларнинг радиациявий бўялиши бўйича ишланмалар Оптикавий материалшунослик илмий тадқиқот ва технологик институти ва Давлат оптика институти, А.Ф. Иоффе номидаги Физика-техника институти, Силикатлар кимёси институти, Москва давлат университети, РФА Физика институти, Урал давлат техника университети (Россия), Қаттиқ жисмлар физикаси институти (Латвия), Беларусия МА физика институти (Минск), Сизуока университети (Япония), Бхаби Атом тадқиқотлари маркази (Ҳиндистон), Oak Ridge миллий лабораторияси (АҚШ), Фраскати тадқиқот маркази (Италия), ядровий институтлар (Германия), Қаттиқ жисмлар физикаси институти (Хитой) ва бошқа муассасаларда олиб борилади.

Қаттиқ, газсимон ва суюқ муҳитлардаги коллоид ва наноўлчамли системаларнинг физикавий хусусиятлари тизимли тарзда ўрганилган, улар структуравий элементларининг геометрик шакли ва ўлчамларига кўра таснифланади. Модель ишқорий-галоид кристаллар ва силикат шишалар мисолида энергетик спектрларида фарқ бўлганлиги туфайли нанозарраларнинг структуравий, оптикавий ва электрик хусусиятлари ҳажмий бирикмалардагидан фарқ қилиши кўрсатилган.

Бугунги кунда дунёнинг кўпгина мамлакатларида ядро-физикавий ва энергетик қурилмаларнинг фаолият кўрсатишларини таъминлаш учун ядровий энергетиканинг устувор йўналишларидан бири – радиацион материалшунослик бўйича, жумладан, наноматериаллар асосида ионлаштирувчи нурлар майдонида ишончли ишлайдиган асбоб ускуналар, радиация таъсирига чидамли ва радиацияга сезгир материаллар, қаттиқ жисм материалларни модификация қилишнинг радиациявий технологияларини ишлаб чиқиш бўйича кенг қамровли ишлар олиб борилмоқда.

**Муаммонинг ўрганилганлик даражаси.** LiF ишқорий-галоид ионли кристалларининг структурасини ва кварц ҳамда силикат шишаларининг

---

<sup>2</sup>Диссертация мавзуси бўйича хорижий илмий ишлар шарҳи: <http://journals.ioffe.ru>; <https://elibrary.ru>; <https://www.springer.com>; <https://www.journals.elsevier.com>; <https://journals.jps.jp>; <https://ur.booksc.eu>; <https://www.rsc.org>; <https://iopscience.iop.org>; <https://www.sciencedirect.com>; <https://www.tandfonline.com>; <https://www.semanticscholar.org> ва бошқа манбалар асосида амалга оширилди.

оптикавий хусусиятларини ўрганиш бўйича дунёнинг етакчи илмий марказларидаги кўплаб олимлар, масалан, россиялик (И.П. Суздалев, В.В. Климов, А.И. Гусев, А.А. Воробьев, Е.В. Колонцова, Е.Ф. Мартынович, Е.А. Раджабов, В.М. Лисицын, Л.А. Лисицына, В.М. Рейтеров, Б.Д. Лобанов, А.Ф. Зацепин, Р.А. Андриевский, В.В. Варгин, Г.В. Бюргановская, Н.Ф. Орлов, В.С. Кортон, Г.О. Карапетян, А.В. Амосов, Г.Т. Петровский, С.М. Бреховских, В.П. Пух, В.А. Тюльнина, Л.М. Ланда), латвиялик (К.К. Шварц, Е.А. Котомин, А.И. Попов, Ю.А. Экманис, А. Силинь), эстониялик (Ч.Б. Лущик, А.Ч. Лущик), украиналик (И.С. Радченко, Г.Г. Бондаренко), грузиялик (Э.Л. Андроникашвили, М.Г. Абрамишвили), белорусиялик (Ф.Ф. Комаров, О.Н. Билан, Н.Г. Черенда, Д.М. Юдин), германиялик (G. Mie, U. Kreibig, H. Gleiter, C. Trautmann), америкалик (F.W. Clinard, J.R. Hobbs, H. Gao, M.V. Fleischer, P. Wiks, D.L. Griscom, K. Strauda, D. Mackey), япониялик (K. Kubo, Y. Akashi, Y. Yoneda, N. Itoh, R. Yokota, A. Beshey, N. Sogi, M. Tashiro, S. Saki), франциялик (F. Beuneu), буюк британиялик (T. Young, M. Stoneham), италиялик (G. Baldacchini, R.M. Montekali), козоғистонлик (А.Т. Акилбеков, А.К. Даулетбекова), ўзбекистонлик (акад. Стародубцев, акад. Ш.А. Вахидов, акад. П.К. Хабибуллаев, акад. М.С. Юнусов, акад. У.Х. Расулев, акад. М.Х. Ашуров, акад. А.Т. Мамадалимов, Б. Каипов, Э.М. Гасанов, Э.М. Ибрагимова, Б.Л. Оксенгендлер, С. Джуманов, И. Нуритдинов, Ж.Д. Ибрагимов, И.Х. Абдукадырова, М.И. Муминов, С.С. Касимова, М.А. Касымджанов, Б.Е. Умирзаков, Н.Н. Тураева, Д.А. Ташмухамедова, Г. Абдурахманов, Б.Г. Атабаев) ва бошқа мутахассислар томонидан тадқиқотлар олиб борилмоқда.

Ҳозирги вақтда LiF кристаллари ультрабинафша соҳадаги оптикавий материал сифатида ҳам тажрибаларда, ҳам назарий жиҳатдан етарлича батафсил тадқиқ қилинган. Ионлаштирувчи нурлар таъсирида LiF да хона ҳароратида юқори даражада люминесценция чиқишга эга бўлган турли хил турғун бўялиш марказлари топилган, Li нинг радиодозиметрик материал сифатида, лазер асбобшунослигида фаол муҳит ва пасив затвор сифатида қўллаш, юқори чизиқли бўлмаган фотосезгир муҳит ва у асосида ахборот ташувчи, диффракцион панжара, фаол нуртолалар ва бошқа оптикавий элементлар яратиш имкониятлари мавжудлиги аниқланган. Экситонларнинг нуқтавий ва агрегат нуқсонларга парчаланиши концепцияси ҳукмронлик қилади. Нурлантиришдан кейин тажрибада олинадиган оптикавий спектрлар электрон ўтишларга боғланади, металл коллоидлар томонидан сочилиш эса фақат назарий жиҳатдан ифодаланади холос. Массив шишаларда нуқсонлар ҳосил бўлиши ва турғунлашуви, шунингдек (квазибирўлчамли) нуртолалардаги ютилиш ушбу концепцияга кўра аниқланади. Шиша матрицаси таркибида баъзи шароитларда ўтаўтказувчанлик хусусиятларига эга бўладиган қурғошинли микро- ва нанотолалар ўта юқори амалий аҳамиятга эга.

Айни пайтда ўз ечимини топмаган айрим муаммолар ҳам мавжуд, буларга қуйидагиларни киритиш мумкин. Ишқорий-галоидли кристалларда ва диэлектрик шишалардаги металл коллоидлари ва нанозаррачаларини тавсифловчи назария нурлантиришда пайдо бўладиган бўялиш марказларини

ўз ичига олувчи тажрибаларда ўзининг адекват тасдиғини топганича йўқ. Ҳалигача нурлантирилган ёки аддитив бўялган ишқорий-галоид кристалларнинг оптикавий спектрларида анион вакансияларининг зарядланган агрегатлари ва металл калоидлари қатъий аниқланган эмас. Диэлектрик кристалл ёки шиша матрицаларида нанометалл интерфейсларнинг хоссалари етарлича ўрганилган эмас: нанозаррачаларнинг кристалл структураси ва морфологияси (ўлчамлари ва шакли) ҳамда нурлантирилган нанокөмпозитларнинг электрон структураси (оптикавий спектрлари ва электр ўтказувчанлиги) нинг ўзаро алоқадорлиги, турли ионлантирувчи нурлар параметрларининг кристалл ва шиша матрицаларида ҳосил бўлиши мумкин бўлган нанофазага киритмаларга таъсири комплекс равишда ўрганилмаган.

**Диссертация тадқиқотининг диссертация бажарилган илмий-тадқиқот муассасаси илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги.** Диссертация тадқиқоти Ўзбекистон Республикаси Фанлар академияси Ядро физикаси институти илмий-тадқиқотлар режасининг Ф-2.1.2 "Термо-нурланиш таъсирида кўп компонентли стехиометрик бўлмаган материалларнинг тузилиши, электрофизик, магнит ва механик хусусиятлари" (2003–2007); 4-04 "Реакторнинг гамма нурланишидан кейин LiF, ZnSe кристалларининг тузилиши ва оптик хусусиятларининг ўзгариши" (2004–2005); 2-06 "Наноструктураларнинг радиациявий шаклланиши" (2006–2007); А5-049 "Қимматбаҳо ва ярим қимматбаҳо тошлар ранги ва сифатини ошириш мақсадида уларни нурланиш билан ишлов бериш усуллари ишлаб чиқиш" (2006–2008); ФА-Ф2-Ф068 "Наноструктурали материалларнинг радиацион муҳандислиги" (2008–2011); ФА-Ф2-Ф120 "Кичик ўлчамли юқори ҳароратли суперўтказувчилар, яримўтказгичли гетероструктуралар, металллар ва улар оксидларининг электрон хоссалари ва нурланиш модификацияси" (2012–2016); ОТ-Ф2-26 "Электронлар дастасида функционал нанотизимларнинг шаклланиш механизмлари" (2017–2020) мавзусидаги илмий лойиҳалари доирасида бажарилган.

**Тадқиқотнинг мақсади** ядровий нурлар ва зарядланган заррачалар дастаси таъсирида ковалент ва ионли кимёвий боғланган модель диэлектрик кристалл ва шиша матрицаларда нанозаррачалар ва наноструктуралар ҳосил бўлиш механизмларини аниқлашдан иборат.

**Тадқиқотнинг вазифалари:**

ишқорий галоид кристаллари ва шиша матрицаларида ҳаво муҳитида  $^{60}\text{Co}$  гамма-квантлари ҳамда ВВР-СМ реакторининг нейтрон ва гамма нурларининг аралаш оқими билан, шунингдек вакуумда тезлаштирилган протонлар ва ҳавода электронлар дастаси билан узоқ муддатли нурлантириш натижасида нанозарраларни самарали яратиш шароитларини (зарралар турини, энергиясини, оқимини, флюенсини) аниқлаш;

LiF кристалларидаги Li нанозаррачаларининг, SiO<sub>2</sub> матрицасидаги оғир металлларнинг (Ba, Pb) киритма фазаси нанозарраларининг ва улар оксидларининг кристалл тузилишини, ўлчамларини, шакллари ва ориентацияларини аниқлаш;

кристал ва шишаларнинг нурлантирилган юзалари элементар таркибининг локал микро- ва нано-нестехиометриясини белгилаш;

LiF кристаллари ва SiO<sub>2</sub> шиша матрицаси сирт ости қатлами микро-каттиқлигининг Li нанозарралари ва оғир метал (Ba, Pb) асосидаги аралашма фазаси нанозаррачаларининг параметрларига боғлигини аниқлаш ва ушбу қатлам чуқурлигини баҳолаш;

дозага боғлиқ ҳолда тўлқин узунлиги бўйича силжийдиган экстенция (ютилиш+сочишиш) полосасини аниқлаш ва нанозарралар катталиги ва ўлчамларини баҳолаш;

нурланишдан олдинги ва ундан кейинги оптикавий ютилиш, фото- ва гаммалюминесценция, қайтариш ва ўтказиш спектрлари бўйича электрон структуралар сатҳларининг энергияси ва уларнинг электронлар билан тўлдирилиш даражасини аниқлаш;

гамма нурлари ва электронлар билан нурлантирилгандан сўнг куб шаклидаги LiF кристалларида носферик, кичик ўлчамли металл нанозарраларнинг оптик ютилиши анизотропиясини уч томондан аниқлаш;

LiF кристалли ва SiO<sub>2</sub> шишасининг (Мотт координаталаридаги) сирт электр ўтказувчанлигига энг енгил Li ва оғир (Ba, Pb) металлари асосидаги нанозаррачаларнинг ўлчамлари/шаклининг таъсирини аниқлаш ва сакраш активация энергиясини ҳисоблаш.

**Тадқиқотнинг объекти** сифатида ион боғланишли юқори сифатли модель LiF монокристалларидаги, ковалент боғланган юқори тозаликдаги кварц (SiO<sub>2</sub>) ва легирланган (SiO<sub>2</sub>-Na,K,Ba), (SiO<sub>2</sub>-PbO) биллур шишаларидаги нанозарралар ва наноструктуралар олинган.

**Тадқиқотнинг предмети** ядровий нурланиш ва тезлаштирилган зарядланган зарралар дасталари таъсирида ион боғланишли кристалл ва шиша диэлектрик матрицаларда 0-1-2-3 ўлчамли нуқсонлардан нанозаррачалар ва наноструктуралар ҳосил бўлиш механизмлари ҳамда микро- ва наноўлчамли масштабда улар хоссаларининг структура ва таркибга боғлиқлиги ташкил этади.

**Тадқиқотнинг усуллари.** Элементар таркибнинг рентген-флюоресцент таҳлили, структура ва фазавий таркибни рентген-диффракцион таҳлил қилиш; инфрақизил ва электрон микроскопия, оптикавий ва инфрақизил (ИК) қайтариш, микрокаттиқлик, электр ўтказувчанлиги каби сиртий-сезгир усуллар комплекси, шунингдек гаммалюминесценция, фотолюминесценция, ютилиш ва ўтказиш режимларидаги оптикавий ва ИҚ спектроскопия каби ҳажмий усуллардан фойдаланилди.

**Тадқиқотнинг илмий янгилиги** қуйидагилардан иборат:

LiF ни 10<sup>8</sup> Р дан катта дозаларда гамма-квантлари ва флюенси 10<sup>17</sup> см<sup>-2</sup> гача бўлган электронлар билан нурлантирилганда электр ўтказувчи параллел микротолалар (γ-билан нурлантирилганда) ва алоҳида оролчалар кўринишидаги (4 МэВ ли электронлар билан нурлантирилганда) Li нанозарралари ҳосил бўлиши, тўхтатилган реакторда гамма-нурлари билан нурлантирилганда эса LiOH киришма нанофазасининг кўпайиши аниқланган, улар F<sub>4</sub><sup>+</sup> марказларининг гамма люминесценцияси интенсивлиги ошишига ва

Li-нанометалл-LiF-диэлектрик интерфейсида термостимуллашувчи нур чиқарувчи рекомбинация ҳиссасининг ортишига олиб келади;

рангсиз LiF кристалларидан LiOH киришма нанофазаси ҳосил бўлишини (сегрегациясини) ҳисобга олган ҳолда  $10^4$ – $10^5$  Гр ораликда тўхтатилган реактор  $\gamma$ -нурларининг ютилган дозасини ўлчовчи оптикавий детектор сифатида фойдаланиш таклиф этилган;

биринчи марта SiO<sub>2</sub> тоза шишада кристобалит, таркибида барий бўлган шишаларда BaO ва BaSiO<sub>3</sub> нанокристаллари кўшимчалари аниқланган, уларнинг радиация билан индуцирланган ўсиши ҳамда сиртқи мустаҳкамлашга ва микроқаттиқликни ўзгаришига олиб келувчи асосий жойлашуви топилган;

таркибида ишқорий металл киришмаси, Ba ва Pb оксидлари бўлган силикат шишаларини гамма-квантлар ҳамда 4 ва 8.5 МэВ ли электронлар билан нурлантириш турғун бўялиш марказлари ҳосил бўлишига, ютилиш чегарасининг қизил силжишига, ўлчамлари шиша тўри сиқилишининг чекланганлиги билан боғлиқ бўлган 15 дан 30 нм гача бўлган нанозарралар ҳосил бўлишига олиб келиши кўрсатилган;

$\gamma$ -нурлантиришдан кейин кварц шишасида дозиметрияда уларни эътиборга олиш лозим бўладиган, ўлчамлари 8 дан 30 нм гача етадиган  $\alpha$ -кварц, кристобалит, тридимит нанокристаллитлари, хрусталларда молекуляр PbO ва BaO, силикат шишаларида - BaO<sub>2</sub> ва BaSiO<sub>3</sub> перовскит нанокристаллитлари аниқланган бўлиб, шишалардаги оптикавий спектрларнинг ўзгаришлари сегрегация туфайли икки қаватли электрик қатлам ҳосил бўладиган металл-диэлектрик интерфейсидаги нанозарраларнинг индуцирланган қутбланиши билан боғлиқ эканлиги кўрсатилган;

тоза кварц шишасини реакторда сув ичида  $10^{19}$  см<sup>-2</sup> дан катта флюенсларда тез нейтронлар билан ва вакуумда  $>5 \cdot 10^{15}$  см<sup>-2</sup> флюенсли протонлар билан нурлантиришда силжиш термопиклари пайдо бўлиши ва улар ультрабинафша (УБ) ютилишида маълум электрон ва ковак марказларга кўшимча катта интенсивликдаги резонансларни келтириб чиқариши аниқланган;

эритилган кварц ёрдамида нейтронлар иштирок этган/этмаган ҳолда реакторнинг гамма нурлари оқимининг алоҳида дозиметриясини амалга ошириш усули таклиф этилган.

**Тадқиқот амалий натижалари** қуйидагилардан иборат:

биринчи бўлиб илмий тадқиқотлар ва қаттиқ жисмларни радиацион модификациялаш технологияларини ишлаб чиқиш учун радиоактивликни келтириб чиқармаган ҳолда тўхтатилган реакторнинг кенг энергетик спектрига эга бўлган  $\gamma$ -нурларидан фойдаланиш таклиф қилинган;

$10^4$ – $10^5$  Гр ютилиш дозаси оралиғида сертификатланган квазитурғун <sup>60</sup>Co  $\gamma$ -нурлари манбаида даражаланган оптик детекторлар (LiF кристаллари ёки SiO<sub>2</sub>–BaO шишалари) ёрдамида тўхтатилган реакторнинг  $\gamma$ -нурланиши интенсивлигини ( $\sim 26$  Гр/с) ўлчаш методикаси ишлаб чиқилган;

ядро реакторининг ёқилғини сақлашнинг нам омборхонасида ионлаштирувчи нурланишнинг 0.6 Гр/с квазитурғун оқими аниқланиб, ундан материаллар/маҳсулотларни герметик қадоқда стериллаш учун фойдаланиш мумкинлиги асосланган.

**Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги** ўзаро бир-бирини тўлдирувчи замонавий ва исботланган сирт-сезгир аналитик усуллар комплексининг қўлланиши, катта статистика ва ўлчовларнинг яхши такрорланувчанлиги билан тасдиқланиши, нанотузилмалар ва нанозаррачалар физикасининг умумий физик тушунчаларига, диэлектрикларнинг зарядланган зарралар, нейтронлар ва гамма нурлари билан ўзаро таъсирига, уларни физик назариялар, қонунлар ва моделлар билан таққослаш натижалари ва хулосаларига зид келмаслиги билан асосланган.

**Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти.** Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти тизимли равишда турли ўлчамдаги радиацион нуқсонлардан радиолиз ва сегрегация орқали нанозаррачаларнинг пайдо бўлиши механизми систематик комплекс ўрганилганлигида, конденсирланган ҳолат физикасидаги наноструктуралар ва наноматериаллар радиацион физикаси йўналишини ривожлантириш учун фойдали ахборотлар олинганлигидадир.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти уларнинг замонавий литийли аккумуляторлари учун нано- ва микроструктуралашган электродлар, нанозаррачали сцинтилляторлар ва рентген детекторлари ишлаб чиқаришда қўлланиш истиқболи мавжуд эканлигидадир.

**Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши.** LiF кристаллари ва SiO<sub>2</sub> асосидаги шишаларда радиация билан индуцирланган наноструктураларни тадқиқ қилиш бўйича олинган натижалар асосида:

LiF ни гамма-квантлари билан нурлантирганда электр ўтказувчи параллел микроканаллар кўринишида, 4 МэВ ли электронлар билан нурлантирганда алоҳида оролчалар кўринишида Li нанозарралари ҳосил бўлиши, тўхтатилган реакторда гамма-нурлари билан нурлантирилганда эса LiOH киришма нанофазасининг ўсиши хорижий тадқиқотчилар томонидан фойдаланилган (халқаро журналларда ҳаволалар: Technical Physics Letters, 2019. vol.45. No.7. pp. 679–682; Physical Chemistry Chemical Physics, 2021. 23(17) pp.10384–10394; Scientific Reports, 2016. 6:25435. pp.1–6). Илмий натижаларнинг қўлланилиши LiF-Mg ва Ti асосидаги термолюминесцент дозиметрда кечадиган радиацион ҳодисаларни, ҳамда LiCl-Li эритмадаги Li кластерлари ҳосил бўлишини тушинтиришга имкон берган;

рангсиз LiF кристалларидан LiOH киришма нанофазаси ҳосил бўлишини ҳисобга олган ҳолда тўхтатилган реактор  $\gamma$ -нурларининг  $10^4$ – $10^5$  Гр оралиқдаги ютилган дозасини ўлчовчи оптикавий детектор сифатида фойдаланиш таклиф этилганлиги,  $\gamma$ -нурлантиришдан кейин кварц шишасида  $\alpha$ -кварц, кристобалит, тридимит нанокристаллитлари, хрусталларда молекуляр PbO ва BaO, силикат шишаларида - BaO<sub>2</sub> ва BaSiO<sub>3</sub> перовскит нанокристаллитлари аниқланганлиги, шишалардаги оптикавий спектрларнинг ўзгариши икки қаватли электрик қатлам ҳосил бўладиган металл-диэлектрик

интерфейсдаги нанозарраларнинг индуцирланган қутбланиши билан боғлиқ эканлигининг кўрсатилиши ЎзР ФА Ядро физикаси институтидаги “Тадқиқот ядро реактори” ноёб илмий объектида катта дозалар дозиметриясида ҳамда ФА-А3-Ф004 “ЎзР ФА ЯФИ даги ВВР-СМ тадқиқот реактори ёқилғи циклини оптималлаштириш ва параметрларини назорат қилиш” (2018–2020), ФА-А14-Ф062 “ВВР-СМ реакторининг кам бойитилган ёқилғига ўтишдан кейин реактор параметрларини яхшилаш” (2009–2011) амалий лойиҳалари доирасида фойдаланилган (Ўзбекистон Республикаси Фанлар Академиясининг 2020 йил 30 июндаги №31-2115-376-сонли хати; Патент ЎзР № IAP 2009 0114 дан 23.04.2009. 2010. №4 (108). с.13.). Илмий натижаларининг қўлланилиши ВВР-СМ реакторидаги барча вертикал каналлар учун нейтронлар оқими ва унга ҳамроҳ бўладиган гамма-нурланишнинг ҳисобланган қийматини дозиметрик характеристикаларининг экспериментал қийматлари билан таққослаш ва нурлантириш вақти ва дозасини ўлчаш аниқлигини ошириш, шунингдек реакторда нурлантирилган табиий қимматбаҳо тошларнинг сифатини ошириш технологиясини ишлаб чиқишга имкон берган;

$\text{SiO}_2$  тоза шишада кристобалит, таркибида барий бўлган шишаларда ВаО ва  $\text{BaSiO}_3$  нанокристаллари қўшимчаларининг аниқланганлиги, уларнинг радиация билан индуцирланган ўсиши ҳамда сиртни мустаҳкамлашга ва микроқаттиқликни ўзгаришига олиб келувчи йўналтирилган жойлашувининг топилганлиги хорижий тадқиқотчилар томонидан фойдаланилган (халқаро журналларда ҳаволалар: *Glass Physics and Chemistry*, 2015. vol. 41. No. 4. pp. 385–388; *Strength of Materials*, 2011. vol. 43. No.1. pp.109–112; *Prog. Photovolt: Res. Appl.* 2004. 12:569–572). Илмий натижаларнинг қўлланилиши катта дозаларда электронлар билан нурлантиришнинг плёнкаларнинг структураси ва таркибига, нейтронлар билан нурлантиришнинг эса кварц панжарасининг ҳажмий кенгайишига таъсирини, гамма-нурлантиришдан кейин аморф  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  нинг чегарасида тажрибада топилган оксидланиш ва диспропорционаллашишни, термик ишлов беришнинг кварц шишасининг микроқаттиқлигига таъсирини, реактор нурланишининг САВ-1 русумидаги авиаллар микроқаттиқлигига таъсирини тушунтиришга имкон берган;

эритилган кварц ёрдамида нейтронлар иштирок этган/этмаган ҳолда реакторнинг гамма нурлари оқимининг алоҳида дозиметриясини амалга оширишнинг таклиф этилган усули “Курчатов институти” ИТМ нинг тажриба базасидаги қуввати 0.1–300 кВт бўлган ОР тадқиқот ядро реакторининг тажриба каналидаги метрологик тадқиқотлар учун фойдаланилган (халқаро журналларда ҳаволалар: *Measurement Techniques*, 2021, vol. 64, pp. 244–249; *Journal of Nuclear Materials*, 2013, vol.443. pp.393–397; *Journal of Advanced Concrete*, 2018, vol. 16. Issue 5. p.191–209). Илмий натижаларнинг қўлланилиши ОР реакторида ўрнатилган режимда ҳамда ортиш ва камайиш режимларида нурлантирганда гамма-нурларнинг ютилиш дозаси улушини аниқлашга имкон берган.

**Тадқиқот натижаларининг апробацияси.** Диссертация ишининг асосий натижалари 25 та Халқаро ва Республика илмий конференцияларида маъруза қилинган, ҳамда муҳокама этилган.

**Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги.** Диссертация мавзуси бўйича жами 48 та илмий иш, жумладан, 1 та патент, Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг асосий илмий натижаларини чоп этиш тавсия этилган нашрларда 22 та илмий мақола, шулардан 15 таси хорижий журналларда чоп этилган.

**Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми.** Диссертация таркиби кириш, бешта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхати ва иловалардан иборат. Диссертация ҳажми 225 бетни ташкил этади.

## ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

**Кириш** қисмида ўтказилган тадқиқотнинг долзарблиги ва зарурати асосланган. Тадқиқотларнинг республикада илм-фан ва технологияларни ривожлантиришнинг асосий устувор йўналишлари билан алоқаси кўрсатилган. Муаммони ўрганиш даражаси муҳокама қилинган, мақсад ва вазифалар шакллантирилган, объектлар танланган, тадқиқот мавзуси аниқланган ва тадқиқот усуллари тавсифланган. Илмий янгилик таъкидланган, олинган натижаларнинг ишончлилиги асосланган. Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти қайд этилган. Ишнинг апробацияси, шунингдек, диссертациянинг ҳажми ва тузилиши тўғрисида қисқача маълумот берилган.

Диссертациянинг **"LiF кристалларидаги ва SiO<sub>2</sub> асосидаги шишаларда нанозарраларнинг физик-кимёвий хусусиятлари тўғрисида адабиётларни кўриб чиқиш"**, деб номланган биринчи бобида нанозарралар ва наноструктураларнинг экспериментал ва назарий тадқиқотлари бўйича адабиётлар таҳлил қилинган. Литийнинг нанозаррачалари ва коллоид эритмаларини турли хил муҳитда олиш усуллари бағишланган ишлар таҳлил қилинган. Ҳозиргача бўялиш ва нурланиш марказлари радиация таъсирида ҳосил бўладиган нуқтавий нуқсонлар билан боғлиқ эканлиги таъкидланиб, улар нурлантириш шароитга кўра ҳажм бўйлаб бир текис ёки заррача ҳаракати йўналиши бўйлаб бирор концентрация градиенти билан тақсимланади, деб ҳисобланиб келинган. Аммо, нурлантиришнинг маълум бир шароитида оптик-механик хусусиятларга таъсир этувчи нанокристалли қўшимчалар ҳосил бўлиши содир бўладики, улар ҳали етарлича ўрганилмаган.

Диссертациянинг **"Тадқиқот объектлари ва тажриба усуллари"** деб номланган иккинчи бобида LiF кристаллари ва SiO<sub>2</sub> асосидаги шишаларни олиш, уларнинг структурасини, механик, электр ва оптик хусусиятларини ўрганиш ва таҳлил қилиш усуллари баён этилган.

LiF кристаллари ва SiO<sub>2</sub> асосидаги шишаларнинг намуналари Давлат оптика институти (Россия) томонидан ядровий нурланиш таъсирини ўрганиш учун тақдим этилган. Металл буғларда иссиқлик билан ишлов бериш пайтида ёки юқори энергияли ионлаштирувчи нурлантириш таъсирида металл наноколлоидларнинг ҳосил бўлиш механизмлари кимёвий боғланишларнинг

узилиши ва анионларнинг учиби чиқиши билан ИГК сирт стихометриясининг бузилиши ҳодисасига асосланган. Таҷрибаларда  $^{60}\text{Co}$  нинг  $\gamma$ -нурлари (ўртача энергияси  $\sim 1.25$  МэВ),  $3.3 \cdot 10^{17} \text{см}^{-2}$  флюенсгача реакторнинг актив зонасидаги  $\gamma$ -нурлар аралашмасидан Cd-филтри орқали ажратиб олинган иссиқлик нейтронларисиз тез нейтронлар ва  $5 \cdot 10^8$  Р дозагача ионлашган ҳаводаги  $\gamma$ -квантлар оқимидан (энергиялари 7 МэВ гача), вакуумда  $10^{15} \text{см}^{-2}$  гача флюенсдаги протонлардан, энергияси 4 МэВ, ток импулси 4.5 мкс, ток дастаси зичлиги 50 дан 3000 нА/см<sup>2</sup> гача бўлган, интеграл флюенси  $10^{13}$  до  $10^{17}$  эл/см<sup>2</sup> гача булган электронлар дастасидан фойдаланилди.

Бош вазифа наноўлчамли ва нуқтавий нуқсонларнинг улушини ажратиш учун сиртий-сезгир ва ҳажмий таҳлил усуллари комплексидан фойдаланилди: рентгено-флюоресцент таҳлил Ge -детекторли кўп каналли анализаторда амалга оширилди (хатолик  $< 0.1\%$ ); сиртдаги микро- ва наноструктураларнинг локал элемент таркиби Be дан бошлаб 2–20 мкм масштабда EDS Aztec (Oxford Instrum) энергодисперс системага эга бўлган EVO MA10 (Zeiss) сканерловчи электрон микроскоп (СЭМ)да аниқланди (хатоликлар  $\pm 0.2\%$ ); намуналарнинг структураси ва фазавий таркиби ДРОН-3М ускунасида ( $\lambda_{\text{CuK}\alpha} = 0.1542$  нм) рентген дифракцияси усулида  $2\Theta = 10 \div 70^\circ$  бурчаклар оралиғида шунингдек, 5–140 град., бурчак оралиғида Ni- филтр ва Cu- катодга эга бўлган ёруғликка сезгир X-трубкали Empyrean (PANalytical) ускунасида тадқиқ этилди; намуналарнинг сирт ости қатлами микроқаттиқлиги ПМТ-3 асбобида 20÷200 грамм юк остида аниқланди; сирт электр ўтказувчанлиги ( $\sigma_s$ ) доимий 10 В кучланиш остида ихота электродларига эга классик уч электродли схема бўйича ҳароратнинг 300–500 К оралиғида 7.3 К/мин. қиздириш тезлик билан амалга оширилди; оптикавий ютилиш (ОЮ) спектрлари 200–900 нм оралиқда Specord M-40 «Карл-Цейсс» спектрофотометрларида ва 6 нм ли тирқиш орқали тўлқин узунликларнинг 190–1100 нм оралиғида ва оптик зичликнинг 5 гача қийматларида СФ-56 да (ЛОМО) ёзиб олинди,  $4000\text{--}400 \text{см}^{-1}$  тўлқин сонлари оралиғидаги ИҚ ўтказиш/ютилиш/қайтариш спектрлари катта статистикада iS50 Nicolet (Thermoscience) спектрометрида олинди (хатолик  $< 1\%$ ); 300 К да 200–800 нм оралиғида давомлилиги 12 нс ва тўлқин узунлиги 337 нм (ИЛГИ-503) лазер импулси билан уйғотилган фотолюминесценция (ФЛ) спектрлари MPF-2A флюориметрида ёзиб олинди; гаммалюминесценции (ГЛ) спектрлари қуввати 406 Р/с ва ҳарорати 320 К бўлган каналда  $^{60}\text{Co}$  гамма нурлар манбаида уйғотилиб, нур ўтказгич ва 200–800 нм да ишловчи, МСД-1БУ кўшимчага эга бўлган призмали SPM-2 монохроматор ёрдамида олинди.

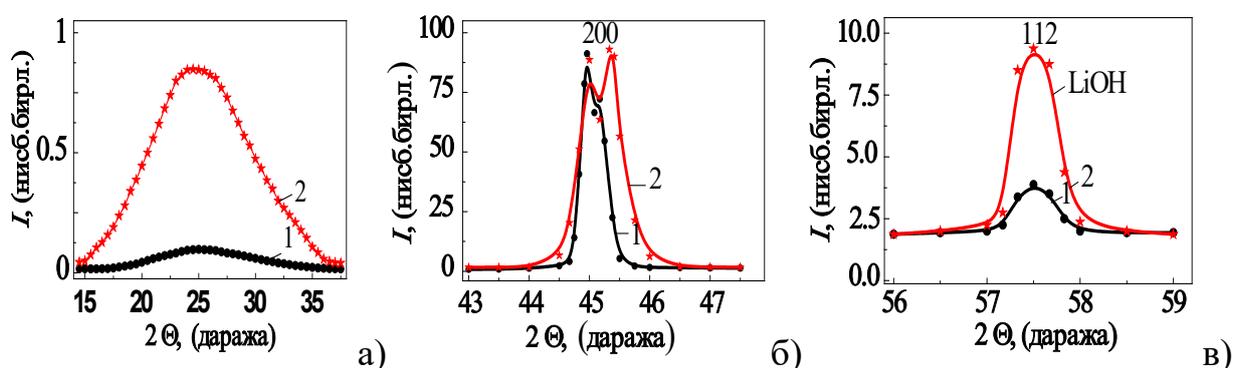
Диссертациянинг **"LiF кристалларидаги радиация билан индуцирланган нанозаррачалар ва наноструктуралар"** деб номланган учинчи бобида юқорида айтиб ўтилган кристалларни ионлаштирувчи нурлар билан нурлантиргунча ва нурлантирилгандан кейинги кристалл тузилиши, механик хусусиятлари, ОЮ, ФЛ ва ГЛ спектрлари, электр ўтказувчанлиги баён этилган.

Пластина кўринишидаги LiF кристаллари (100) текислик бўйлаб бўлиб олинган. Куқунлар 14–21 мкм гача туйилган. Кристалл наноқўшимчалари ўлчамлари Селяков-Шеррер формуласи бўйича аниқланди:

$$L = 0.94 \cdot \lambda / \beta_{hkl} \cdot \cos \Theta_{hkl}, \quad (1)$$

бу ерда  $L$ -доначанинг катталиги (нм),  $\lambda$ -найчанинг нурланиш тўлқин узунлиги (нм),  $\Theta$ -қайтариш бурчаги (радиан),  $\beta$ -ушбу қайтаришнинг ярим кенглиги (радиан).

1-расмда LiF кристалларининг реактор тўхтатилганидан кейин унинг актив зонасидаги гамма-нурлари билан нурлантургунга қадар ва нурлантиргандан кейинги рентгенограмма фрагментлари кўрсатилган.



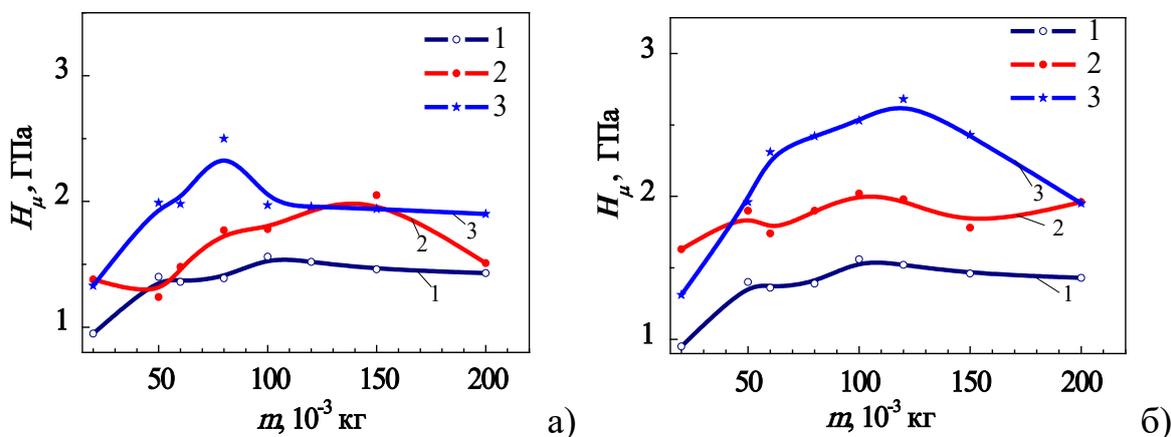
1-нурлантирилмаган эталон; 2 - реактор тўхтатилгандан сўнг каналдаги сувда 10 соат давомида гамма нурлари билан нурлантирилган намуна

### 1- расм. LiF кристаллари рентгенограммаси бўлаклари

Нурлантириш натижасида оналик матрицасидаги 45 градусдаги рефлекснинг (200 рефлекс) ташкил этувчилари интенсивликларининг нисбати ва селектив рефлекс шакли ўзгарганлиги топилди (1-б расм), бу ўзгариш металл наноэрааларидан сочилиш бўйича ҳисоблаб топилгандан фарқ қилади ва бу LiF оналик панжарасидаги {111} текислик бўйича структуранинг радиация билан индуцирланган иккиланиши (двойникование) содир бўлгани ҳақида гувоҳлик беради. Бундан ташқари, нурлантиришдан кейин LiF сиртидаги сув молекулалари радиолизи ва фтор молекулаларининг кетиши туфайли структуравий нуқсонлар ҳосил бўлиши, шунингдек водород ёки OH-радикалларининг киритилиши билан диффуз полоса (а фрагмент) ва 57.5 градусдаги (112) структуравий рефлекс (в фрагмент) интенсивлигининг ортиши рўй беради. Катламлар орасидаги масофаси  $1.612 \text{ \AA}$  бўлган (112) рефлекс (1в расм) ўлчамлари  $\sim 28$  нм бўлган ишқорий LiOH нанопреципитатларга тегишлидир. Уларнинг миқдори нурлантиргандан кейин 3 мартага ортади.

Сиртости қатламларини чуқурлиги бўйича рентген-структуравий таҳлил усули билан сканерлаб бўлмаслиги сабабли бу қатламлардаги наноқўшилмаларни ўрганиш учун микро каттикликни аниқлаш усули қўлланилди.

2-расмда  $^{60}\text{Co}$  манбаи ва тўхтатилган реакторнинг гамма нурлари билан нурлантиришдан олдин ва нурлантирилгандан кейин LiF кристаллари микроқаттиқлиги  $H_{\mu}$ нинг юк массасига боғлиқлиги кўрсатилган.

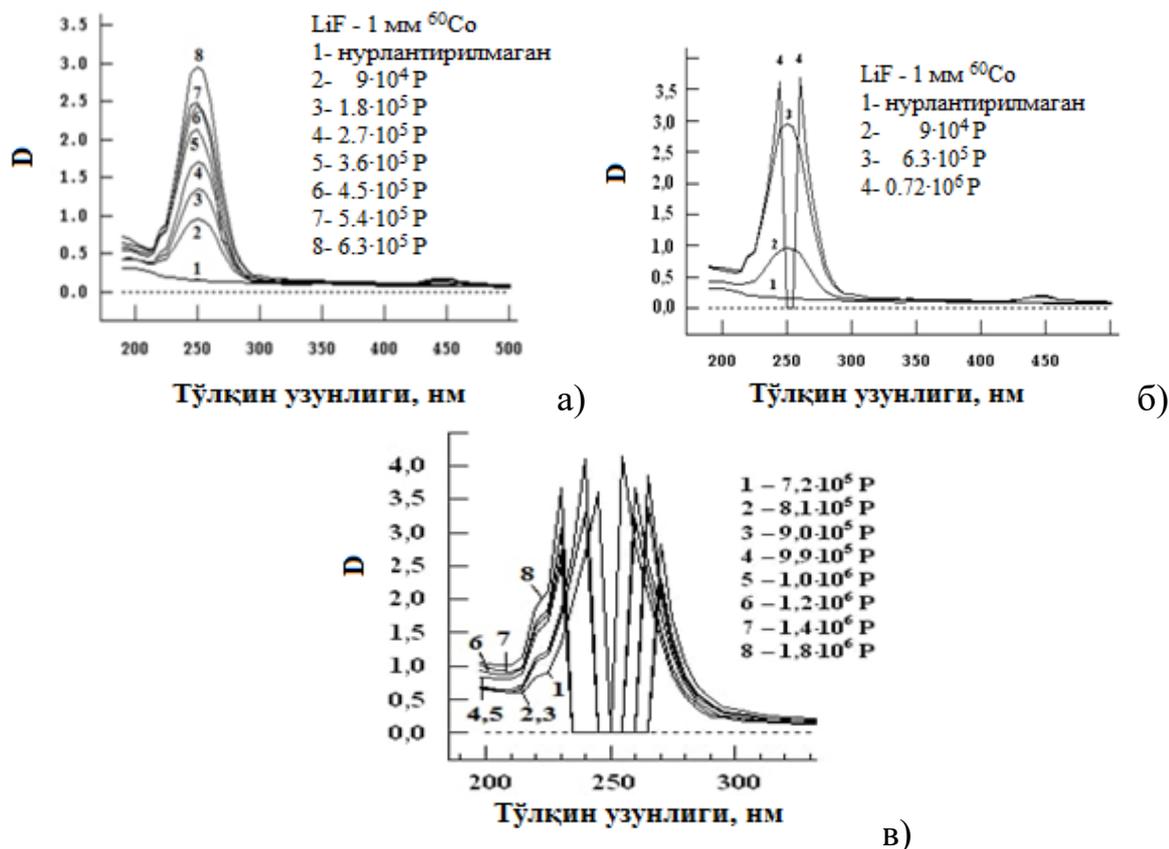


1- эталон, 2-  $^{60}\text{Co}$  гамма нурлари билан 765 P/c дозада нурлантирилган, 3- тўхтатилган реактор каналида сувда гамма нурлар билан а) -10 соат, б)-54 соат нурлантирилган намуналар

## 2- расм. LiF кристалларининг микроқаттиқлиги

Нурланишдан кейин юкланишнинг бутун ўрганилган оралиғида  $H_{\mu}$  нинг ортиши кўриниб турибди, бу эса сиртнинг радиация билан индуцирланган мустаҳкамланиши деганидир. Реакторда гамма нурланиши натижасида микроқаттиқлик қиймати ошишининг дозага боғлиқлиги кўпроқ сезилади. Чунки сув иштирокида  $\sim 28$  нм катталиқдаги LiOH наноқўшимчалари иштирокидаги иккиланган структураларнинг зичлиги ортади. Дозани аниқлашнинг иложи йўқ эди, чунки вақт ўтиши билан тўхтатилган реактордаги гамма-оқимининг интенсивлиги номонотон пасайиб боради, шу сабабли доза  $^{60}\text{Co}$  даги эффект билан таққослаган ҳолда баҳоланди. Қуруқ ҳавода  $^{60}\text{Co}$  манба билан гамма нурлантирилгандан кейин микроқаттиқликнинг энг паст қийматга эга бўлишини мантиқан тушунтириш мумкин, чунки бу ҳолда кичик ўлчамли (8 нм) Li нанозаррачалари ҳосил бўлган. Шу тариқа микроқаттиқлик натижалари РСА билан мос келади.

3-а),б),в) расмларда  $9 \cdot 10^4 - 1.8 \cdot 10^6$  P доза оралиғида гамма-нурлантирилган 1 мм қалинликдаги LiF кристалларининг ютилиш спектрлари кўрсатилган.  $F$ -марказларига мос келадиган 250 нмдаги полоса интенсивлиги дастлаб доза бўйича  $D=3.0$  гача ортиб боради ва унинг ярим кенглиги 0.89 дан 0.74 эВ гача камаяди (3а-расм). Ушбу дозалар оралиғида  $F$ -марказ полосаси максимумининг тўлқин узунлиги доза ошиши билан ўзгармайди, бу эса Бугер-Бер қонуни асосига қўйилган ва ундан келиб чиқадиган  $F$ -марказлар концентрациясини аниқловчи Смакула-Декстер формуласига мос келувчи оптик зичликнинг чизиқли ўсиши билан бирга, шаффоф диэлектрик муҳитда бир текис тақсимланган изоляция қилинган электрон осцилятор тушунчасига тўлиқ мос келади.



нурлантириш дозалари: а)  $9 \cdot 10^4$  P –  $6.3 \cdot 10^5$  P; б)  $0.72 \cdot 10^6$  P га қадар; в)  $7.2 \cdot 10^5$  P– $1.8 \cdot 10^6$  P

**3-расм. Ҳавода 320 К да 520 P/с интенсивликдаги  $^{60}\text{Co}$ - манбаси гамма нурлари билан нурлантирилган қалинлиги 1 мм LiF кристалларидаги максимуми 250 нм бўлган  $F$ -марказлари ютилиш полосасининг дозадан боғлиқлиги**

Якка жойлашган  $F$ -марказлар сферик симметрияга эга, шу сабабли улар кенг симметрик гаусс полосаси билан характерланади. Оптикавий марказларнинг концентрацияларини Смакула-Декстер формуласи орқали ҳисобладик:

$$N = 1.28 \cdot 10^{17} [n/(n^2+2)^2] \cdot K_m H / f \text{ см}^{-3}, \quad (2)$$

бунда  $n$ - $F$ -полоса максимумига мос келувчи тўлқин узунлиги учун синдириш кўрсаткичи, LiF учун у 1.35 га тенг;  $f$ - осциллятор кучи;  $H$ -  $F$ - полосанинг ярим кенглиги, эВ ларда;  $K_m$ -  $F$ -полоса максимумидаги ютилиш коэффиценти,  $\text{см}^{-2}$ да.

Нурлантириш дозаси  $0.72 \cdot 10^6$  P да унинг максимумлари 245 ва 260 нм ҳамда  $D \sim 3.6$  билан тавсифланувчи асимметрик профилга эга бўлган иккита ингичка чизиқлар дублетига бўлинади. Айти пайтда фтор бивакансиялари билан боғлиқ бўлган кучсиз 450 нм полоса пайдо бўлади, кристалл оч яшил ранг олади. Бу ранг 300 К да уч соат ушлаб турилганда сариқ рангга айланади, у нотурғун  $H$ -марказлар ( $F_2$  молекулалари) билан боғлиқ. Такрорий ўлчашлар 245 ва 260 нм даги дублетга бўлиниш ҳам нотурғун эканлигини ва битталиқ 250 нм полоса қайта тикланишини, аммо бир қадар каттароқ оптикавий зичлик

билан тикланишини кўрсатади. Қўшни марказлар орасидаги ўртача масофа  $N$  концентрация орқали  $d=10^7/N^{1/3}$  (нм) формула билан аниқланди. Натижалар 1-жадвалда келтирилган.

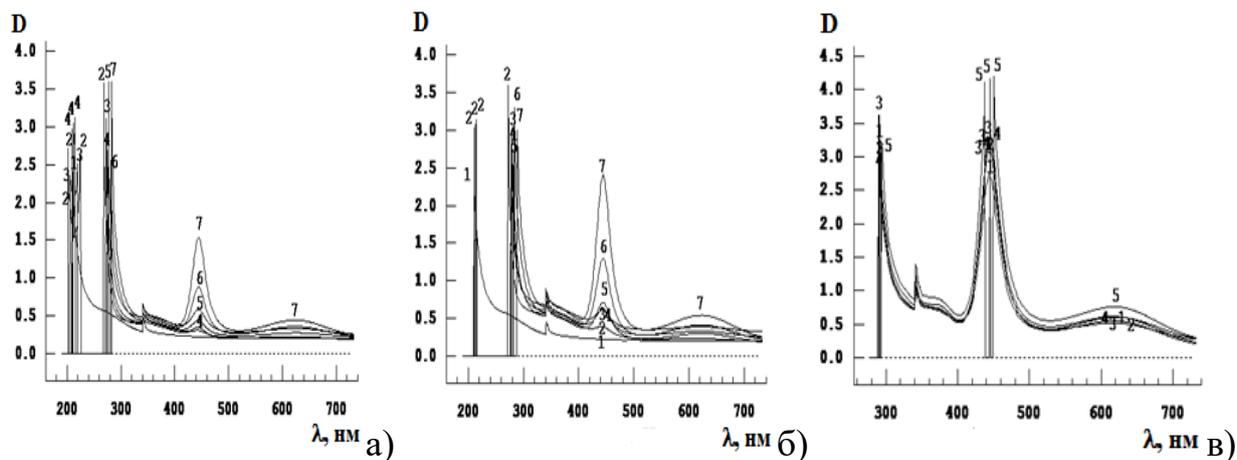
### 1-жадвал

**Синиш коэффициенти, ютилиш коэффициенти,  $F$ - марказ - 4.95 эВ (250 нм) полосасининг ярим кенглигидан  $N_F$ -нинг концентрациясини ва  $M$ -марказ 2.78 эВ (445 нм) дан  $N_M$  концентрациясини, шунингдек, 320 К да 520 Р/с интенсивлик билан нурлантирилган LiF кристалининг (қалинлиги 1 мм) марказлари орасидаги масофа  $d$  ни ҳисоблаш**

Доза, $10^5$ Р	$N_F$ (250 нм) $10^{17}$ см <sup>-3</sup>	$d - F-F$ марказлар орасидаги масофа, нм	Доза, $10^5$ Р	$N_M$ (445 нм) $10^{16}$ см <sup>-3</sup>	$d - M-M$ марказлар орасидаги масофа, нм
0	0	—	8.1	0.64	54.3
0.9	0.97	21.7	9.9	1.14	44.8
1.8	1.33	19.5	18	1.61	40.0
2.7	1.63	18.2	37	2.24	35.8
3.6	1.97	17.2	55	2.92	32.9
4.5	2.25	16.4	75	3.71	30.4
5.4	2.26	16.3	93	5.69	26.4
6.3	2.74	15.4	110	6.67	25.1
7.2	3.33	14.5	200	9.64	22.2

Ҳисоблашлар жадвали кўрсатадики,  $6.3 \cdot 10^5$  Р дозада ўзаро таъсирлашмайдиган  $F$ -марказларнинг чегаравий  $N=2.74 \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup> ҳажмий концентрациясига ва мос ҳолда қўшни  $F$ - марказлар орасидаги энг кичик ўртача масофа  $d \sim 14.5$  нм га эришади. Бундай ҳолда кейинги  $7.2 \cdot 10^5$  Р дозада қўшни  $F$ - марказлар шунчалик яқинлашишадики, улар заряд ташиш билан алмашинув ўзаро таъсирга киришадилар ва  $\{110\}$  йўналишда  $a \sim 14$  нм бўлган катта ўқли акциал симметрияга эга  $F-F$ - марказлар жуфтлигини ( $M$ -марказларни) ҳосил қилади, бу ҳол оптик зичликнинг шиддатли равишда  $D=4.2$  гача ошиши ва электрон сатҳларнинг бўлиниши билан ҳосил бўлади. Доза бўйича дублетга бўлинади ҳамда  $F$ - марказларнинг концентрацияси ошиб боради, қўшни марказлар орасидаги масофага эса камаяди, шу босқичда турғун молекуляр  $M$ -марказлар – фтор бивакансиялари  $F_2$  ҳосил бўлиш имконияти вужудга келади. 4.75–5.5 эВ (225–260 нм) соҳада 11–150 К ҳарорат оралиғи ва  $10^8$  дан 10 секундгача электронлар билан нурлантирилганда қисқа вақт оралиғида яшовчи ютилиш полосаси кузатилган ва  $D_{2h}$  симметрияга эга бўлган ва  $\{110\}$  и  $\{111\}$  бўйича йўналган автолокаллашган экситонлардаги триплет-триплет ўтишларга боғланган. Уларнинг 300 К да мавжудлиги  $H$ -марказларнинг юқори даражадаги ҳаракатчанлиги туфайли ажратилган  $F-H$  жуфтлиги ҳосил бўлиши ҳақида хабар беради.

4 а),б),в) расмда LiF кристалларининг томонлари 10 мм бўлган кубнинг  $a$  ва  $b$  ўқлари бўйича гамма нурлари билан нурлантиргунча ва  $0.9 \cdot 10^5$  P дан  $1.65 \cdot 10^6$  P гача дозалар билан нурлантиргандан кейин уларда Li нанокалоидлари (380 нм) ҳосил бўладиган  $M$ - (450 нм) ва  $F_2^+$ - марказларнинг (620 нм) сони тез ошиб борганидаги оптик ютилиш спектрлари келтирилган.



а)- (100) юзадан олинган: 1- нурлантирилмаган ва кетма-кет кўйидаги дозалар билан нурлантирилган: 2-  $0.9 \cdot 10^5$  P, 3-  $1.8 \cdot 10^5$  P, 4-  $2.7 \cdot 10^5$  P, 5-  $3.6 \cdot 10^5$  P, 6-  $5.4 \cdot 10^5$  P, 7-  $7.2 \cdot 10^5$  P; б) в)- (010) юзадан олинган: 1- нурлантирилмаган, 2-  $0.9 \cdot 10^5$  P, 3-  $1.8 \cdot 10^5$  P, 4-  $2.7 \cdot 10^5$  P, 5-  $3.6 \cdot 10^5$  P, 6-  $5.4 \cdot 10^5$  P, 7-  $7.2 \cdot 10^5$  P и в) 1 -  $9.1 \cdot 10^5$  P, 2 -  $1.1 \cdot 10^6$  P, 3-  $1.28 \cdot 10^6$  P, 4-  $1.46 \cdot 10^6$  P, 5-  $1.65 \cdot 10^6$  P дозалар билан нурлантирилган

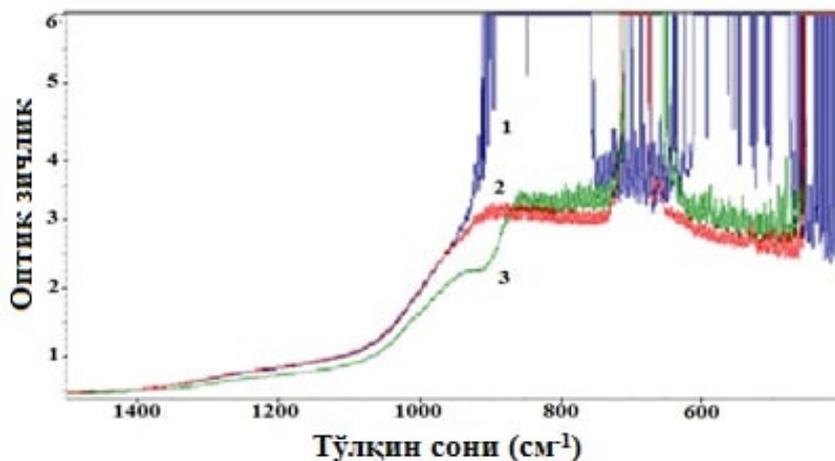
#### 4-расм. LiF нинг оптик ютилиш спектрлари

4а)-расмда биз биринчи марта 202–225 нм даги полосанинг кичик дозаларда дублетга бўлинишгача сиқилишини (2 ва 3 спектрлар) топдик, бу хол фақат (100) қиррадагина кўринади, бу нарса уни аксиал симметрияли икки атомли тугунлар ўртасида жойлашган фтор молекуласи билан боғлашга имкон беради.  $2.7 \cdot 10^5$  P да (100) қиррада 209–212–215 нм,  $0.9 \cdot 10^5$  P да (010) қиррада 211–213–215 нм триплетларнинг пайдо бўлиши радиация билан индуцирланган катта осцилляторга эга бўлган ва шу сабабли жуда катта интенсивлик билан ютадиган аксиал симметрияли биполяронлар билан боғлиқ. Минимал дозалардан кейин 270 нм да пайдо бўладиган резонанс доза ошиши билан 284 нм гача силжийди (4 а) расм, 2–7 спектрлар). 4 б) расмда 211–213–215 нм даги триплет (2 спектр), кейин эса резонанснинг 272 дан 295 нм гача силжиши кўринади. Яъни (110) қатламда жойлашган литий нанокалоидлари (100) ва (010) қирралардаги проекциялари каби кўринади.

Фақат 4в)-расмда 450 нм даги полосанинг  $1.65 \cdot 10^6$  P максимал доза олганидан сўнг 438–445–450 нм триплетга бўлиниши кўринади. Триплет ва 620 нм даги кучсиз полоса нотурғун, ориентацияга боғлиқ, аммо оптик зичлик (барча қирралар бўйича спектрлар олинишига) изотропдир, яъни ( $F_2$  - $F_3$ ) комплекслар энг нуқсонли бўлган (111) текислик бўйлаб ориентацияланган бўлиб, унинг проекцияси учала ўқ бўйлаб кўринади.

5-расмда 300 ва 470 К ва  $1.7 \cdot 10^6$  P дозада  $^{60}\text{Co}$  манбанинг гамма нурлари билан нурлантирилган намуналарнинг ўтказиш режимида қайд этилган

инфрақизил (ИҚ) спектрлари кўрсатилган. Нурлантирилмаган намунада Li-F боғланишнинг  $900\text{--}750\text{ см}^{-1}$  ва  $650\text{--}400\text{ см}^{-1}$  соҳалардаги интенсив ютилиш полосалари (5 расм) кўриниб турибди (1 спектр).

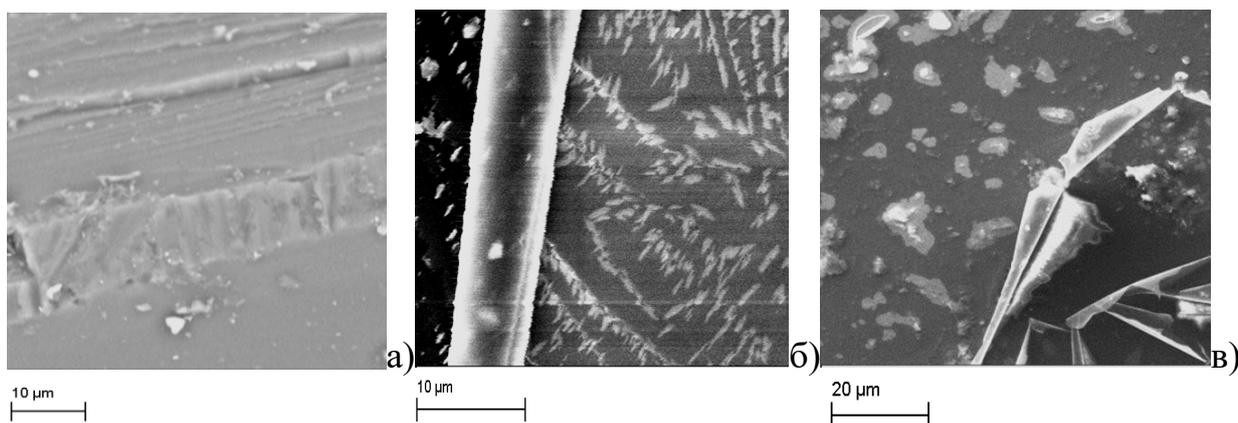


Нурлантирилмаган (1),  $^{60}\text{Co}$ -манбада  $1.7 \cdot 10^6\text{ Р}$  доза билан 300 К да (2) ва 470 К да (3) нурлантирилган

### 5-расм. LiF кристалларининг 300 К да олинган ИҚ ютилиш спектрлари

300 К да гамма-нурлантирилганда (2 спектр) радиолиз туфайли Li-F боғланишлар сони камаяди, мос равишда иккала полоса кескин камаяди, уларнинг ўрнига  $\text{F}_2$  молекулалар тебраниши билан боғлиқ  $450\text{ см}^{-1}$  даги интенсив полоса ва  $\text{Li}_2$  агрегатлари билан боғлиқ  $700\text{ см}^{-1}$  даги полоса пайдо бўладики, улар панжара динамикаси ва LiF зичлик ҳолатлари функциясининг ортиши билан мос келади. 3 расм 470 К да термик ишлов бериш  $\text{Li}_2$  агрегатлари сонининг ошишига мос равишда ва  $700\text{ см}^{-1}$  даги полосани кучайтиради ва кенгайтиради ҳамда фтор эмиссияси туфайли  $450\text{ см}^{-1}$  даги полосани сусайтиради. Электронлар билан 100 нА токда  $1.3 \cdot 10^7\text{ Р}$  доза билан нурлантирилгандан кейинги ИҚ – спектр электронлар дастаси билан қиздириш ҳисобига 470 К да гамма нурлари билан нурлантирилган намуна спектри билан амалда мос тушади (5 расмнинг 3 спектри).

6-расмда LiF кристалларининг бўлиниш сиртларининг микрографалари (100) кўрсатилган: а)-нурлантирилмаган ҳол, унда бўлиниш қирралари ва силлиқ атом сиртлари кўринади. б)-расмда  $10^9\text{ Р}$  дозада гамма нурлари билан нурлантирилган LiF диэлектрикнинг 30–40 нм электр ўтказувчи графит наноқатлами билан қопланган қоронғи сиртида алоҳида-алоҳида ёрқин металл Li наноэлектродлари кўринади, графит билан қопланмаган сиртда эса ёрқин тартибланган узун параллел микротолалар кўринади.



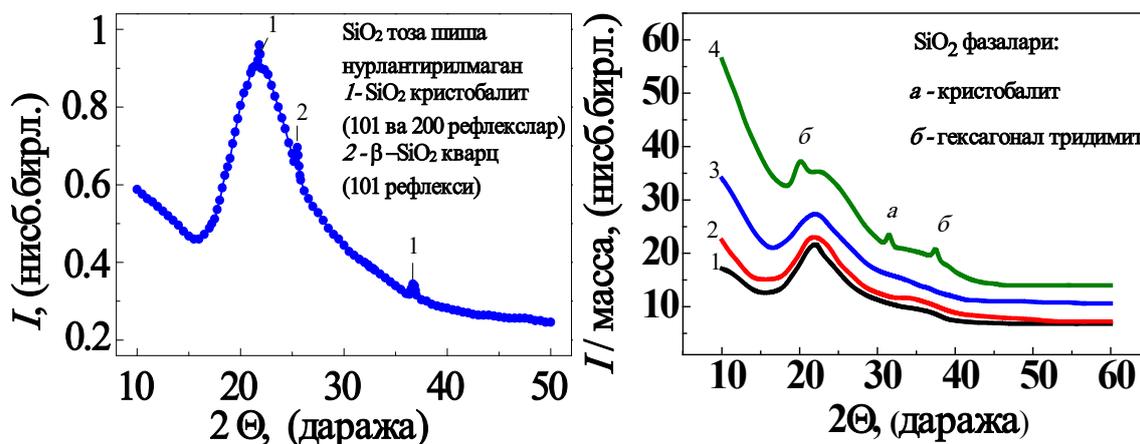
а) нурлантирилмаган, б)  $^{60}\text{Co}$ - манбасида интенсивлиги 1100 P/c бўлган гамма нурлари билан  $10^9$  P дозада да нурлантирилган, в)  $10^{17}$  эл/см $^2$  флюенсда 4 МэВ ли электронлар билан 3 мкА ток оқимда нурлантирилган

### 6-расм. LiF кристаллари бўлиниш сиртларининг микросуратлари

Қуруқ ҳавода LiF ни 4 МэВ ли электрон билан максимал 3 мкА/см $^2$  ли ток зичлигида  $10^{17}$  эл/см $^2$  дозагача нурлантиришдан сўнг (6 в-расм), силлик кесилган сиртда ёрқин оролчалар кўринади. Афтидан, 4 МэВ электрон тушган жойида локал ионлашиш туфайли фтор учиб кетади, Li эса даста йўналишида пирамидачалар шаклида ўсади. Локал элементар таҳлиллар асл ва нурлантирилмаган сиртда фтордан бошқа нарсани топмади (чунки Li ни детектор аниқламайди), бу ҳаводаги электронлар билан нурланишда сирт оксидланишининг йўқлигини кўрсатади. Нурланмаган LiF кристаллининг бўлиниш юзасида (6-расм а), зинапоялар кўришиб туради, уларнинг юқори ёрқинлиги, чеккасида металл ионларидан электронлар чиқиши билан боғлиқ. Диссертациянинг тўртинчи бобида **"SiO $_2$  асосидаги шишаларда радиация билан индуцирланган нанозарралар ва наноструктуралар"** ўрганилган.

7-расмнинг чап томонида эталон – тоза SiO $_2$  шишасининг рентгенограммаси келтирилган. Асосий диффуз рефлекс ўлчамлари  $0.75 \pm 0.02$  нм бўлган SiO $_{2-x}$  структуравий фрагментлари, ҳамда ўлчамлари  $1.4 \pm 0.04$  нм бўлган O–Si–O молекулаларидан ташкил топган наноҳалқаларнинг акси билан боғлиқ. Уч ўлчовли турли ясси ячейкаларнинг шиша тўрдаги текис кесими 0.7 дан 1.5 нм гача ўлчамга эга. Кенг диффуз полосаларда, ўлчамлари мос равишда 39 ва 28 нм бўлган кристобалит нанокристаллари билан боғлиқ (111) ва (101) селектив рефлекслар, шунингдек, ўлчамлари 35 нм бўлган  $\beta$ -кварц билан боғлиқ (101) рефлекси ажралиб туради. Тоза SiO $_2$  нинг нурлантиргунча ва тез нейтронлар билан нурлантиргандан кейинги рентген диффракцияси спектрлари 7 расмнинг ўнг томонида кўрсатилган. Дастлабки нурлантирилмаган намунанинг спектри (1 эгри чизик) ўлчамлари мос равишда  $L_1 \approx 1.7$  нм ва  $L_2 \approx 1.2$  нм бўлган  $\alpha$ - ва  $\beta$ - кварц кристалл структурасининг фрагментлари билан боғлиқ текисликлари орасидаги масофалари  $d/n=0.4077$  и  $0.2522$  нм бўлган икки диффуз рефлекслардан ташкил топган.  $1.5 \cdot 10^{18}$  см $^{-2}$  гача бўлган флюенслар билан нурлантиргандан сўнг (2 эгри чизик) иккала диффуз қайтариш сақланади, аммо уларнинг сезиларли кенгайиши кузатиладики, бу

ҳол структуравий фрагментларнинг ўлчамлари  $L_1 \approx 1.5$  нм ва  $L_2 \approx 0.8$  нм гача камайиши ҳақида далолат беради.



Чапда: нурланмаган тоза  $\text{SiO}_2$  шиша намунасидаги 1 -  $\text{SiO}_2$  нинг кристобалит (101 ва 200 рефлекслар) ва 2 -  $\beta$ - $\text{SiO}_2$  - кварц (101 рефлекс) фазалари; ўнгда:  $\text{SiO}_2$  намуналарининг массаларига бўлиб нормаллаштирилган рентгенограммалар: нурланмаган (1) ва  $1.4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  интенсивликдаги нейтронлар ( $> 3$  МэВ) билан  $1.5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$  (2),  $1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$  (3),  $5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$  (4) флюенсда нурлантирилган намуналар

### 7-расм. $\text{SiO}_2$ нинг *a*-кристобалит, *б*-гексагонал тридимит фазаларидан олинган рентгенограммалар

Бу ҳолат  $E'_2$ -марказларнинг энергияси ва концентрациясининг камайиши ва кўприк бўлмаган кислород атомларининг (КБКА) энергияси ва концентрациясининг ортиши билан боради. Шундан кейин биринчи диффуз чўққининг катта сочилиш бурчаклари томон силжиши, кенглигининг камайиши билан боради, бу ҳол  $L_1 \approx 1.8$  нмга мос келувчи биринчи структуравий фрагментларнинг унча катта бўлмаган ортиши ҳақида далолат беради. Айни пайтда иккинчи чўққи амплитудасининг камайиши кузатилади.  $10^{19} \text{ см}^{-2}$  флюенс билан нурлантириш (3-эгри чизик) ноэластик фоннинг сезиларли ортишига (аморфлашув ва метамиктлашув) ва диффуз рефлекслар интенсивлигининг унча катта бўлмаган камайиши ва диффуз рефлексларнинг кенгайишига олиб келади, бу ҳолат структуравий фрагментлар ўлчамларининг  $L_1 \approx 1.6$  нм ва  $L_2 \approx 0.8$  нм гача камайишини билдиради.  $2.5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$  флюенс билан нурлантирилгандан кейин чўққиларнинг интенсивликлари камаяди, бунда биринчи чўққи иккинчисига қараганда тезроқ камаяди.

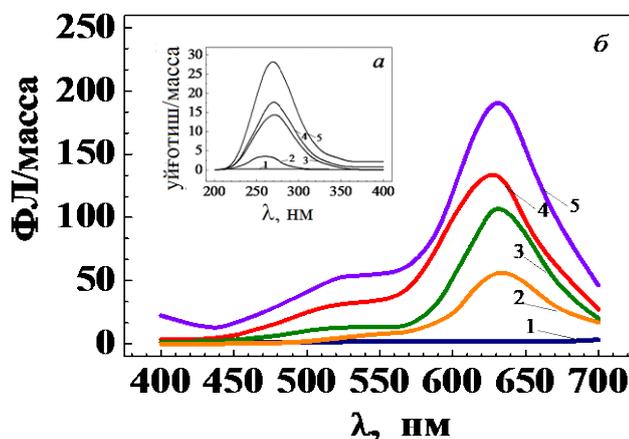
Кичик сочилиш бурчакларида ноэластик фон даражасининг шиддатли ошиши  $L_2$  фрагментларнинг майдаланиши ҳисобига нуқтавий нуқсонлар концентрациясининг ортиши ва аморфлашуви ҳақида далолат қилади. Демак, нуқсонлар ўлчамлари  $< 1$  нм бўлган юпка сиртости қатламида жойлашади. Бунда Смакула-Декстер формуласи ёрдамида ҳисобланган нуқсонларнинг ҳажмий концентрацияси  $5 \cdot 10^{16} - 10^{17} \text{ см}^{-3}$  ни квазиикки ўлчамли қатлам учун қайта ҳисоблаш лозим бўлади ва улар орасидаги масофа 1–10 нм га жуда яқин бўлади. Шу сабабли электронли  $E$  ва ковакли  $O_1$  нуқсонлар орасида  $f$ -осциллятор кучини,  $D$  оптик зичликни кескин оширувчи ва чўққиларни 0.1 эВ

гача сиқилишини таъминловчи кучли электродипол ўзаро таъсир вужудга келади. Максимал  $5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$  флюенсдан кейин (4 эгри чизик)  $L_2$  иккинчи диффуз қайтаришнинг интенсивлиги жуда кам сезиладиган даражагача камаяди, биринчи чўққи интенсивлиги эса дастлабки намунадагига нисбатан уч мартадан кўпроқ камаяди. Кварц структуравий фрагменти ўлчамлари  $L_1 \approx 1.6$  нм ни ташкил этади. Эҳтимол  $L_1$  нинг интенсивлиги наноразмердаги электродиполларнинг ( $E'$  ва КБКА) адсорбцияланган  $\text{OH}^-$  ва  $\text{H}^+$ лар билан заряд бўйича нейтраллашуви натижасида камаяди. Бунда ноэластик фоннинг даражаси тахминан икки баравар ортади, бу ҳол шиша тўридаги  $L_1$  структуравий фрагментларни ўраб турувчи аморф ва метамикт қатламлар улушининг ортиши билан боғлиқ. Нурлантириш жараёнида ўлчамлари 1.5–1.8 нм бўлган  $L_1$  мезоструктуравий фрагментларнинг нисбий турғунлиги, афтидан,  $\text{SiO}_4$  тетраэдрларни худди  $\alpha$ -кварцнинг кристалл структурасидагидек олтиёқлиларга жойлаштириладиган шиша ячейкасининг энергетик жиҳатдан қулай гексагонал симметрияси билан боғлиқдир. Кириш қисмида таъкидланганидек, комбинацион сочилиш спектрлари ёрдамида аниқланган ўртача тартибнинг характерли ўлчами КИ маркали шишани тез нейтронлар билан нурлантиришда қийматининг 1/3 га камаяди. Бу кузатиш юқорида 7-расмда келтирилган РСА натижалари билан сифат жиҳатидан мос келади, нанофрагментлар ўлчамларининг камайишидаги миқдорий тафовутни шишанинг турли маркаларига, кристаллик даражасига боғлаш мумкин.

Алоҳида таъкидлаш керакки, 100 соатлик нурлантиришдан кейин (4-эгри чизик) диффуз полосалар устида бир нечта ингичка селектив чўққилар пайдо бўлди. Таҳлиллар 2 та  $a$  рефлeksi кристобалитнинг паст ҳароратли фазасига тегишли, нанокристалларнинг (1) формула билан аниқланган ўртача ўлчамлари  $16 \pm 1.5$  нм ни ташкил этишини,  $b$  рефлекс эса ўлчамлари  $8 \pm 0.5$  нм бўлган гексагонал тридимитнинг кристалл фазасига тегишли эканлигини кўрсатади. Агар шундай бўлса, юқорида таъкидланган аморф ва метамикт қатламлар бу нанокристалларнинг нуқсонли қобиғини ташкил қилади. Маълумки, бу нанокристаллчалар силжиш термопикларида уларнинг совиши (релаксацияси) жараёнида ҳосил бўлади. Уларнинг концентрациялари  $>3$  МэВ энергияли тез нейтронлар флюенси билан аниқланади, ўлчамлари эса (термопиклар орасидаги масофани аниқловчи) оқимга, термопикдаги локал температуранинг ортишига ва уларнинг кристалланиш шароитларини таъминловчи аморф ва метамикт қобикнинг паст иссиқлик ўтказувчанлиги билан аниқланади. Албатта термопикнинг бутун ҳажми кристалланмайди, аммо унинг марказида электромагнит нурланишни сочувчи сийраклашиш ва ҳатто ғоваклик бўлиши керак. Агар ДРОН-3М спектрометрида мис катодли рентген трубкаси X-нурларининг кириш қатламидаги киринди фазанинг аниқланиш чегараси  $\sim 1\%$  ва шишада нанокристаллитлар  $5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$  флюенсда, уларнинг ҳисобланган ҳажми  $\sim 4\%$  га етганида идентификация қилиниши мумкин эканлиги ҳисобга олинса, бунга мос келувчи силжиш термопикларининг  $\sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$  флюенсдаги концентрациясида улар шиша ҳажмининг 10 % ини ташкил қилади. Таққослаш учун бундай флюенсда

нурлантирғанда  $\alpha$ -кварцда силжиш пиклари хиссаси ( $\beta$ -фаза зародишлари) 50 % га етади.

8-расмда ютилиш спектрларида ва рентгенограммаларда  $\alpha$ -кварц, кристобалит ва тридимит нанокристалларининг чўққилари пайдо бўладиган маълум бир танлаб олинган дозаларда нурлантирилгандан кейинги ФЛ ва уйғотиш спектрлари (ичкарига қўйилган расмда) кўрсатилган.



б) нурлантирилмаган (1), тўхтатилган реакторнинг гамма нурлари билан  $4 \cdot 10^8$  Р дозада нурлантирилган (2), тез нейтронларнинг  $1.5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$  (3),  $1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$  (4),  $5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$  (5) флюенслари билан нурлантирилган намуналар. Ички қўйилган а) расмда ФЛ ни уйғотиш спектри келтирилган

### 8- расм. Тоза кварц шишасининг 270 нм да уйғотилган ФЛ спектри

2- эгри чизикдан кўринадики, реакторнинг ажратилган гамма-нурлари фақат изоляцияланган  $E'$  ва КБКА нуқсон жуфтлигини вужудга келтиради, КБКА люминесценцияси 630 нм полосада кузатилади ва 260 нм да уйғотилади.  $1.5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$  флюенс билан нурлантирғандан кейин (3 эгри чизик) КБКА полосасидаги ФЛ 2 марта ортади, флюенсининг  $10^{19} \text{ см}^{-2}$  гача ортиши билан (4 эгри чизик) иккала ФЛ полосаси ортди, аммо максимум 620 нм гача силжийди. Бизнинг ҳолатимизда тез нейтронлар ҳам шиша ҳажмида наноўлчамли термопиклар ҳосил қилади, у ерда тридимит, кристобалит ( $\alpha$ -кварцга нисбатан юқорирак температурали фаза) нанокристаллитлари ҳосил бўлиши билан бирга рекристаллизация амалга ошади. Флюенс ошиши билан ФЛ максимумининг 630 дан 620 нм га силжиши, чамаси, кристобалит ва тридимит нанокристаллари сиртида КБКА марказларининг ортиши туфайли содир бўлади.

Шундай қилиб, шиша структурасининг узоқ давом этуви релаксацияси туфайли 310 нм (3.99 эВ) ли уйғонган ҳолат сатҳи нотурғун бўлиб, эҳтимол, нанокристаллитларни ажратиб турувчи нуқсонли қаватларда сувнинг радиолизи туфайли пайдо бўладиган Si-...Н- марказларининг пайдо бўлиши, сўнгра эса уларнинг йўқолиши билан боғлиқ бўлади.

2-жадвалда нанофрагментларнинг ҳисоблаб топилган ўлчамлари, уларнинг концентрациялари, шунингдек марказларнинг энергиялари ва концентрациялари, ФЛ полосаларининг интенсивликлари кўрсатилган.

## 2- жадвал

$L_1$  ва  $L_2$  конструктив нанофрагментларининг рентген-дифракцияси ўлчамлари, уларнинг интенсивлиги ( $I_1^2$ ) ва аморф наноайчалар ( $I_a^2$ ), N оптик марказлари  $E'_1$ ,  $E'_2$  (Si-Si),  $E_s$  ва  $O^0_1$  (NBOHC – HAK) концентрациялари, шунингдек  $I_{PL}$  (630 нм),  $I_{PL}$  (520 нм) ФЛ ларнинг интенсивликлари, нурланишнинг ҳар хил оқимларида (вақтларида) намуналарнинг M массасини ҳисобга олган ҳолда

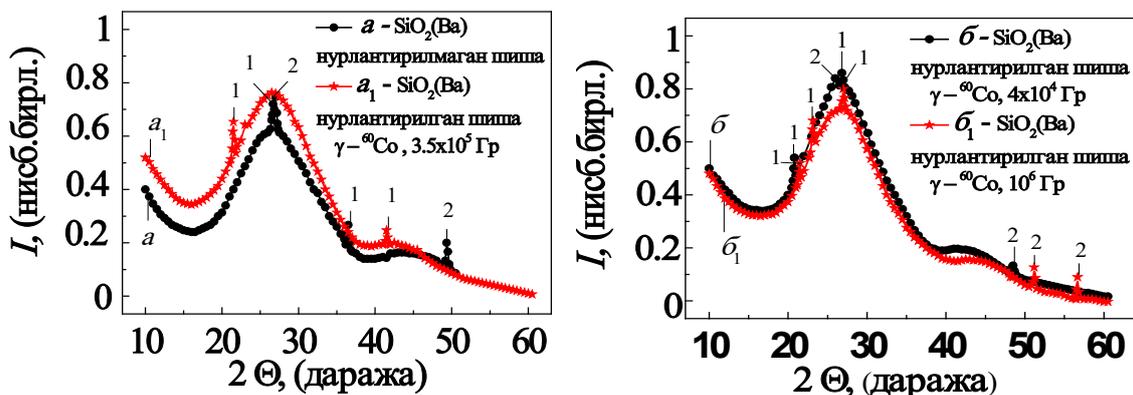
Вақт, соат	0	1.25	2	3	4	5	6	7	20	50	100
Флюенс, $10^{18} \text{ см}^{-2}$	0	0.3	1	1.5	2	2.5	3	3.5	10	25	50
M, мг	320	310	310	270	310	210	350	170	160	120	90
$L_1$ , нм	1.7		1.5	1.6	1.7	1.9	1.6	1.7	1.6	1.8	1.7
$L_2$ , нм	1.25		0.8	0.9	0.9	0.8	0.7	0.8	0.9	–	–
$I_1^2$ о.е	225		213	240	207	190	279	260	276	383	441
$I_a^2$ о.е	46.2		38.4	51.8	42.2	68.1	47.6	90	125	125	196
$E$ , eV	$\lambda$ , нм	Оптик марказларнинг концентрацияси $N$ , $10^{17} \text{ см}^{-3}$									
$E'_1$ 5.89	210	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0.66
$E'_1$ 5.75	215	–	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.54	0.54	0.52	0.38
$E'_1$ 5.62	220	0.51	–	–	–	–	–	–	–	–	–
$E'_2$ 5.38	230	0.96	0.74	–	–	–	–	–	–	–	–
$E'_2$ 5.26	235	–	–	0.44	–	–	–	–	–	–	–
$E'_2$ 5.15	240	–	–	–	0.55	–	–	–	–	–	–
$E'_2$ 5.05	245	0.8	1.01	1.22	0.84	–	–	–	–	–	0.46
$O^0_1$ 4.85	255	–	–	–	–	0.30	0.22	0.81	0.29	–	0.32
$O^0_1$ 4.76	260	0.84	1.20	1.00	1.14	–	1.38	–	–	0.22	–
$O^0_1$ 4.67	265	–	–	–	–	1.15	–	1.00	1.01	0.92	0.95
		ФЛ полосаси интенсивлиги, нисбий катталиқ									
$O^0_1$ 1.96	630	–	97	114	115	121	130	131	152	189	216
$E'_2$ 2.38	520	–	10.9	13.2	14.9	24.0	25.1	27.2	31.9	46.9	52.6

Жадвалдан кўриниб турибдики,  $E'_1$ -марказларнинг энергияси 5.75 эВ ва уларнинг концентрацияси  $\sim 0.55 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  бўлиб, флюенсларнинг то  $2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$  гача бўлган ўрганилган оралиғида жуда кам ўзгаради. Бу ҳолат уларнинг тўйинган зичлиги ва  $L_1$  ўлчамлари флюенс ортиши билан 1.5–1.8 нм оралиғида ўзгариб турадиган, концентрацияси эса ўзгармайдиган кварц нанофрагментлари сиртида жойлашганлигини тасдиқлайди. Аммо  $E'_2$  - марказлари фақат кичик флюенсларда, 0.7–0.8 нм ўлчамли  $L_2$  фрагментлар мавжудлигида, шу билан бирга уларнинг концентрацияси  $10^{17} \text{ см}^{-3}$  атрофида бўлганида самарали пайдо бўлади. Флюенс ортиб бориши билан уларнинг концентрацияси ва энергияси камаяди,  $2.5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$  флюенсда эса улар йўқолади. Эҳтимол, радиолиз туфайли водород уларнинг ҳосил бўлишига

тўсқинлик қилади, ОН эса КБКА марказлари концентрациясининг  $10^{17}$  см<sup>-3</sup> гача тез ортишига ёрдам беради.

Диссертациянинг бешинчи боби "Радиацион таъсир остида шишаларда оғир металлларнинг наноструктураларининг ҳосил бўлиш механизмлари ва қўллаш имкониятлари" деб номланган. Тоза кварц шишасида оксидли нанозаррачалар ва плёнкали оксид қопламали текис интерфейсда оксидли нанозаррачаларни ҳосил бўлишига бағишланган IV бобдан фаркли ўларок, ушбу бобда таркибида 20% дан ортиқ оғир металлларнинг ВаО ва РвО оксидлари бўлган, таъқиқланган зонасининг кенглиги SiO<sub>2</sub> матричасига нисбатан кам бўлган, унда нуқсонларнинг электрон ютилишидан ташқари, наноўлчамли қўшимчаларда кучли сочилиш улуши бўлиши кутилаётган SiO<sub>2</sub> асосидаги икки компонентли шиша ҳажмидаги икки ўлчамли интерфейс наноструктуралари ўрганилади.

Нурлантирилмаган оғир SiO<sub>2</sub>-ВаО шишасининг диффракцион манзараси иккита диффуз ва тўртта селектив рефлекслар билан тавсифланади (9 расм, чап томондаги *a* спектр нурланмаган намунага тегишли).



Чапда: спектр *a* - нурланмаган: 1 - SiO<sub>2</sub>-кристалли кварц, 2 - ВаО<sub>2</sub> молекуляр кристалл; спектри *a*<sub>1</sub> - 210 Р/с да  $3.5 \cdot 10^5$  Гр дозаси билан нурланган; 1 - SiO<sub>2</sub> кристобалит; Ўнгда: *б* - 600 Р/с да  $4 \cdot 10^4$  Гр доза билан нурланган, 1 - SiO<sub>2</sub> -тридимит, 2- ВаО<sub>2</sub> молекуляр кристаллит; *б*<sub>1</sub>-  $10^6$  Гр дозаси билан нурланган, 1- SiO<sub>2</sub> -тридимит, 2- ВаSiO<sub>3</sub> перовскит

### 9-расм. <sup>60</sup>Со γ- нурланишдан олдин ва кейин барий шишасининг рентгенограммаси

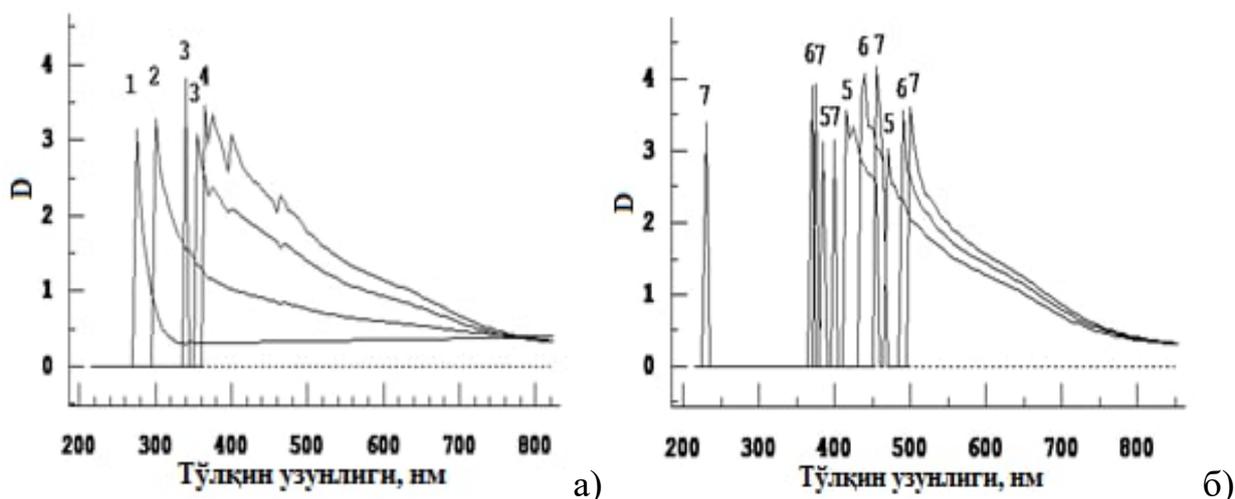
Аморф фаза ноэластик сочилишнинг ўсишига олиб келади. Аралашмали селектив рефлекслар кварц кристалларига (1) ва ВаО<sub>2</sub> молекуляр кристалларига (2) таъллуқлидир. 9-расмнинг чап томонидаги *a*<sub>1</sub> спектрда  $3.5 \cdot 10^7$  Р дозада нурланган намунанинг рентгенограммаси кўрсатилган. Унда иккала диффуз қайтариш ўзгармаган, ВаО<sub>2</sub> молекуляр кристалларининг рефлекслари йўқолган (2), аммо кристаллитларининг ўлчамлари  $50.7 \pm 4.5$  нм бўлган SiO<sub>2</sub> нинг кристобалит фазасига тегишли деб ҳисобланадиган иккита селектив чўққи пайдо бўлган. Кучсиз кенг полоса, эҳтимол, ўлчамлари  $0.78 \pm 0.02$  нм бўлган ВаО ва ВаSiO<sub>3</sub> лар билан боғлиқ киришмали аморф фазалар билан боғлиқдир. Диффуз полоса устига тушувчи паст интенсивли селектив структуравий чизиқлар ўлчамлари  $14.5 \pm 1.3$  нм бўлган β-кварц SiO<sub>2</sub> нинг кристалл фазасига, ўлчамлари  $27.5 \pm 1.8$  нм бўлган ВаО<sub>2</sub> молекуляр

кристалларига тегишли бўлиб, улар бир-бирларига нисбатан ориентирлангандирлар. Гамма-квантлар энергияси Ва атомларида ютилади ва оксид парчланади. Бундай дозада (ва унга мос келувчи радиациявий нуқсонлар зичлигида) локаллашган электронлар концентрацияси баланд бўлади, шу сабаб матрицанинг иссиқлик ўтказувчанлиги сезиларли даражада камаяди, бу ҳол юқори температурали фазанинг кристалланиши учун етарли локал иссиқлик ажралиб чиқишини таъминлайди.

9-расмнинг ўнг томонида юқорироқ 600 Р/с доза қуввати билан нурлантирилган шишанинг рентгенограммаси кўрсатилган.  $4 \cdot 10^6$  Р дозадан кейин (б спектр) ВаО<sub>2</sub> молекуляр кристалларининг дастлабки селектив рефлексларининг сезиларли камайганлиги кузатилади, бу нарса уларнинг шиша матрицасида аморф ҳолат нанозаррачалар ҳолатига эриб кетганлигидан, шу туфайли ноэластик фоннинг ортишига олиб келганлигидан далолат беради. Бундан ташқари, 14.5 нм ли  $\beta$ -SiO<sub>2</sub> нинг ўлчамлари 40 нм атрофида бўлган каттароқ ўлчамли тридимит нанокристалларига радиация билан индуцирланган структура-фазавий ўтиши рўй беради. Доза  $10^8$  Р гача ошганида бу фазанинг қўшимча чўққисининг пайдо бўлиши унинг ўлчамларининг ~50 нм гача ортанлигини кўрсатади. Нанокөмпозит шишага ~1.25 МэВ энергияли гамма нурлар таъсирида аввал нано-қўшилмаларнинг эриши, ундан кейин бошқа кристалл структурали бошқа нанозаррачаларнинг ўсиши кузатилади. Атомлар томонидан гамма-квантлар энергиясининг ва эркин экситонларда электронлар ва ковакларнинг нурланишсиз емирилишида ажралиб чиқадиган энергиясининг ютилиши ҳисобига радиолиз механизми бўйича бундай қайта тузилиш содир бўлади.

Худди сувда, реакторнинг иссиқлик ажратувчи йиғилмасида (ТВС), тез нейтронлар билан нурлантиришда бўлгани каби, тоза кварц шишасини протонлар билан вакуумда нурлантиришда ҳам силжиш термөпиклари вужудга келиб, тридимит ва кристобалит нанокристаллари ҳосил бўлади. Бу натижа гамма-нурлантиришдан кейин кварц шишасида кварц, кристобалит, тридимит нанокристаллитлари, силикат шишаларида молекуляр ВаО<sub>2</sub> ва ВаSiO<sub>3</sub> перовскит кристаллитларининг пайдо бўлиш факти билан бирга реакторнинг актив зонасида тез нейтронлар бўлгани ҳолда гамма нурлар оқимининг алоҳида дозиметриясини амалга ошириш имконини берди.

Нурлантиришдан кейин дарҳол ёзиб олинган ютилиш спектрлари 10 а), б) расмларда кўрсатилган бўлиб, улар биринчи дозадаёқ вужудга келган, зичлиги доза билан ошиб борадиган жигарранг бўялишни тавсифлайди. Кўриниб турибдики, нурланишдан сўнг,  $1.8 \cdot 10^{13}$  см<sup>-2</sup> дозадан бошлаб, маълум  $E_1'$ - марказлар ( $\equiv \text{Si} \cdot$  - кўприк кислород вакансиясида қамралган электрон) билан боғлиқ ингичка интенсив резонанс пайдо бўлиб, у такрорий ўлчашларда ҳам кузатилади. Максимал  $1.8 \cdot 10^{15}$  см<sup>-2</sup> дозадан кейин ушбу резонанс, эҳтимол, яқин жойлашган  $E_1'$ - марказларнинг ўзаро таъсирлари туфайли, 230 нм томонга силжийди.



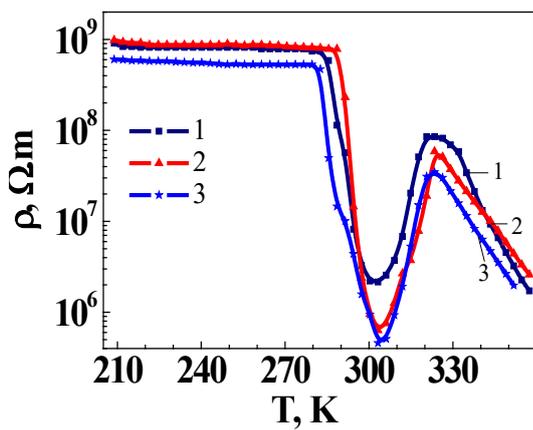
1-нурлантирилмаган; 4 МэВ ли электронлар билан 50 нА токда қуйидаги флюенсларда нурлантирилгандан кейин: 2 -  $1.8 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ , 3 -  $6.6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ , 4 -  $1.6 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ , 5 -  $3.5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ , 6 -  $8.3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ , 7 -  $1.8 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$

### 10-расм. Ишқорий силикат шишанинг ютилиш спектрлари

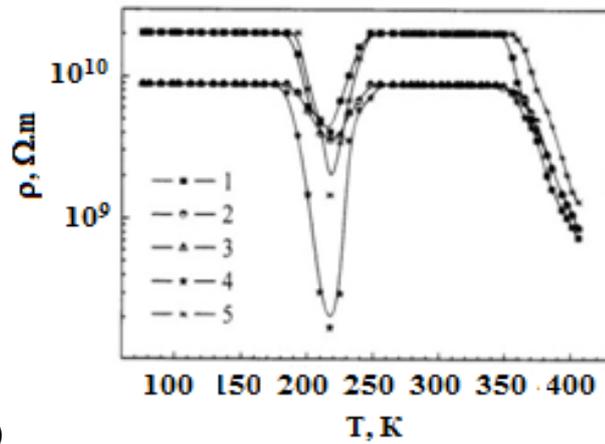
BaO–SiO<sub>2</sub> интерфейсларида локаллашган зарядлар билан боғлиқ ютилиш чегараси нурлантириш дозаси ошиб бориши билан, демакки, локаллашган ташувчилар концентрациясининг ортиши билан, 300 нм дан 500 нм гача силжийди. Булардан фойдаланган ҳолда ўлчамлари 15 дан 30 нм гача ўсувчи нанозаррачаларнинг ўлчамлари ва шишанинг чекланган сиқилувчанлиги аниқланди.

11-расм таркибида 24% PbO бўлган шиша намунасининг ўзгармас токдаги солиштирма ҳажмий қаршилигининг ҳароратга боғлиқлигини кўрсатади. 210–285 К ҳарорат оралиғи  $E=0.014$  эВ паст активлашиш энергиясига эга атермик электрон ўтказувчанликни тавсифлайди.  $\sim 10^7$  Р дозадан кейин қаршилик 2 марта камаяди. Энг юқори ўтказувчанлик (уч тартибга ортган) 300 К чўкки атрофида 285÷325 К ҳарорат оралиғида кузатилади ва нурлантирилгандан кейин у ортади. Юқори ҳароратли 325÷360 К соҳада ион ўтказувчанлиги устун бўлиб, унинг активлашув энергияси  $E=1.003$  эВ нурлантиришга боғлиқ эмас.

11- б) расмда таркибида 34.5% PbO бўлган боросиликат шиша намунасининг ўзгармас токка солиштирма ҳажмий қаршилигининг ҳароратга боғлиқлиги кўрсатилган. Бу ерда ҳам  $T_{max} \sim 216$  К да ўтказувчанликнинг энг юқори (квадрат) характеристикаси кузатилади. Таркибида 24% PbO бўлган шишага нисбатан энг юқори ўтказувчанлик чўққиси 100 градусга силжиган, бу ерда оғир металл оксидларидаги катта поляронларнинг икки ўлчамли транспорти кузатилади.



а)



б)

а) қуйидагилар 24% PbO: 1 - нурлантирилмаган ва  $^{60}\text{Co}$  гамма квант билан нурлантирилган; 2 -  $10^5$  P; 3 -  $1.3 \cdot 10^7$  P; б) 34.5% PbO: 1 - нурлантирилмаган, 2 - ўчирилган реактордаги гамма квантлар билан 3 соат давомида нурлантирилган; 3 - такрорий ўлчов; 4 - 20 соат давомида нурлантирилган; 5 - такрорий ўлчов

### 11-расм. Силикат шиша намунасининг ўзгармас ток солиштирма ҳажмий қаршилигининг ҳароратга боғлиқлиги

Энг юқори ўтказувчанлик режимида заряд ташувчиларнинг расмдаги эгри чизиқлар учун ҳисобланган активлашиш энергиялари таркибида 24% PbO бўлган шишадагига нисбатан анча паст бўлиб чиқди: 1-190÷245 К ( $E = 0.180$  эВ), 2-185÷250 К ( $E=0.186$  эВ), 3-185÷250 К ( $E=0.174$  эВ), 4 - 175÷255 К ( $E = 0.213$  эВ), 5-190÷250 К ( $E = 0.196$  эВ). Ўтказувчанликни дастлабки (2 ва 4) ва такрорий (3 ва 5) ўлчашлардаги эгри чизиқларни таққослаш ўтказгичнинг активлашиш энергиясининг пасайишини кўрсатади. Эҳтимол, бу ҳолат шиша ҳажмидаги чуқур қамраш марказлардаги ток ташувчиларни электр жиҳатидан қутбланган  $\text{SiO}_2\text{-PbO}$  интерфейсдаги саёзроқ қамраш марказларига, масалан, автолокаллашган  $\text{O}_2^{3-}$  ковакларга ташлаш ҳисобига амалга ошади.

**Радиациявий нуқсонлар ҳосил бўлишининг уч механизми маълум:** радиолиз - анионларнинг чиқиб кетиши билан борадиган кимёвий боғланишларнинг узилиши, кристалл панжарадаги атомларнинг эластик ва ноэластик силжишлари. Нанозаррачалар ҳосил бўлишига энг яқини – нейтронлар, протонлар, альфа заррачалар таъсирида силжиш термопикларининг пайдо бўлишидир. Бунда кварц холида структуравий анализ ва юқори ажратиш қобилиятли микроскопия усуллари билан тасдиқланган аморфлашуви вужудга келади. Аммо ишқорий галоид кристаллари учун аморфлашув тасдиқланган эмас, структуравий анализ ва микроскопия нанозаррачалар ҳосил бўлишини аниқлади. Биз LiF ва кварц шишаларини бир хил шароитларда нурлантириш билан тадқиқ қилдик ва аморф нанозарраларни эмас, кристалл структурага эга нанокристаллар мавжудлигини топдик.

Олиб борилган тадқиқотлар натижасида биз томонимиздан реал материалларда (айниқса уларнинг сиртида) радиациявий йўл билан кристалл структурага эга нанозаррачалар пайдо бўлишининг радиациявий нуқсонлар

ҳосил бўлиши ва сегрегацияси билан борадиган мураккаб, кўп босқичли механизми таклиф қилинди:

1) ноэластик ўзаро таъсир – нишон томонидан ядровий нурлар энергиясининг (1 МэВ дан ортиқ) тезлик билан ютилиши ва электрон уйғонишлар (электрон коваклар жуфтликлари, экситонлар ва ҳ.к.) пайдо бўлиши;

2) сиртдаги анионни йўқотиш билан борадиган катион-анион кимёвий боғининг радиолизи;

3) атомларнинг ноэластик ва эластик тўқнашувларида ва электрон уйғонишларнинг парчаланишида кристалл панжара нуқсонлари (вакансиялар ва тугунлар орасидаги атомлар, силжиш термопиклари, треклар) генерацияси;

4) ўлчамли нуқсонларда анион вакансияларнинг агрегатлари ва кластерлар/коллоидлари пайдо бўлиши билан борадиган нуқтавий нуқсонларнинг сегрегацияси;

5) эркин энергиянинг минималлашуви билан борадиган структурага эга ва матрица билан когерент интерфейс ҳосил қилувчи нанозаррачаларнинг ўз-ўзидан йиғилиши.

## ХУЛОСА

Физика-математика фанлари доктори (DSc) илмий даражасини олиш учун “LiF кристалларида ва SiO<sub>2</sub> асосидаги шишаларда радиацион-индуцирланган нанотизимлар” мавзусидаги диссертациянинг асосий илмий хулосалари:

1. Тўхтатилган реактор сувида гамма-нурлантириш натижасида LiF нинг сирт ости қатламида ўзида ўлчамлари 28 нм бўлган LiOH киришма нанофазани сақлаган иккиланган (двойниковая) кристалл структура ҳосил бўлиб, унинг микрокаттиклиги LiF дан юқори бўлади.

2. Ҳавода γ-нурлантирилган LiF кристаллида сиртнинг радиолизи ва фторнинг йўқотилиши билан боғлиқ ҳолда нуқтавий радиацион нуқсонлар агрегатлари – анион вакансиялари ўрнида катта эҳтимол билан Мотт-Герни механизми бўйича (nLi 2.6 эВ ли сатҳ ҳосил қилади) ўлчамлари 5 нм лик литий металл нанозаррачаларининг ўз-ўзидан тўпланиши туфайли ҳосил бўлиши билан боғлиқ плазмон жавоби (отклик) топилди.

3. Юқори оптикавий зичликда (D=3–4) изоляцияланган F- ва M-марказлар ютилиш полосаларининг ингичка резонансларга бўлиниши топилди, улар гамма-нурлантирилган LiF кристалларида жуфтлашган F-F ҳамда M-M- марказлар орасидаги энг катта масофа 14 ва 22 нм бўлганида электрон-дипол ўзаро таъсир натижасида вужудга келади. 620 ва 960 нм даги кенг нотурғун полосалар ҳамда 380 нмдаги турғун полоса зарядланган F<sub>2</sub><sup>-</sup> марказлар билан эмас, балки ўтапанжараларга тартиблашган Li-нанозаррачаларнинг плазмон жавоби билан боғлиқдир.

4. Юқори дозали <sup>60</sup>Co >10<sup>8</sup> Р гамма-нурлари билан ва 3 мкА кучли токда 10<sup>17</sup>см<sup>-2</sup> флюенсга 4 МэВ лик электронлар билан нурлантирилган LiF

кристалли сиртида электрон микроскоп усули билан Li нанозаррачалари топилди, улар  $\gamma$ -нурлантирилган ҳолатида параллел микротолалар, электронлар оқимида эса алоҳида оролчалар ташкил этади.

5. 12–15 мкм сиртости қатламида радиациявий нуқсонлари (дислокациялари ва агрегат марказлари) бўлган LiF кристаллининг пластик деформациясини тавсифловчи фазовий заряднинг шакли билан боғлиқ оптик ютилиш, ИҚ-қайтариш ва микроқаттиқликнинг электрон дастаси йўналишига нисбатан анизотропияси аниқланди.

6. Кубик симметрияга эга бўлган LiF кристалларини гамма-нурлари билан изотроп нурлантириганда агрегат  $F_n$  марказларнинг чўзинчоқ шакли ҳисобига оптик ютилишнинг анизотропияси вужудга келиши кўрсатилди. Ми сочилиш назариясига кўра, максимуми доза ортиши билан 272 дан 295 нм гача силжийдиган резонанс ютилиш (110) текисликда жойлашган Li нанокolloидларига боғланади, уларнинг ўлчамлари доза ортиши билан 6.4 дан 7 нм гача ортади.

7. Тез нейтронларнинг  $10^{19}$  см<sup>-2</sup> дан ортиқ флюенси билан реактор иссиқлик ажратувчи йиғилмасида (ТВС), сувда ва энергияси 18 МэВ бўлган протонлар билан  $5 \cdot 10^{15}$  см<sup>-2</sup> флюенсгача вакуумда нурлантириш тоза кварц шишасида силжиш термопикларини вужудга келтиради. Уларда тридимит ва кристобалит нанокристаллитлари ўсади, улар маълум электрон ва ковак марказларга қўшимча, УБ-ютилишининг интенсив резонансларини келтириб чиқаради.

8. Ишқорий металллар, барий ва қурғошин оксид киришмалари киритилган силикат шишани ўртача энергияси  $\sim 1.25$  МэВ <sup>60</sup>Со гамма-квантлар ва 4–8.5 МэВ энергияли электронлар билан нурлантириш турғун бўялиш марказлари ҳосил бўлишига, ютилиш чегарасининг силжишига (Густав Ми назариясига кўра) олиб келади, булардан фойдаланган ҳолда ўлчамлари 15 дан 30 нм гача ўсувчи нанозаррачаларнинг ўлчамлари ва шишанинг чекланган сиқилувчанлиги аниқланди.

9. Барийли ва қурғошинли шишаларнинг уч турдаги электр ўтказувчанлик механизмлари топилди: паст ҳароратдаги атермик электрон механизми (210–285 К оралиғида 0.014 эВ активлашиш энергияси билан), юқори ҳароратли ион механизми (325–360 К оралиқда 1.003 эВ), PbO ва BaO наноқўшилмаларининг массавий миқдоридан боғлиқ бўлувчи, кремний оксиди – металл оксиди интерфейси орқали заряд ташувчиларнинг транспортини кучайтирувчи оралиқ, сакрашлар билан бўладиган механизм (260–350 К).

10. Реактор актив зонасидаги 20 та каналда нейтронлар ва гамма ташкил этувчилар оқимини алоҳида-алоҳида аниқлаш мақсадида комбинациялашган оптикавий ва активациявий дозиметрия амалга оширилди.

11. Ўртача энергияси 4 МэВ, интеграл оқими  $1.8 \cdot 10^{13}$  дан  $1.8 \cdot 10^{15}$  эл/см<sup>2</sup> гача бўлган электронлар билан нурлантирилган натрий-барийли шишада ҳосил бўладиган тўқ жигар рангли бўялиш, BaSiO<sub>2</sub> интерфейсдаги бўялиш марказлари флакон ва ампуладаги доривор препаратларни УБ ва кўринувчи

нурлар таъсирида содир бўладиган фотохимёвий реакциялардан химоя қилади.

12. Гамма нурланишда кристалл диэлектрикка металл нанозаррачаларининг тартиби қўшилмалари сифатида шаклланувчи LiF-Li нанокөмпозитлари замонавий оптоэлектрон қурилмаларда қўлланиш имкөниятига эга.

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

---

**ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ**

**МУССАЕВА МАЛИКА АНВАРОВНА**

**РАДИАЦИОННО-ИНДУЦИРОВАННЫЕ НАНОСТРУКТУРЫ  
В КРИСТАЛЛАХ LiF И СТЕКЛАХ НА ОСНОВЕ SiO<sub>2</sub>**

**01.04.07 – Физика конденсированного состояния**

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации доктора физико-математических наук (DSc)

**Ташкент–2022**

Тема диссертации доктора наук (DSc) зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за номером B2021.2.DSc/FM180.

Диссертация выполнена в Институте ядерной физики Академии наук Республики Узбекистан.

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

**Научный консультант:** **Ибрагимова Эльвира Меметовна,**  
доктор физико-математических наук, профессор

**Официальные оппоненты:** **Мамадалимов Абдугофур Тешабоевич,**  
доктор физико-математических наук, профессор  
академик Академии наук Республики Узбекистан

**Нуритдинов Иззатилло,**  
доктор физико-математических наук, профессор

**Тошмухамедова Дилноза Артикбаевна,**  
доктор физико-математических наук, профессор

**Ведущая организация:** **Ферганский политехнический институт**

Защита диссертации состоится “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2022 г. в \_\_\_ часов на заседании Научного совета DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 при Институте ядерной физики. (Адрес: 100124, г. Ташкент, пос. Улугбек, Институт ядерной физики; тел.: (+99871) 289–31–41, факс (+99871) 289–36–65, e-mail: [info@inp.uz](mailto:info@inp.uz)).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Института ядерной физики (зарегистрирована за № \_\_\_\_\_). Адрес: 100124, г. Ташкент, пос. Улугбек, ИЯФ; тел.: (+99871) 289–31–19).

Автореферат диссертации разослан “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2022г.  
(реестр протокола рассылки № \_\_\_ от “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2022 г.)

**М.Ю. Ташметов**  
председатель Научного совета по  
присуждению ученых степеней,  
д.ф.-м.н., профессор

**О.Р. Гожибоев**  
ученый секретарь Научного совета по  
присуждению ученых степеней,  
PhD ф.м.н.

**С.В. Артёмов**  
Заместитель председателя научного семинара при  
Научном совете по присуждению ученых степеней,  
д.ф.-м.н., профессор



## **ВВЕДЕНИЕ (аннотация докторской диссертации (DSc))**

**Актуальность и востребованность темы диссертации.** В последнее время во всем мире большое внимание уделяется наноструктурным материалам с уникальными функциональными свойствами, такими как эффективный катализ, интенсивная люминесценция, высокая электропроводность и гигантский парамагнетизм. Они основаны на трех эффектах: высокое отношение поверхности к объему при количестве атомов в наночастице в пределах  $10^3$ – $10^6$ , внутренний и внешний квантово-размерные эффекты, а также сильные электродинамические взаимодействия в металлической наночастице (поверхностный плазмонный резонанс) и между ними в диэлектрической среде.

В мире актуальной проблемой нанофизики является выяснение механизмов образования и взаимодействия электропроводящих наночастиц разной формы в диэлектрических матрицах, а также процессов на интерфейсах нанометалл-диэлектрик. Создание устойчивых наноструктур имеет важное значение в области нанотехнологий.

В нашей республике развивается атомная и возобновляемая энергетика и разрабатываются технологии создания новых наноструктурных материалов для энергетики. Поэтому актуальны исследования наночастиц легких и тяжелых металлов в диэлектрических кристаллах и стеклах и по разработке нанокомпозитов на основе радиационных технологий при контроле фазового состава и характеристик, предназначенных для функционирования в радиационных полях. Направления этих фундаментальных исследований и разработок отражены в Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан на 2017–2021 годы<sup>1</sup>.

Данное диссертационное исследование служит выполнению задач, предусмотренных в Указах Президента Республики Узбекистан № УП-4512 от 1 марта 2013 года «О мерах по дальнейшему развитию альтернативных источников энергии», № УП-4947 от 7 февраля 2017 года «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан на 2017–2021 гг.», Постановлении Президента Республики Узбекистан № ПП-2789 от 17 февраля 2017 года «О мерах по дальнейшему совершенствованию деятельности Академии наук, организации, управления и финансирования научно-исследовательской деятельности», а также в других нормативно-правовых документах, принятых в данной сфере.

**Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики.** Диссертационная работа выполнена в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий в республике II. «Энергетика, энерго- и ресурсосбережение».

**Обзор зарубежных научных исследований по теме диссертации<sup>2</sup>.** Исследования по созданию новых оптических материалов многоцелевого

---

<sup>1</sup>Указ Президента Республики Узбекистан № УП-4947 от 07 февраля 2017 г. «Стратегию действий по пяти приоритетным направлениям развития Республики Узбекистан в 2017–2021 годах».

назначения на базе щелочно-галоидных кристаллов, таких как LiF, проводятся ведущими мировыми научными центрами и высшими образовательными учреждениями, в том числе, Институтом физики и Тартуским университетом (Эстония), Государственным оптическим институтом, Томским политехническим университетом (Россия), Евразийским национальным университетом (Казахстан), Криворожским национальным университетом и Институтом монокристаллов (Украина), Политехническим университетом (Франция), Ок-Риджской Национальной Лабораторией (США), Университетом "Ла Сапиенца" (Италия).

Разработки по радиационно-стойким стеклам, радиационному окрашиванию стекол разных составов проводятся в Научно-исследовательском и технологическом институте оптического материаловедения, Государственном оптическом институте, Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе, Институте химии силикатов, Московском государственном университете, Физическом институте РАН, Уральском государственном техническом университете (Россия), Институте физики твердого тела (Латвия), Институте физики НАН Беларуси (Минск), Университете Шизуока (Япония), Центре атомных исследований Бхабхи (Индия), Национальной лаборатории Oak Ridge (США), Исследовательском центре Фраскати (Италия), ядерных институтах (Германия), Институте физики твердого тела (Китай) и других учреждениях.

Систематически изучены физические характеристики коллоидных и наноразмерных частиц металлов в твердой, газовой и жидкой средах, они классифицированы в зависимости от геометрической формы и размерности структурных элементов. На примере модельных щелочно-галоидных кристаллов и силикатных стекол установлено, что структурные, оптические и электрические характеристики наночастиц отличаются от объемных характеристик из-за изменения энергетического спектра.

В настоящее время во многих странах мира ведутся широкомасштабные исследования по одному из приоритетных направлений ядерной энергетики - радиационному материаловедению для обеспечения функционирования ядерно-физических и энергетических установок, в том числе разрабатываются радиационно-стойкие и радиационно-чувствительные материалы, радиационные технологии модификации твердотельных наноматериалов, обеспечивающие надежное функционирование приборов и оборудования в полях ионизирующих излучений.

**Степень изученности проблемы.** Исследованиями структуры щелочно-галоидных ионных кристаллов LiF и оптических свойств кварцевого и силикатного стекла занимаются многие ученые ведущих научных центров мира, например, российские (И.П. Суздалев, В.В. Климов, А.И. Гусев, А.А., Воробьев, Е.В. Колонцова, Е.Ф. Мартынович, Е.А. Раджабов, В.М. Лисицын,

---

<sup>2</sup>Обзор зарубежной научной литературы по теме диссертации: <http://journals.ioffe.ru>; <https://elibrary.ru>; <https://www.springer.com>; <https://www.journals.elsevier.com>; <https://journals.jsap.jp>

<https://ur.booksc.eu>; <https://iopscience.iop.org>; <https://www.rsc.org>; <https://www.sciencedirect.com>; <https://www.tandfonline.com>; <https://www.semanticscholar.org> и на основе других источников.

Л.А. Лисицына, В.М. Рейтеров, Б.Д. Лобанов, А.Ф. Зацепин, Р.А. Андриевский, В.В. Варгин, Г.В. Бюргановская, Н.Ф. Орлов, В.С. Кортон, Г.О. Карапетян, А.В. Амосов, Г.Т. Петровский, С.М. Бреховских, В.П. Пух, В.А. Тюльнина, Л.М. Ланда), латвийские (К.К. Шварц, Е. Котомин, А.И. Попов, Ю.А. Экманис, А. Силинь), эстонские (Ч.Б. Лущик, А.Ч. Лущик), украинские (И.С. Радченко, Г.Г. Бондаренко), грузинские (Э.Л. Андрионикашвили, М.Г. Абрамишвили), белорусские (Ф.Ф. Комаров, О.Н. Билан, Н.Г. Черенда, Д.М. Юдин), немецкие (G. Mie, U. Kreibig, H. Gleiter, C. Trautmann), американские (F.W. Clinard, J.R. Hobbs, H. Gao, Fleischer, M.B., P. Wiks, D.L. Griscom, K. Strauda, D. Mackey), японские (K. Kubo, Y. Akashi, Y. Yoneda, N. Itoh, R. Yokota, A. Beshey, N. Sogi, M. Tashiro, S. Saki), французские (F. Beuneu), великобританские (T. Young, M. Stoneham), итальянские (G. Baldacchini, R.M. Montereali), казахстанские (А.Т. Акилбеков, А.К. Даулетбекова), узбекистанские (акад. С.В. Стародубцев, акад. Ш.А. Вахидов, акад. П.К. Хабибуллаев, акад. М.С. Юнусов, акад. У.Х. Расулев, акад. М.Х. Ашуров, акад. А.Т. Мамадалимов, Б. Каипов, Э.М. Гасанов, Э.М. Ибрагимова, Б.Л. Оксенгендлер, С. Джуманов, И. Нуритдинов, Ж.Д. Ибрагимов, И.Х. Абдукадырова, М.И. Муминов, С.С. Касымова, М.А. Касымджанов, Б.Е. Умирзаков, Н.Н. Тураева, Д.А. Ташмухамедова, Г. Абдурахманов, Б.Г. Атабаев) и другие специалисты.

В настоящее время достаточно подробно исследованы как экспериментально, так и теоретически кристаллы LiF в качестве оптического материала для ультрафиолетового диапазона. Установлено, что под действием ионизирующих излучений в LiF эффективно формируются различные стабильные центры окраски, обладающие высоким выходом люминесценции при комнатной температуре. Определены возможности использования LiF в качестве радиодозиметрического материала в лазерном приборостроении в качестве активной среды и материала для пассивных затворов, при создании высоконелинейных фоточувствительных сред и носителей информации на их основе, дифракционных решеток, активных волноводов и других оптических элементов. Доминирует концепция распада экситонов с образованием точечных и агрегатных дефектов. Экспериментальные оптические спектры после облучения приписываются электронным переходам, а рассеяние от металлических коллоидов описывается только теоретически. По этой же концепции определены механизмы образования и условия стабилизации в массивных стеклах и потери в волоконных световодах (квазиодномерных). Высокое практическое значение имеет получение свинцовых микро- и нанонитей в стеклянной матрице, обладающих в определенных условиях сверхпроводимостью.

В то же время остаются нерешенными некоторые проблемы. Созданная теория, описывающая металлические коллоиды и наночастицы в щелочно-галоидных кристаллах и в диэлектрических стеклах, еще не получила адекватного подтверждения в экспериментах по наведению центров окраски

облучениями. До сих пор заряженные агрегаты анионных вакансий и коллоиды металлов неоднозначно определены в оптических спектрах, облученных или аддитивно окрашенных щелочно-галоидных кристаллов. Свойства интерфейсов нанометалла в кристаллической или стеклянной диэлектрической матрице изучены недостаточно: не были проведены комплексные исследования взаимосвязи кристаллической структуры наночастиц и их морфологии (размеры и форма) и электронной структуры облученного нанокомпозита (оптические спектры и электропроводность), влияния параметров различных видов ионизирующих излучений на образование возможных нанофазных включений в кристаллической и стеклянной матрицах.

**Связь темы диссертации с планами научно-исследовательских работ научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация.** Диссертационная работа выполнена в соответствии с планами научно-исследовательских работ Института ядерной физики АН РУз по темам: Ф-2.1.2 «Структура, электрофизические, магнитные и механические свойства многокомпонентных нестехиометричных материалов при терморadiационных воздействиях» (2003–2007); 4-04 «Индукцированные гамма-излучением реактора изменения структуры и оптических свойств кристаллов LiF, ZnSe» (2004–2005); 2-06 «Радиационно-индуцированное формирование наноструктур» (2006–2007); А5-049 «Разработка способов радиационной обработки драгоценных и полудрагоценных камней с целью усиления их цвета и повышения качества» (2006–2008); ФА-Ф2-Ф068 «Радиационная инженерия наноструктурных материалов» (2008–2011); ФА-Ф2-Ф120 «Электронные свойства и радиационная модификация низкоразмерных высокотемпературных сверхпроводников, полупроводниковых гетероструктур, металлов и их оксидов» (2012–2016); ОТ Ф2-26 «Механизмы формирования функциональных наноструктур в пучке электронов» (2017–2020);

**Целью исследования является** выяснение механизмов образования наночастиц и формирования наноструктур в модельной диэлектрической кристаллической и стеклянной матрице с ковалентной и ионной химической связью при воздействии ядерных излучений и пучков заряженных частиц.

**Задачи исследования:**

выяснение условий (тип частиц, энергия, поток, флюенс) эффективного создания наночастиц в щелочно-галоидных кристаллах и стеклянной матрице при длительном облучении в воздушной среде гамма-квантами  $^{60}\text{Co}$  и смешанным потоком нейтронов и гамма-лучей реактора ВВР-СМ, а также пучками ускоренных протонов в вакууме и электронов на воздухе;

определение кристаллической структуры, размеров, формы и ориентации наночастиц Li в кристаллах LiF, наночастиц примесной фазы тяжелого металла (Ba, Pb) и его оксида в стеклянной матрице SiO<sub>2</sub>;

определение локальной микро- и нано-нестехиометрии элементного состава облученной поверхности кристалла и стекла;

установление зависимости микротвердости приповерхностного слоя кристаллов LiF и стеклянной матрицы SiO<sub>2</sub> от характеристик наночастиц Li и наночастиц примесной фазы на основе тяжелого металла (Ba,Pb) и оценка глубины этого слоя;

определение полосы экстинкции (поглощения+рассеяния), смещающейся по длине волны в зависимости от дозы облучения, и оценка размеров и размерности наночастиц;

определение энергии и заселенности уровней электронной структуры по оптическому поглощению, фото- и гамма-люминесценции, отражению, пропусканию до и после облучения;

выявление анизотропии оптического поглощения несферических, низкоразмерных металлических наночастиц с трех сторон в кристаллах LiF в виде куба после облучения гамма-лучами и электронами;

определение влияния размеров/формы наночастиц на основе легчайшего металла Li и тяжелых металлов (Ba,Pb) на поверхностную электропроводность (в координатах Мотта) кристалла LiF и стекла SiO<sub>2</sub> и расчет энергии активации прыжков.

**Объектами исследования являются** наночастицы и наноструктуры в модельных монокристаллах LiF высокого качества с ионной связью, в высокочистом кварцевом стекле (SiO<sub>2</sub>) с ковалентной связью и легированном стекле (SiO<sub>2</sub>-Na,K,Ba), в хрустальном стекле (SiO<sub>2</sub>-PbO).

**Предметом исследования являются** механизмы образования наночастиц и наноструктур из 0-1-2-3-мерных дефектов в ионной кристаллической и стеклянной диэлектрической матрице при воздействии ядерных излучений и пучков ускоренных заряженных частиц, зависимости свойств от структуры и состава в микро- и наноразмерном масштабе.

**Методы исследования.** Комплекс поверхностно-чувствительных методов: рентгено-флуоресцентный анализ элементного состава, рентгено-дифракционный анализ структуры и фазового состава; инфракрасная и электронная микроскопия, оптическое и ИК отражение, определение микротвердости, электропроводности, а также объемные методы: гамма-люминесценция, фотолюминесценция, оптическая и ИК спектроскопия поглощения и пропускания; расчеты размеров наночастиц.

**Научная новизна исследования** заключается в следующем:

установлено образование наночастиц Li в LiF при облучении  $\gamma$ -лучами дозой  $>10^8$  Р и флюенсом электронов до  $10^{17}$  эл/см<sup>2</sup>, собирающихся в виде параллельных электропроводящих микронитей (при  $\gamma$ -облучении) и отдельных островков (при облучении 4 МэВ электронами), увеличение примесной фазы LiOH при  $\gamma$ -облучении в остановленном реакторе, которые приводят к увеличению интенсивности гамма люминесценции  $F_4^+$ -центров и росту вклада излучательной термостимулированной рекомбинации на интерфейсе Li-нанометалл-LiF-диэлектрик;

предложено использование бесцветных кристаллов LiF в качестве оптических детекторов поглощенной дозы в интервале  $10^4$ - $10^5$  Гр  $\gamma$ -излучения

остановленного реактора с учетом образования (сегрегации) нановключений примесной фазы LiOH;

впервые обнаружены нанокристаллические включения кристобалитов в чистом SiO<sub>2</sub> стекле, BaO и BaSiO<sub>3</sub> в барий-содержащих стеклах, установлен их радиационно-индуцированный рост и преимущественная укладка, приводящие к упрочнению поверхности и изменению микротвердости;

показано, что облучение  $\gamma$ -квантами и электронами 4 и 8.5 МэВ силикатного стекла с примесями щелочных металлов, оксидов Ba и Pb приводит к образованию стабильных центров окраски, красному сдвигу края поглощения, созданию наночастиц размерами от 15 до 30 нм, ограниченными сжимаемостью сетки стекла;

в  $\gamma$ -облученном кварцевом стекле обнаружены нанокристаллиты  $\alpha$ -кварца, кристобалита и тридимита, в хрустале - молекулярные кристаллиты PbO и BaO, в силикатных стеклах - нанокристаллиты BaO<sub>2</sub> и перовскита BaSiO<sub>3</sub> размерами от 8 до 30 нм, которые следует учитывать в дозиметрии, изменения оптических спектров стекол вызваны индуцированной поляризацией наночастиц на интерфейсе металл-диэлектрик, где в результате сегрегации образуется двойной электрический слой;

выявлено, что облучение чистого кварцевого стекла быстрыми нейтронами флюенсами выше 10<sup>19</sup> см<sup>-2</sup> в реакторе в воде и протонами флюенсами до 5·10<sup>15</sup> см<sup>-2</sup> в вакууме создает термопик смещения, где вырастают нанокристаллиты тридимита и кристобалита, которые обуславливают интенсивные резонансы в УФ-поглощении;

предложен способ отдельной дозиметрии потоков гамма-излучения реактора в присутствии/отсутствии быстрых нейтронов с помощью плавленого кварца.

**Практические результаты исследования** заключаются в следующем:

впервые предложено использовать  $\gamma$ -излучение остановленного реактора с широким спектром энергий для научных исследований и разработок технологий радиационной модификации твердых тел без наведения радиоактивности;

разработана методика измерения и определения интенсивности  $\gamma$ -излучения остановленного реактора (~26 Гр/с) с помощью оптических детекторов поглощенной дозы в интервале 10<sup>4</sup>–10<sup>5</sup> Гр (кристаллов LiF или SiO<sub>2</sub>–BaO стеклов), градуированных на сертифицированном квазистационарном <sup>60</sup>Co  $\gamma$ -источнике;

определен квазистационарный поток ионизирующего излучения 0.6 Гр/с в мокром хранилище топлива ядерного реактора, который можно использовать для стерилизации материалов/изделий в герметичной упаковке.

**Достоверность результатов исследования** обосновывается применением комплекса взаимодополняющих современных и хорошо зарекомендовавших себя поверхностно-чувствительных аналитических методов, большой статистикой и хорошей воспроизводимостью измерений; логичностью и непротиворечивостью результатов и выводов общим

физическим представлениям о физике наноструктур и наночастиц, взаимодействиях диэлектриков с заряженными частицами, нейтронами и гамма-излучениями, сопоставлением их с физическими теориями, закономерностями и моделями.

**Научная и практическая значимость результатов исследования.** Научная значимость работы заключается в систематическом комплексном исследовании механизмов образования наночастиц из радиационных дефектов разной размерности путем радиолиза и сегрегации, получении информации, полезной для развития направления радиационной физики наноструктур и наноматериалов в области физики конденсированного состояния.

Практическая значимость полученных результатов исследований заключается в потенциале их применения для разработки нано- и микро-структурированных электродов в современных литиевых аккумуляторах, сцинтилляторных и рентгеновских детекторов с наночастицами.

**Внедрение результатов исследования.** На основе полученных результатов по исследованию радиационно-индуцированных наноструктур в кристаллах LiF и стеклах на основе SiO<sub>2</sub>:

установление образования в LiF наночастиц Li, собирающихся в виде параллельных электропроводящих микронитей при облучении  $\gamma$ -лучами и в виде отдельных островков при облучении 4 МэВ электронами, увеличение примесной фазы LiOH при  $\gamma$ -облучении в остановленном реакторе, использованы зарубежными исследователями (ссылки в международных научных журналах Technical Physics Letters, 2019.Vol.45. No.7. pp. 679–682; Physical Chemistry Chemical Physics, 2021. 23(17) pp.10384–10394; Scientific Reports, 2016. 6:25435. pp.1–6). Использование научных результатов позволило объяснить радиационные эффекты в термолюминесцентном дозиметре на основе LiF-Mg и Ti и образование кластеров Li в расплаве LiCl-Li;

предложенный оптический детектор поглощенной дозы  $\gamma$ -излучения на основе бесцветных кристаллов LiF, а также обнаружение в  $\gamma$ -облученном кварцевом стекле нанокристаллитов  $\alpha$ -кварца, кристобалита и тридимита, в хрустале - молекулярных кристаллитов PbO и BaO, в силикатных стеклах - нанокристаллитов BaO<sub>2</sub> и перовскита BaSiO<sub>3</sub>, а также изменения оптических спектров стекол, вызванные индуцированной поляризацией наночастиц на интерфейсе металл-диэлектрик, где образуется двойной электрический слой, использованы в ИЯФ АН РУз на уникальном научном объекте «Исследовательский ядерный реактор» для дозиметрии больших доз, а также в рамках прикладных проектов ФА-А3-Ф004 «Разработка методов оптимизации топливных циклов и контроля параметров ядерного реактора ВВР-СМ ИЯФ АН РУз» (2018–2020), ФА-А14-Ф062 «Постконверсионное улучшение эксплуатационных параметров исследовательского реактора ВВР-СМ» (2009–2011) (Письмо Академии наук Республики Узбекистан №31-2115-376 от 30.06.2020г. Патент РУз № IAP 2009 0114 от 23.04.2009. 2010. №4 (108). с.13.). Использование научных результатов позволило сравнить расчетную

оценку потоков нейтронов и сопутствующего  $\gamma$ -излучения во всех вертикальных каналах с экспериментальными значениями дозиметрии и повысить точность определения длительности и дозы облучения, а также разработке радиационной технологии облагораживания природных драгоценных минералов в реакторе ВВР-СМ;

обнаружение нанокристаллических включений кристобалитов в чистом  $\text{SiO}_2$  стекле,  $\text{BaO}$  и  $\text{BaSiO}_3$  в барий-содержащих стеклах, установление их радиационно-индуцированного роста и ориентированной укладки использованы зарубежными исследователями (ссылки в международных научных журналах: *Glass Physics and Chemistry*, 2015. Vol. 41. No. 4. pp. 385–388; *Strength of Materials*, 2011. Vol. 43. No. 1. p.109–112.; *Prog. Photovolt: Res. Appl.* 2004, 12:569–572). Использование научных результатов позволило объяснить влияние высоких доз облучения электронами на структуру и состав пленок, и нейтронами на объемное расширение решетки кварца; экспериментально обнаруженное окисление и диспропорционирование на границах аморфного  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  после  $\gamma$ -облучения, влияние термической обработки на микротвёрдость кварцевого стекла, реакторного излучения на микротвёрдость авиалей типа САВ-1;

предложенный способ отдельной дозиметрии потоков гамма-излучения реактора в присутствии/отсутствии быстрых нейтронов с помощью плавленого кварца был использован для метрологических исследований экспериментального канала исследовательского ядерного реактора ОР мощностью 0.1–300 кВт на опытной базе НИЦ «Курчатовский институт» (ссылки в международных научных журналах: *Measurement Techniques*, 2021, vol. 64, pp.244–249; *Journal of Nuclear Materials*, 2013, vol.443. pp.393–397; *Journal of Advanced Concrete*, 2018, vol. 16. Issue 5. pp.191–209). Использование научных результатов позволило определить вклад поглощенной дозы гамма-излучения в общую поглощенную дозу при облучении в реакторе в установленном режиме и в режимах повышения и понижения мощности реактора ОР.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 25 международных и республиканских научных конференциях.

**Публикация результатов исследований.** По теме диссертации опубликованы 48 научных работ, из них 1 патент, 22 статьи в научных изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов докторских диссертаций, из которых 15 в зарубежных научных журналах.

**Структура и объем диссертационной работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы. Объем диссертации составляет 225 страниц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Во введении** обоснованы актуальность и востребованность исследования, показана связь исследования с основными приоритетными направлениями развития науки и технологий в республике, обсуждена степень изученности проблемы, 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 результатов исследования, приведены краткие сведения об апробации работы, объеме и структуре диссертации.

В первой главе **«Обзор литературы о физико-химических характеристиках наночастиц в кристаллах LiF и в стеклах на основе SiO<sub>2</sub>»** приведены литературные данные экспериментальных и теоретических исследований, наночастиц и наноструктур. Анализированы работы, посвященные различным методам получения наночастиц и коллоидных растворов лития в различных средах. Отмечается, что до сих пор считалось, что центры окраски и свечения связаны с радиационно-наведенными точечными дефектами, которые в зависимости от условий облучения распределены либо равномерно в объеме, либо с некоторым градиентом концентрации вдоль направления пучка частиц. Однако в определенных условиях облучения происходят радиационно-индуцированные фазовые переходы с формированием нанокристаллических включений, также влияющие на оптические и механические свойства, которые исследованы недостаточно подробно.

Во второй главе **«Объекты исследования и методика экспериментов»** описаны методики получения кристаллов LiF и стекол на основе SiO<sub>2</sub>, измерения и анализа их структуры, механических, электрических и оптических свойств.

Образцы кристаллов LiF и стекол на основе SiO<sub>2</sub> предоставлены ГОИ для исследований воздействия ядерных излучений. Механизмы образования нанокolloидов металлов при термообработке в парах металла или воздействии ионизирующего излучения высокой энергии основываются на эффекте нарушения стехиометрии поверхности кристалла ЩГК при разрыве химических связей и улетучивании анионов. В экспериментах использовали  $\gamma$ -облучение <sup>60</sup>Co (средняя энергия ~1.25 МэВ), смешанное  $\gamma$ -*n*-облучение через Cd-фильтр без потока тепловых нейтронов до  $3.3 \cdot 10^{17}$  см<sup>-2</sup> с потоками  $\gamma$ -квантов (до 7 МэВ дозами до  $5 \cdot 10^8$  Р), быстрыми нейтронами в активной зоне в ионизованном воздухе, 18 МэВ протонами до  $10^{15}$  см<sup>-2</sup> в вакууме, пучком электронов энергией 4 МэВ, импульс тока 4.5 мкс, плотность тока пучка от 50 до 3000 нА/см<sup>-2</sup>, интегральный флюенс от  $10^{13}$  до  $10^{17}$  эл/см<sup>2</sup>.

Для решения главной задачи - разделения вклада наноразмерных и точечных дефектов-использован комплекс поверхностно-чувствительных и объемных методов анализа: рентгено-флуоресцентный анализ был проведен

на многоканальном анализаторе с Ge-детектором (ошибка <0.1%); локальный элементный состав приповерхностных микро- и наноструктур определяли на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) EVO MA10 (Zeiss) в масштабах 2–20 мкм с энергодисперсионной системой EDS Aztec (Oxford Instrum) начиная от Be (ошибка  $\pm 0.2\%$ ); структуру и фазовый состав образцов, а также размеры, структуру и ориентацию наночастиц, исследовали методом рентгеновской дифракции на установке ДРОН-3М ( $\lambda_{\text{CuK}\alpha} = 0.1542$  нм) в интервале углов  $2\Theta = 10 \div 70^\circ$ , а также Empyrean (PANalytical) в 5–140 град. с Ni-фильтром и светосильной X-трубкой с Cu-катодом; микротвердость приповерхностного слоя определяли на приборе ПМТ-3 при нагрузках 20–200 грамм; измерения поверхностной электропроводности ( $\sigma_s$ ) проводили при постоянном напряжении 10 В по классической трехэлектродной схеме с охраным электродом в интервале температур 300–500 К при скорости нагрева образцов 7.3 К/мин; спектры оптического поглощения (ОП) снимали на спектрофотометрах Specord M-40 «Карл-Цейсс» в интервале 200–900 нм и на СФ-56 (ЛОМО) при ширине щели 6 нм в интервале длин волн 190–1100 нм и оптических плотностей до 5, а ИК-спектры пропускания/поглощения/отражения снимали в интервале волновых чисел 4000–400  $\text{см}^{-1}$  на спектрометре iS50 Nicolet (Thermoscience). Благодаря большой статистике ошибки <1%; спектры фотолюминесценции (ФЛ) снимали на флюориметре MPF-2A в интервале длин волн 200–800 нм при возбуждении лазерными импульсами длительностью 12 нс и длине волны 337 нм (ИЛГИ-503) при 300 К; спектры гамма-люминесценции (ГЛ) снимали в канале гамма-источника  $^{60}\text{Co}$  при мощности 406 Р/с и температуре 320 К с помощью светопровода и призмленного монохроматора SPM-2 в интервале длин волн 200–800 нм с фотоэлектрической приставкой МСД-1БУ.

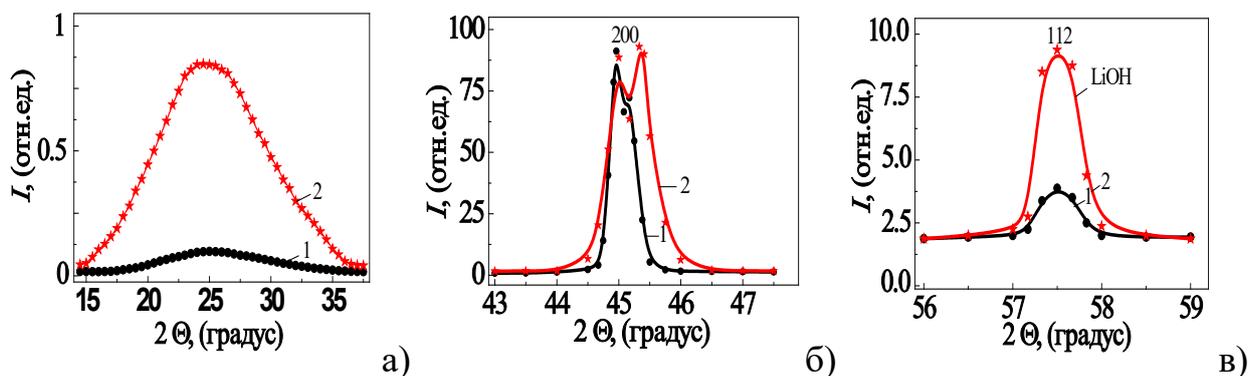
В третьей главе «**Радиационно-индуцированные наночастицы и наноструктуры в кристаллах LiF**» описаны результаты исследования кристаллической структуры, механических свойств, спектры ОП, ФЛ и ГЛ, электропроводности указанных выше кристаллов до и после облучения ионизирующими излучениями.

Кристаллы LiF были сколоты по плоскости (100) в виде пластин. Порошки размолоты до 14–21 мкм. Размеры кристаллических нановключений определяли по формуле Селякова-Шеррера:

$$L = 0.94 \cdot \lambda / \beta_{hkl} \cdot \cos \Theta_{hkl}, \quad (1)$$

где L- размер зерна (нм),  $\lambda$ - длина волны излучения трубки (нм),  $\Theta$  - угол отражения (радиан),  $\beta$ - полуширина этого отражения (радиан).

На рис.1 показаны фрагменты рентгенограмм кристаллов LiF до и после гамма-облучений в канале активной зоны после остановки реактора.



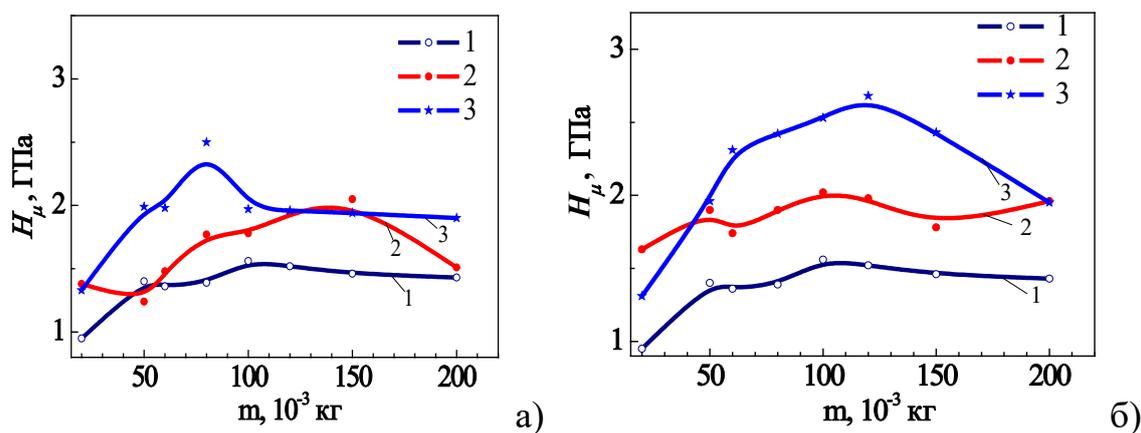
1- необлученный эталон и 2-гамма-облученный 10 часов в воде в канале активной зоны после остановки реактора

**Рис. 1. Фрагменты рентгенограмм кристаллов LiF**

Обнаружено изменение соотношения интенсивностей компонент и формы селективного рефлекса 45 град (рефлекс 200) от матричной решетки в результате облучения (рис.1,б), которое отличается от расчетных по рассеянию от наночастиц металла и свидетельствует о радиационно-индуцированном двойниковании структуры в плоскости  $\{111\}$  в матричной решетке LiF. Кроме того, происходит рост интенсивности диффузной полосы (фрагмент а) и структурного (фрагмент в) рефлекса 57.5 град (112) после облучения в результате радиолитического разложения молекул воды на поверхности LiF и образования структурных дефектов из-за удаления молекул фтора, а также допирования водородом или ОН-радикалами. Обнаруженный рефлекс (112) с межплоскостным расстоянием  $1.612 \text{ \AA}$  принадлежит к примесным щелочным нанопреципитатам LiOH (рис.1,в) размером  $\sim 28 \text{ нм}$ . Их содержание увеличивается в 3 раза после облучения.

Поскольку методом РСА невозможно сканировать приповерхностные слои по глубине, для исследования нановключений в этих слоях использовали метод микротвердости.

На рис. 2 показаны зависимости микротвердости  $H_\mu$  кристаллов LiF от массы нагрузки до и после гамма-облучения в источнике  $^{60}\text{Co}$  и в остановленном реакторе. Видно, что после облучения  $H_\mu$  растет во всем исследованном интервале нагрузок, что означает радиационно-индуцированное упрочнение приповерхностного слоя. Дозовая зависимость прироста величины микротвердости в результате гамма-облучения в реакторе более заметна, поскольку с участием воды образовалась более плотная двойниковая структура с нановключениями LiOH размерами  $\sim 28 \text{ нм}$ . Невозможно было определить дозу, поскольку интенсивность гамма-потока в остановленном реакторе спадала немонотонно со временем, поэтому дозу оценивали в сравнении с эффектом  $^{60}\text{Co}$ . Логично можно объяснить меньшее значение микротвердости после гамма-облучения источником  $^{60}\text{Co}$  в сухом воздухе, поскольку образовались наночастицы Li с меньшими (8 нм) размерами. Таким образом, результаты микротвердости согласуются с результатами РСА.



1- эталон, 2-  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ -облучение при мощности дозы 765 Р/с, 3-  $\gamma$ -облучение в воде в канале активной зоны остановленного реактора; а) 10 часов, б) 54 часа

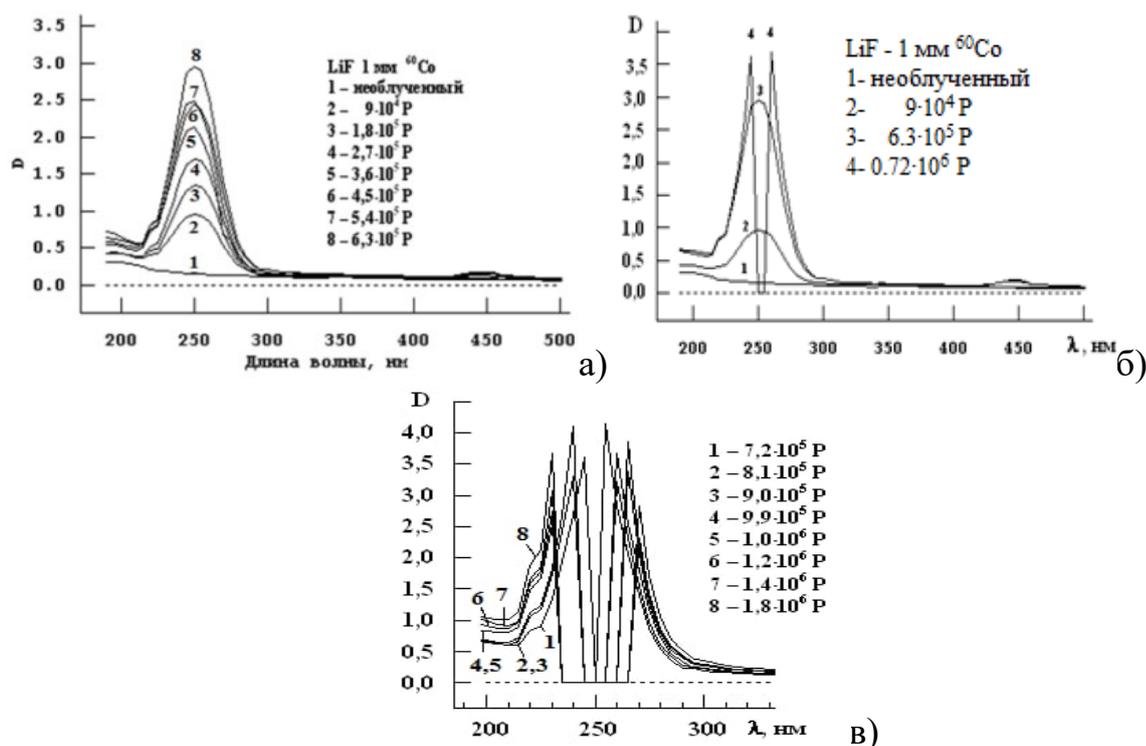
**Рис.2. Микротвердость кристаллов LiF**

На рис. 3б), в), г) показаны спектры поглощения кристаллов LiF толщиной 1 мм, гамма-облученных в интервале доз  $9 \cdot 10^4$ – $1.8 \cdot 10^6$  Р. Интенсивность полосы 250 нм, соответствующей  $F$ -центрам, сначала растет линейно с дозой до  $D = 3.0$  и ее полуширина уменьшается от 0.89 до 0.74 эВ (рис.3а). В этом интервале доз длина волны полосы  $F$ -центров не изменяется с дозой, что вместе с линейным ростом оптической плотности полностью соответствует концепции изолированных электронных осцилляторов, однородно распределенных в объеме прозрачного диэлектрика, положенной в основу закона Бугера-Бера, и вытекающих из него формул Смакулы-Декстера для определения концентрации  $F$ -центров. Одиночные  $F$ -центры имеют сферическую симметрию, поэтому характеризуются широкой симметричной Гауссовой полосой. Концентрацию оптических центров считали по формуле Смакулы-Декстера:

$$N = 1.28 \cdot 10^{17} [n/(n^2+2)^2] \cdot K_m H / f \text{ см}^{-3}, \quad (2)$$

где  $n$ - показатель преломления для длины волны, соответствующей максимуму  $F$ -полосы, равен 1.35 для LiF;  $f$ -сила осциллятора;  $H$ -полуширина  $F$ -полосы, эВ;  $K_m$ -коэффициент поглощения в максимуме  $F$ -полосы,  $\text{см}^{-1}$ .

При дозе облучения  $0.72 \cdot 10^6$  Р происходит ее расщепление на дублет двух узких линий асимметричного профиля с максимумами 245 и 260 нм и  $D \sim 3.6$ . Одновременно появляется слабая полоса 450 нм (рис. 3а), б), обусловленная бивакансиями фтора, а кристалл становится светло-зеленым. Эта окраска преобразуется в желтую через 3 часа выдержки при 300 К, что связано с нестабильными  $H$ -центрами (молекулы  $F_2$ ). Повторные измерения показывают, что расщепление на дублет 245 и 260 нм тоже нестабильно и одиночная полоса 250 нм восстанавливается, но с немного большей оптической плотностью.



**Рис.3.** Дозовые зависимости полосы поглощения 250 нм *F*-центров в кристаллах LiF (толщина 1 мм),  $\gamma$ -облученных источником  $^{60}\text{Co}$  в воздухе при мощности дозы 520 Р/с и  $T = 320$  К дозами  $9 \cdot 10^4$ – $6.3 \cdot 10^5$  Р (а) до дозы  $0.72 \cdot 10^6$  Р (б) и  $7.2 \cdot 10^5$ – $1.8 \cdot 10^6$  Р (в)

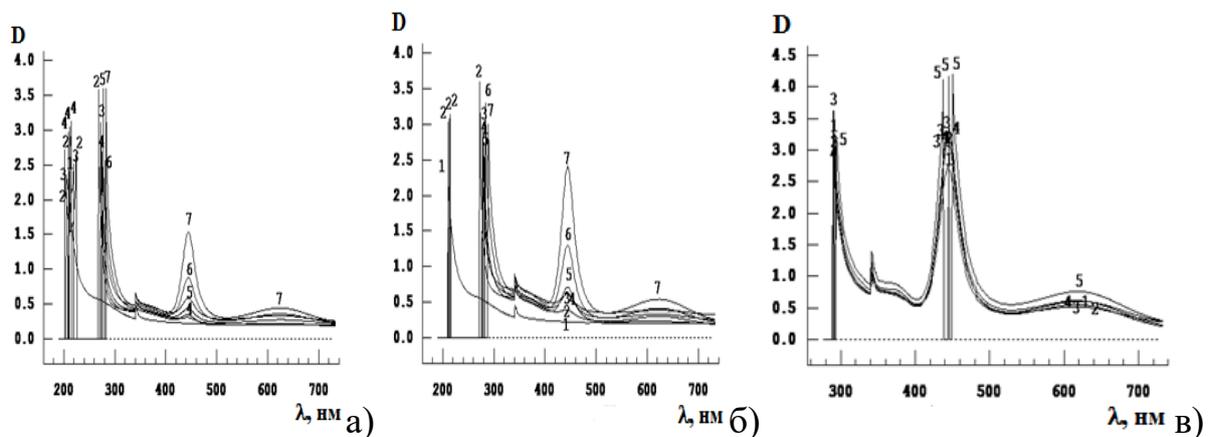
Среднее расстояние между соседними центрами определяли через концентрации  $N$  по формуле  $d = 10^7 / N^{1/3}$  (нм), результаты приведены в табл. 1.

**Таблица 1**  
**Расчеты концентрации  $N_F$  по показателю преломления, коэффициенту поглощения и полуширине полосы *F*-центров 4.95 эВ (250 нм), концентрации  $N_M$  *M*-центров 2.78 эВ (445 нм) и расстояния  $d$  между центрами в кристаллах LiF,  $\gamma$ -облученных при 520 Р/с и 320 К**

Доза, $10^5$ Р	$N_F$ (250 нм), $10^{17} \text{ см}^{-3}$	$d$ между <i>F</i> – <i>F</i> центрами, нм	Доза, $10^5$ Р	$N_M$ (445 нм), $10^{16} \text{ см}^{-3}$	$d$ между <i>M</i> – <i>M</i> центрами, нм
0	0	–	8.1	0.64	54.3
0.9	0.97	21.7	9.9	1.14	44.8
1.8	1.33	19.5	18	1.61	40.0
2.7	1.63	18.2	37	2.24	35.8
3.6	1.97	17.2	55	2.92	32.9
4.5	2.25	16.4	75	3.71	30.4
5.4	2.26	16.3	93	5.69	26.4
6.3	2.74	15.4	110	6.67	25.1
7.2	3.33	14.5	200	9.64	22.2

Таблица расчетов показывает, что при дозе  $6.3 \cdot 10^5$  Р достигается предельная объемная концентрация невзаимодействующих  $F$ -центров  $N=2.74 \cdot 10^{17}$   $\text{см}^{-3}$  и соответственно минимальное среднее расстояние между соседними  $F$ -центрами  $d \sim 14.5$  нм. Тогда при следующей дозе  $7.2 \cdot 10^5$  Р соседние  $F$ -центры при концентрации  $3.33 \cdot 10^{17}$   $\text{см}^{-3}$  сближаются так, что вступают в обменные взаимодействия с переносом заряда и образуют парные  $F$ - $F$ -центры ( $M$ -центры), имеющие аксиальную симметрию с большой осью  $a \sim 14$  нм в направлении  $\{110\}$ , что проявляется в резком росте оптической плотности до  $D=4.2$  и расщеплении электронных уровней. Поскольку расщепление с дозой растет, как и концентрация  $F$ -центров, а расстояние между соседними центрами уменьшается, на этой стадии становится возможным образование стабильного молекулярного  $M$ -центра – бивакансии фтора  $F_2$ . Короткоживущие полосы поглощения наблюдались в области 4.75–5.5 эВ (225–260 нм) в интервале температур 11–150 К и времен от  $10^{-8}$  до 10 с после облучения импульсами электронов и приписывались триплет-триплетным переходам автолокализованных экситонов с точечной симметрией  $D_{2h}$  и ориентациями  $\{110\}$  и  $\{111\}$ . Их наличие при 300 К говорит о создании разделенных  $F$ - $H$  пар за счет высокой подвижности  $H$ -центров.

На рис.4а), б), в) приведены спектры оптического поглощения кристаллов LiF, снятые по осям  $a$  и  $b$  куба со сторонами 10 мм до и после гамма-облучения дозами от  $0.9 \cdot 10^5$  Р до  $1.65 \cdot 10^6$  Р, когда быстро растет число  $M$ -центров (450 нм) и  $F_2^+$  (620 нм), у которых образуются нанокolloиды Li (380 нм).



а) снятые с грани (100): 1 - необлученный, облученный последовательно дозами  $20.9 \cdot 10^5$  Р (2),  $1.8 \cdot 10^5$  Р (3),  $2.7 \cdot 10^5$  Р (4),  $3.6 \cdot 10^5$  Р (5),  $5.4 \cdot 10^5$  Р (6),  $7.2 \cdot 10^5$  Р (7); б, в- снятые с грани (010): б) 1- необлученный, 2-  $0.9 \cdot 10^5$  Р, 3 -  $1.8 \cdot 10^5$  Р, 4 -  $2.7 \cdot 10^5$  Р, 5 -  $3.6 \cdot 10^5$  Р, 6 -  $5.4 \cdot 10^5$  Р, 7 -  $7.2 \cdot 10^5$  Р и в) 1 -  $9.1 \cdot 10^5$  Р, 2 -  $1.1 \cdot 10^6$  Р, 3 -  $1.28 \cdot 10^6$  Р, 4 -  $1.46 \cdot 10^6$  Р, 5 -  $1.65 \cdot 10^6$  Р

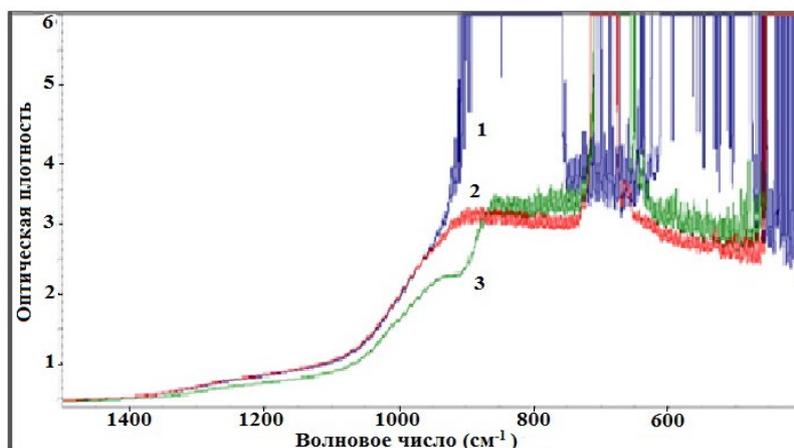
#### Рис.4. Спектры оптического поглощения LiF

На рис.4а) нами впервые обнаружено сужение полосы 202–225 нм при малых дозах до расщепления на дублеты (спектры 2 и 3), которые видны только на грани (100), что позволяет приписать ее аксиально симметричной двухатомной молекуле междуузельного фтора. Появление триплетов 209–212–215 нм при  $2.7 \cdot 10^5$  Р на грани (100) и 211–213–215 нм при  $0.9 \cdot 10^5$  Р на (010)

связано с радиационно-индуцированными аксиально симметричными биполяронами с большой силой осциллятора и поэтому с очень интенсивным поглощением. Резонанс при 270 нм, появляющийся после минимальной дозы, с ее ростом смещается до 284 нм (рис.4 а), спектры 2–7). На рис.4 б) виден триплет 211–213–215 нм (спектр 2), а затем смещения резонанса от 272 до 295 нм. То есть нанокolloиды лития расположены в плоскости (110), видной как проекции на гранях (100) и (010).

Только на рис.4 в) видно триплетное расщепление полосы 450 нм на 438–445–450 нм после набора максимальной дозы  $1.65 \cdot 10^6$  Р. Триплет и слабая полоса 620 нм нестабильны, зависят от ориентации, но оптическая плотность изотропна (при снятии спектров по всем граням куба), то есть комплексы ( $F_2$ – $F_3$ ) ориентированы в самой дефектной плоскости (111), проекции которой видны по трем осям.

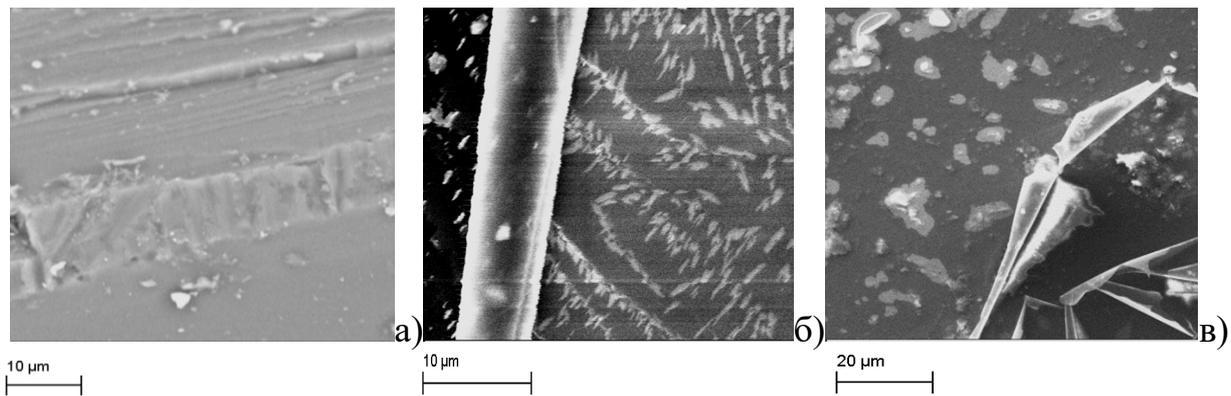
На рис.5 показаны ИК-спектры, снятые в режиме пропускания до и после гамма-облучений источника  $^{60}\text{Co}$  при 300 и 470 К и дозе  $1.7 \cdot 10^6$  Р.



**Рис.5. Спектры ИК-поглощения кристаллов LiF при 300 К:**  
1- необлученный, 2- облучен  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ -дозой  $1.7 \cdot 10^6$  Р при 300 К, 3- 470 К

Виден (рис.5) колебательный спектр связи Li-F с интенсивными полосами поглощения в области  $900\text{--}750\text{ см}^{-1}$  и  $650\text{--}400\text{ см}^{-1}$  в необлученном кристалле (спектр 1). После гамма-облучения при 300 К (спектр 2) из-за радиолиза число связей Li-F уменьшается, соответственно обе полосы резко ослабляются, а вместо них появляются интенсивные полосы  $450\text{ см}^{-1}$  от колебаний молекул  $F_2$  (междоузельные ионы фтора) и  $700\text{ см}^{-1}$  от колебаний агрегатов  $\text{Li}_2$ , что согласуется с динамикой решетки и функцией плотности состояний LiF. Спектр 3 показывает, что терморadiационная обработка при 470 К усиливает и уширяет полосу  $700\text{ см}^{-1}$  в соответствии с ростом количества агрегатов  $\text{Li}_2$  и ослабляет полосу  $450\text{ см}^{-1}$  из-за потери фтора.

После облучения электронами при токе 100 нА дозой  $1.3 \cdot 10^7$  Р ИК-спектр практически совпадает со спектром 3 рис.5 после гамма-облучения при 470 К из-за разогрева кристалла под пучком электронов. На рис.6 показаны микрофотографии (100) поверхностей скола LiF.



а)- необлученный, б)-  $^{60}\text{Co}$ -гамма, облученный дозой  $10^9$  Р при 1100 Р/с, в)- облученный 4 МэВ электронами при токе 3 мкА флюенсом  $10^{17}$  эл/см $^2$

### Рис.6. Микрофотографии поверхностей скола кристаллов LiF

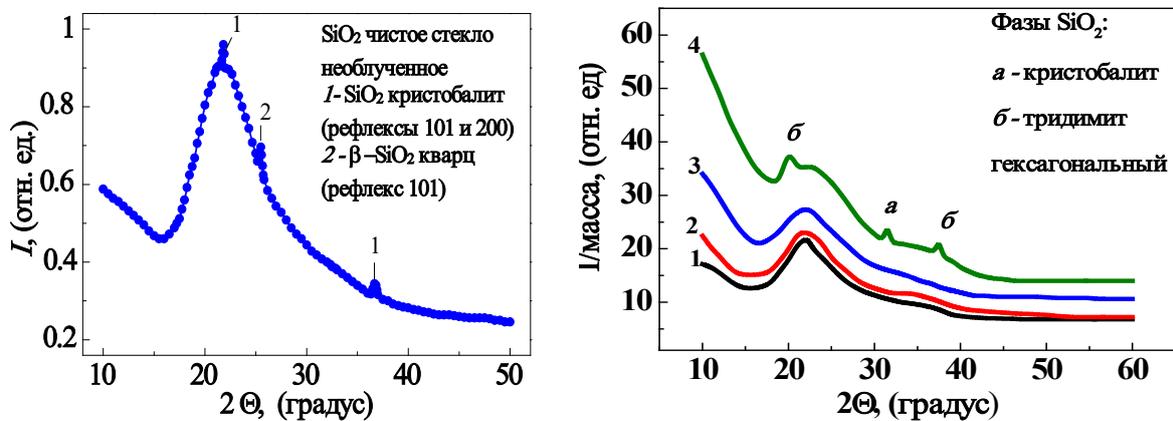
У необлученного кристалла (б а) видны ступени скола и гладкие атомные поверхности. На темной поверхности диэлектрика LiF,  $\gamma$ -облученной  $10^9$  Р (б б) и покрытой слоем электропроводящего графита 30–40 нм, видны отдельные светлые наночастицы металлического Li, а на непокрытой поверхности видны светлые упорядоченные длинные параллельные микронити. В LiF, облученном в сухом воздухе 4 МэВ электронами до дозы  $10^{17}$  эл/см $^2$  при максимальной плотности тока пучка 3 мкА/см $^2$  (б в) на гладкой сколотой поверхности видны яркие островки. Видимо, на месте попадания 4 МэВ электрона из-за локальной ионизации фтор теряется, а Li растет в виде пирамидки навстречу пучку. Локальный элементный анализ не обнаружил на необлученной поверхности ничего кроме фтора (потому что Li не определяется детектором), что свидетельствует об отсутствии окисления поверхности при облучении электронами на воздухе.

В четвертой главе приведены результаты исследования «**Радиационно-индуцированных наночастиц и наноструктур в стеклах на основе SiO $_2$** ».

На рис.7 слева приведена рентгенограмма эталона - чистого стекла SiO $_2$ . Основной диффузный рефлекс обусловлен структурными фрагментами SiO $_{2-x}$  с размерами  $0.75 \pm 0.02$  нм, а также отражениями нанокольцев размером  $1.4 \pm 0.04$  нм, составленных из шести O–Si–O молекул. Плоские сечения разных трехмерных ячеек в сетке стекла имеют размеры от 0.7 до 1.5 нм. На широкой диффузной полосе выделяются селективные рефлексy (111) и (101) от нанокристаллов кристобалита размерами соответственно 39 и 28 нм, а также рефлекс (101) от  $\beta$ -кварца размером 35 нм. Спектры рентгеновской дифракции чистого SiO $_2$  до и после облучений быстрыми нейтронами показаны на рис.7 справа.

Спектр исходного необлученного образца (кривая 1) состоит из двух диффузных рефлексов с межплоскостными расстояниями  $d/n = 0.4077$  и  $0.2522$  нм, обусловленными фрагментами кристаллической структуры  $\alpha$ - и  $\beta$ - кварца с размерами соответственно  $L_1 \approx 1.7$  нм и  $L_2 \approx 1.2$  нм. После облучения флюенсами до  $1.5 \cdot 10^{18}$  см $^{-2}$  (кривая 2) оба диффузных отражения сохраняются,

но наблюдается их заметное уширение, что свидетельствует об уменьшении размеров структурных фрагментов до  $L_1 \approx 1.5$  нм и  $L_2 \approx 0.8$  нм. Это сопровождается уменьшением энергии и концентрации  $E'_2$ -центров и ростом НАК.



**Рис.7. Слева: рентгенограмма необлученного  $\text{SiO}_2$  чистого стекла: 1-  $\text{SiO}_2$  кристобалит (рефлексы 101 и 200), 2- $\beta$ - $\text{SiO}_2$ -кварц (рефлекс 101);  
Справа: рентгенограммы, приведенные к массе образцов  $\text{SiO}_2$ :  
неблученного (1) и облученных в центре активной зоны флюенсами  
быстрых нейтронов  $1.5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$  (2),  $1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$  (3),  
 $5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$  (4). Фазы  $\text{SiO}_2$ : а) кристобалит, б) тридимит гексагональный**

Затем наблюдается смещение первого диффузионного пика в сторону большого угла рассеяния, уменьшение ширины, что свидетельствует о небольшом росте соответствующих структурных фрагментов  $L_1 \approx 1.8$  нм. Одновременно отмечается уменьшение амплитуды второго пика. Облучение флюенсом  $10^{19} \text{ см}^{-2}$  (кривая 3) приводит к заметному увеличению уровня неупругого фона (аморфизации и метамиктизации) и к незначительному уменьшению интенсивности и уширению диффузных рефлексов, что тоже указывает на уменьшение размеров структурных фрагментов до  $L_1 \approx 1.6$  нм и  $L_2 \approx 0.8$  нм. После флюенса  $2.5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$  облучения интенсивности пиков уменьшаются, при этом второй пик уменьшается быстрее, чем первый.

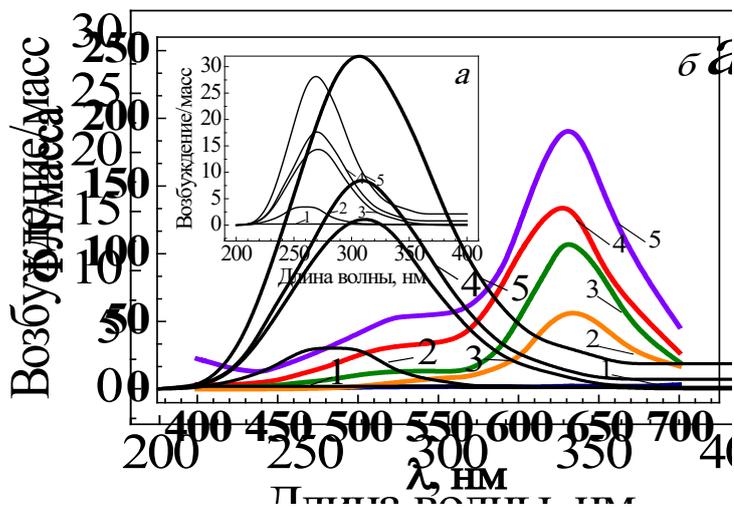
Резкое возрастание уровня неупругого фона при малых углах рассеяния свидетельствует об увеличении концентрации точечных дефектов и аморфизации за счет раздробления нанофрагментов  $L_2$ . Значит, дефекты находятся в тонком поверхностном слое размером  $< 1$  нм. Тогда объемные концентрации дефектов, рассчитанные по формуле Смакулы-Декстера, порядка  $5 \cdot 10^{16} - 10^{17} \text{ см}^{-3}$  следует пересчитать на квазидвумерный слой и расстояние между ними оказывается очень близким к 1–10 нм. Поэтому между электронными  $E$  и дырочными  $O_1$  дефектами происходит сильное электрическое дипольное взаимодействие, приводящее к резкому росту силы осциллятора  $f$ , оптической плотности  $D$  и сужению пиков до 0.1 эВ. После максимального флюенса  $5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$  (кривая 4) интенсивность второго диффузионного отражения  $L_2$  становится еле заметной, а интенсивность первого пика уменьшается более чем в три раза по сравнению с его

интенсивностью у исходного образца. Размер структурного фрагмента кварца составляет  $L_1 \approx 1.6$  нм. По-видимому, интенсивность  $L_1$  уменьшается в результате зарядовой нейтрализации наноразмерных электрических диполей ( $E'$  и НАК) адсорбированными  $\text{OH}^-$  и  $\text{H}^+$ . При этом уровень неупругого фона возрастает примерно в два раза, что обусловлено повышением вклада от аморфных и метамиктных слоев, окружающих структурные фрагменты  $L_1$  сетки стекла. Относительная стабильность мезоструктурного фрагмента  $L_1$  с размерами 1.5–1.8 нм при облучении, по-видимому, обусловлена энергетически выгодной гексагональной симметрией ячеек стекла, соответствующей упаковке  $\text{SiO}_4$  тетраэдров в шестигранник, как в кристаллической структуре  $\alpha$ -кварца. Как отмечено во введении, характерный размер среднего порядка, определенный по спектрам комбинационного рассеяния, при облучении стекла марки КИ быстрыми нейтронами уменьшается на 1/3 величины. Это наблюдение качественно согласуется с приведенными выше на рис.7 результатами РСА, а количественные расхождения в уменьшении размеров нанофрагментов можно отнести к разным маркам стекол, степени кристалличности.

Особо следует отметить, что после 100-часового облучения (кривая 4) над диффузными полосами появилось несколько узких селективных пиков. Анализ показал, что 2 рефлекса  $a$  принадлежат низкотемпературной фазе кристобалита, средний размер нанокристаллов, оцененный по формуле (1), составляет  $16 \pm 1.5$  нм, а рефлекс  $b$  относится к кристаллофазе гексагонального тридимита с размером  $8 \pm 0.5$  нм. Тогда указанные вышеаморфные и метамиктные слои составляют дефектную оболочку этих нанокристаллитов. Очевидно, эти нанокристаллиты образовались в термопиках смещения в процессе их остывания (релаксации). Их концентрация определяется флюенсом быстрых нейтронов с энергией  $>3$  МэВ, а размеры зависят от потока (определяющего расстояния между термопиками), превышения локальной температуры в термопике и низкой теплопроводности аморфной и метамиктной оболочки, обеспечивающих условия их кристаллизации. Конечно, не весь объем термопика кристаллизуется, но в его центре должно быть разрежение и даже пора, рассеивающая электромагнитные излучения. Если учесть, что предел обнаружения примесных фаз на спектрометре ДРОН-3М  $\sim 1\%$  объема в слое проникновения  $X$ -излучения рентгеновской трубки с медным катодом и нанокристаллиты идентифицируются в стекле при флюенсе  $5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$ , когда их расчетный объем достигает  $\sim 4\%$ , то при соответствующей концентрации образующихся термопиков смещения  $\sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$  они покрывают  $\sim 10\%$  объема стекла. Для сравнения отметим, что при этом флюенсе облучения  $\alpha$ -кварца доля пиков смещения (зародышей  $\beta$ -фазы) достигает 50% объема.

На рис. 8 показаны спектры ФЛ чистого кварцевого стекла и возбуждения (вставка) после выборочных доз облучения, когда в спектрах поглощения и рентгенограммах появляются пики от нанокристаллитов  $\alpha$ -кварца, кристобалита и тридимита. Кривые 2 показывают, что выделенное

гамма-излучение реактора создает только изолированные дефектные пары  $E'$  и НАК, люминесценция НАК наблюдается в полосе 630 нм при возбуждении в 260 нм.



**Рис. 8. Спектры ФЛ чистого кварцевого стекла, возбужденного в 270 нм: б) необлученный (1), облученные гамма-лучами остановленного реактора дозой  $4 \cdot 10^8$  Р (2), флюенсами быстрых нейтронов  $1.5 \cdot 10^{18}$  см<sup>-2</sup> (3),  $1 \cdot 10^{19}$  см<sup>-2</sup> (4),  $5 \cdot 10^{19}$  см<sup>-2</sup> (5). На вставке а) приведены спектры возбуждения ФЛ**

После облучения флюенсом  $1.5 \cdot 10^{18}$  см<sup>-2</sup> (кривая 3) интенсивность ФЛ в полосе НАК возрастает в 2 раза, появляется дополнительная полоса 500–550 нм ( $E'_2$ ), возбуждаемая в 270 нм. С ростом флюенса до  $10^{19}$  см<sup>-2</sup> (кривая 4) интенсивность обеих полос ФЛ выросла, но максимум сместился к 620 нм.

В нашем случае быстрые нейтроны тоже создают наноразмерные термопики смещения в объеме стекла, где происходит рекристаллизация с образованием нанокристаллитов тридимита, кристобалита (более высокотемпературных фаз, чем  $\alpha$ - кварц). По-видимому, смещение максимума ФЛ с 630 к 620 нм с ростом флюенса обусловлено ростом вклада центров НАК на поверхности нанокристаллов кристобалита и тридимита.

Таким образом, из-за длительной релаксации структуры стекла уровень возбужденного состояния 310 нм (3.99 эВ) оказывается нестабильным, вероятно, связанным с присутствием Si-H-центров, образовавшихся в результате радиолиза воды в дефектных слоях, разделяющих нанокристаллиты, а затем ее потерей.

В табл.2 приведены расчетные размеры нанофрагментов, их концентрации, а также энергии и концентрации центров, интенсивности полос ФЛ.

**Расчетные рентгенографические размеры структурных нанофрагментов  $L_1$  и  $L_2$ , их интенсивности ( $I_1^2$ ) и аморфных нанослоев ( $I_a^2$ ), концентрации  $N$  оптических центров  $E'_1$ ,  $E'_2$  (Si–Si),  $E_s$  и  $O^0_1$  (NBOHC–НАК), а также интенсивности ФЛ  $I_{ФЛ}$  (630 нм),  $I_{ФЛ}$  (520 нм) с учетом массы  $M$  образцов при разных флюенсах (временах) облучения [230, р. 398–405]**

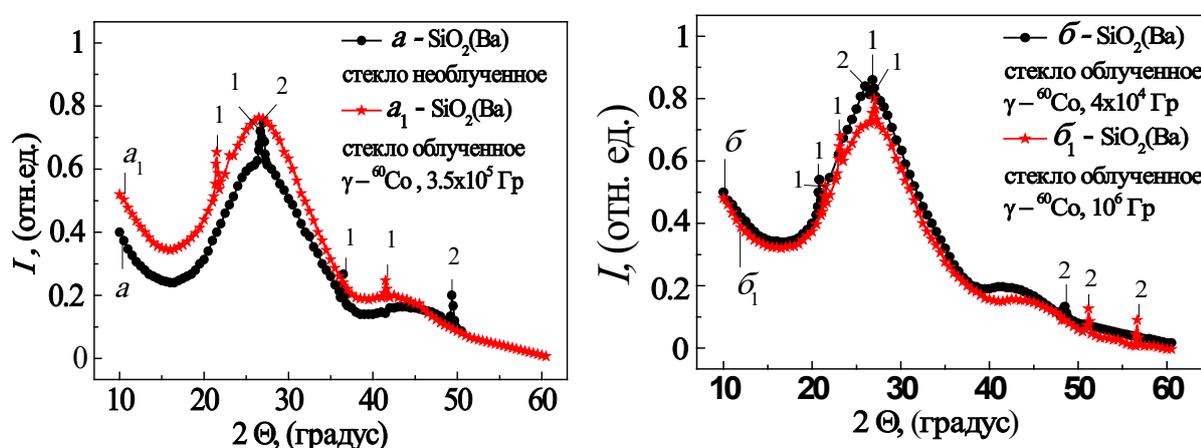
Время, час	0	1.25	2	3	4	5	6	7	20	50	100
Флюенс, $10^{18}$ см <sup>-2</sup>	0	0.3	1	1.5	2	2.5	3	3.5	10	25	50
$M$ , мг	320	310	310	270	310	210	350	170	160	120	90
$L_1$ , нм	1.7		1.5	1.5	1.7	1.9	1.6	1.7	1.6	1.8	1.7
$L_2$ , нм	1.25		0.8	0.9	0.9	0.8	0.7	0.8	0.9	–	–
$I_1^2$ о.е	225		213	240	207	190	279	260	276	383	441
$I_a^2$ о.е	46.2		38.4	51.8	42.2	68.1	47.6	90	125	125	196
$E$ , эВ	$\lambda$ , нм	Концентрация оптических центров $N$ , $10^{17}$ см <sup>-3</sup>									
$E'_1$ 5.89	210	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0.66
$E'_1$ 5.75	215	–	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.54	0.54	0.52	0.38
$E'_1$ 5.62	220	0.51	–	–	–	–	–	–	–	–	–
$E'_2$ 5.38	230	0.96	0.74	–	–	–	–	–	–	–	–
$E'_2$ 5.26	235	–	–	0.44	–	–	–	–	–	–	–
$E'_2$ 5.15	240	–	–	–	0.55	–	–	–	–	–	–
$E'_2$ 5.05	245	0.8	1.01	1.22	0.84	–	–	–	–	–	0.46
$O^0_1$ 4.85	255	–	–	–	–	0.30	0.22	0.81	0.29	–	0.32
$O^0_1$ 4.76	260	0.84	1.20	1.00	1.14	–	1.38	–	–	0.22	–
$O^0_1$ 4.67	265	–	–	–	–	1.15	–	1.00	1.01	0.92	0.95
		Интенсивность полос ФЛ, отн. ед.									
$O^0_1$ 1.96	630	–	97	114	115	121	130	131	152	189	216
$E'_2$ 2.38	520	–	10.9	13.2	14.9	24.0	25.1	27.2	31.9	46.9	52.6

Видно, что энергия  $E'_1$  - центров 5.75 эВ и их концентрация  $\sim 0.55 \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup> слабо изменяются в исследованном интервале флюенсов до  $2 \cdot 10^{19}$  см<sup>-2</sup>. Это подтверждает их насыщенную плотность и нахождение на поверхности нанофрагментов кварца, размеры  $L_1$  которых с ростом флюенса колеблются в интервале 1.5–1.8 нм, а концентрация не меняется. Однако  $E'_2$  -центры образуются эффективно только при малых флюенсах  $< 10^{18}$  см<sup>-2</sup>, пока существуют фрагменты  $L_2$  размерами 0.7–0.8 нм, причем с концентрацией около  $10^{17}$  см<sup>-3</sup>. С ростом флюенса их концентрация и энергия падают, а при флюенсе  $2.5 \cdot 10^{18}$  см<sup>-2</sup> они пропадают. Возможно, из-за радиолиза воды водород препятствует их образованию, а ОН способствует быстрому росту концентрации центров НАК до  $10^{17}$  см<sup>-3</sup>.

Пятая глава «Механизмы формирования наноструктур тяжелых металлов в стеклах при радиационном воздействии и потенциал применения», в отличие от главы IV, посвящена образованию оксидных

наночастиц в чистом кварцевом стекле и на плоском интерфейсе с пленочным оксидным покрытием. В этой главе изучаются двумерные интерфейсные наноструктуры в объеме двухкомпонентных стекол  $\text{SiO}_2$  с оксидами тяжелых металлов  $\text{BaO}$  и  $\text{PbO}$  выше 20 вес%, ширина зоны которых меньше, чем у матрицы  $\text{SiO}_2$ , где следует ожидать сильный вклад рассеяния на наноразмерных включениях, кроме электронного поглощения дефектов или примесных ионов.

Дифракционная картина необлученного тяжелого стекла  $\text{SiO}_2\text{--BaO}$  характеризуется наличием двух диффузных и четырех селективных рефлексов (рис.9 слева, спектр  $a$  - необлученный). Аморфная фаза приводит к росту неупругого рассеяния. Примесные селективные рефлексы относятся к кристаллам кварца (1) и  $\text{BaO}_2$  молекулярным кристаллам (2).



Слева:  $a$  - необлученный: 1 -  $\text{SiO}_2$ -кристалл. кварц, 2-  $\text{BaO}_2$  молекул. кристалл.;  $a_1$  - облучен при 210 Р/с дозой  $3.5 \cdot 10^5$  Гр, 1-  $\text{SiO}_2$  кристобалит; справа:  $b$  - облучен при 600 Р/с дозой  $4 \cdot 10^4$  Гр, 1-  $\text{SiO}_2$ -тридимит, 2- $\text{BaO}_2$  молекул. кристалл.;  $b_1$  - облучен дозой  $10^6$  Гр, 1-  $\text{SiO}_2$ -тридимит, 2- $\text{BaSiO}_3$  перовскит

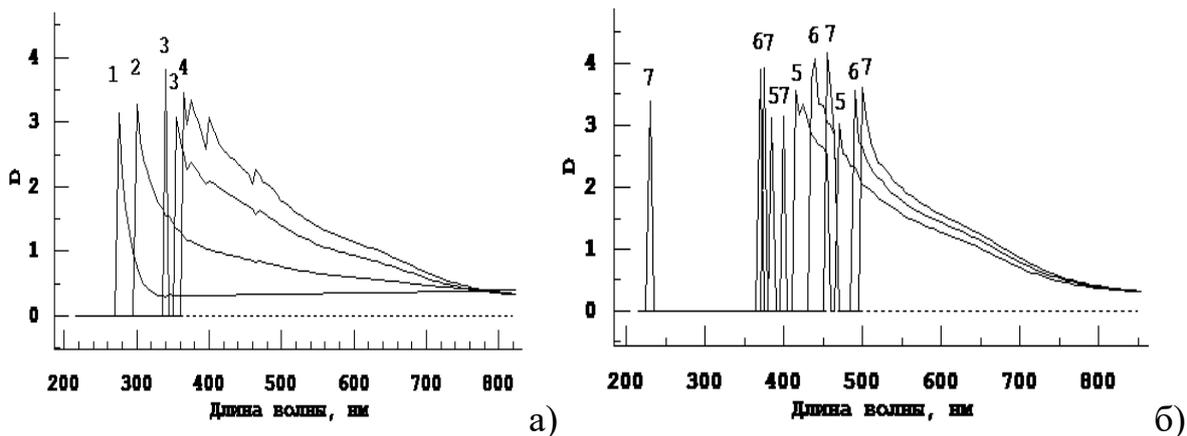
**Рис.9. Рентгенограммы бариевого стекла до и после  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  - облучения**

На рис.9 слева (спектр  $a_1$ ) показана рентгенограмма образца, облученного дозой  $3.5 \cdot 10^7$  Р. Оба диффузных отражения не изменились, исчезли рефлексы  $\text{BaO}_2$  молекулярных кристаллов (2), но появились два селективных пика, приписываемых фазе кристобалита  $\text{SiO}_2$  с размерами кристаллитов  $50.7 \pm 4.5$  нм. Слабая широкая полоса, видимо, связана с примесными аморфными фазами с размерами  $0.78 \pm 0.02$  нм. Селективные структурные линии со слабой интенсивностью, которые накладываются на диффузные полосы, принадлежат кристаллической фазе  $\beta$  - кварца  $\text{SiO}_2$  размером  $14.5 \pm 1.3$  нм и молекулярным кристаллам  $\text{BaO}_2$  размером  $27.5 \pm 1.8$  нм, которые ориентированы друг относительно друга. По-видимому, энергия гамма-квантов поглотилась атомами  $\text{Ba}$ , и оксид распался. При такой дозе (и соответствующей плотности радиационных дефектов) концентрация локализованных электронов высокая, поэтому теплопроводность матрицы существенно снижается, что обеспечивает локальное тепловыделение, достаточное для кристаллизации

высокотемпературной фазы. На рис.9 справа показаны рентгенограммы стекла, облученного при более высокой мощности дозы 600 Р/с. После дозы  $4 \cdot 10^6$  Р (спектр б) наблюдается значительное уменьшение исходных селективных рефлексов от молекулярных кристаллов  $\text{BaO}_2$ , что свидетельствует об их растворении в стеклянной матрице до состояния аморфных наночастиц, что привело к возрастанию неупругого фона. Кроме того, происходит радиационно-индуцированный структурно-фазовый переход нанокристаллов  $\beta\text{-SiO}_2$  14.5 нм в более крупные нанокристаллы тридимита размером около 40 нм. Появление дополнительного пика от этой фазы при увеличении дозы до  $10^8$  Р (спектр б<sub>1</sub>) указывает на рост размеров до ~50 нм. При воздействии гамма-излучения энергией ~1.25 МэВ на нанокompозитное стекло наблюдается сначала растворение нановключений, а затем рост наночастиц с другой кристаллической структурой. Такие атомные перестройки происходят по механизму радиолиза за счет поглощения энергии гамма-квантов и энергии свободных экситонов, выделяющейся при безизлучательной рекомбинации электронов и дырок.

Показано, что так же как облучение чистого кварцевого стекла быстрыми нейтронами в тепловыделяющая сборка (ТВС) реактора в воде, облучение протонами в вакууме создают термопики смещения, где вырастают нанокристаллиты тридимита и кристобалита. Эти научные результаты, вместе с фактом образования нанокристаллитов кварца, кристобалита, тридимита в кварцевом стекле и молекулярных кристаллитов  $\text{BaO}_2$  и перовскита  $\text{BaSiO}_3$  в силикатных стеклах, были использованы для отдельной дозиметрии потоков гамма излучения в присутствии быстрых нейтронов в активной зоне реактора.

Спектры поглощения, снятые сразу после облучения, показаны на рис.10 а), б) и характеризуют коричневую окраску, наведенную после первой дозы облучения, плотность которой растет с дозой.



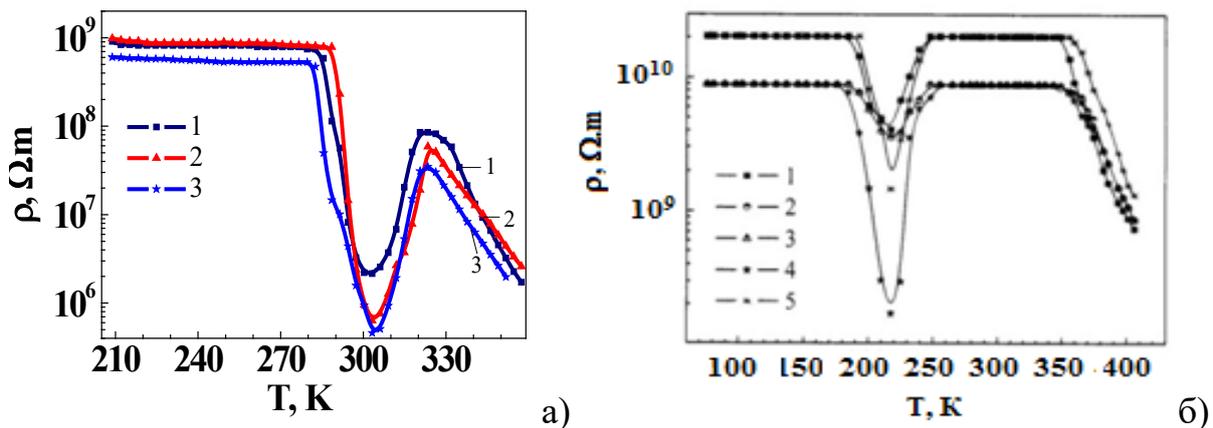
1-необлученный, после облучения 4 МэВ электронами при токе 50 нА в интервале флюенсов: 2-  $1.8 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ , 3-  $6.6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ , 4-  $6 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ , 5 -  $3.5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ , 6-  $8.3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ , 7 -  $1.8 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$

**Рис.10. Спектры поглощения щелочно-силикатного стекла (а, б)**

Видно, что после облучения, начиная с флюенса  $1.8 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ , появляется узкий интенсивный резонанс при 225 нм, обусловленный известными  $E_1'$  центрами

( $\equiv\text{Si}\cdot$  – электрон, захваченный вакансией мостикового кислорода), который наблюдается и при повторных измерениях. А после максимальной дозы  $1.8 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  этот резонанс смещается к 230 нм, возможно, в результате взаимодействия близких  $E_1'$ -центров. Край поглощения, обусловленный зарядом, локализованным на интерфейсах  $\text{BaO-SiO}_2$ , сдвигается от 300 нм до 500 нм по мере нарастания дозы облучения и, следовательно, концентрации локализованных носителей. Определены размеры наночастиц, растущие от 15 до 30 нм и ограниченные сжимаемостью сетки стекла.

Рис. 11 а) показывает температурную зависимость удельного объемного сопротивления образца стекла, содержащего 24%  $\text{PbO}$ .



а) содержит 24%  $\text{PbO}$ : 1-необлученный и облученный  $^{60}\text{Co}$  гамма-квантами до дозы: 2-  $10^5$  Р; 3- $1.3 \cdot 10^7$  Р; б) 34.5%  $\text{PbO}$ : 1-необлученный, 2 - облучен 3 часа гамма-квантами в остановленном реакторе; 3-повторное измерение; 4- облучен 20 часов; 5- повторное измерение

### Рис.11. Температурная зависимость удельного объемного сопротивления образца силикатного стекла

Область температур 210–285 К характеризуется атермической электронной проводимостью с низкой энергией активации  $E = 0.014$  эВ. Сопротивление падает в 2 раза после дозы  $\sim 10^7$  Р. Наибольшая (рост на 3 порядка) проводимость наблюдается в пике около 300 К в интервале температур 285–325 К и растет после облучения. В высокотемпературной области 325–360 К преобладает ионная проводимость, для которой энергия активации  $E = 1.003$  эВ не зависит от облучения. Рис.11 б) показывает температурные зависимости удельного объемного сопротивления постоянному току образца боросиликатного стекла, содержащего 34.5%  $\text{PbO}$ . Здесь тоже наблюдается пиковый (квадратичный) характер проводимости с  $T_{\text{max}} \sim 216$  К. По сравнению со стеклом с 24%  $\text{PbO}$  пиковая проводимость сместилась на 100 градусов в область низких температур, где наблюдается двумерный транспорт больших поляронов в оксидах тяжелых металлов. Расчетные энергии активации носителей зарядов в режиме пиковой проводимости для кривых 1-190–245 К ( $E=0.180$  эВ), 2- 185–250 К ( $E=0.186$  эВ), 3- 185–250 К ( $E=0.174$  эВ), 4- 175–255 К ( $E=0.213$  эВ), 5- 190–250 К ( $E = 0.196$  эВ) оказались намного ниже, чем для стекла с 24%  $\text{PbO}$ . Сравнение кривых первичных (2 и 4) и повторных (3 и 5)

измерений проводимости показывает снижение энергии активации проводимости. Возможно, это происходит из-за переброса носителей из глубоких ловушек в объеме стекла в мелкие, на электрически поляризованных интерфейсах  $\text{SiO}_2\text{-PbO}$ , например, автолокализованных дырок  $\text{O}_2^{3-}$ .

**Известны три механизма образования радиационных дефектов:** радиолиз – разрыв химической связи с удалением анионов, ударные и неударные смещения атомов решетки. Самый близкий к созданию наночастиц – образование термопиков смещения при воздействии быстрых нейтронов, протонов, альфа-частиц, где происходит аморфизация, в случае кварца подтвержденная структурным анализом и микроскопией высокого разрешения. Но в случае щелочногалоидных кристаллов аморфизация не была подтверждена экспериментально, а структурный анализ и микроскопия выявили наночастицы. Мы исследовали LiF и кварцевое стекло в одинаковых условиях облучения и обнаружили наночастицы не аморфные, а с кристаллической структурой.

В результате проведенных исследований нами предложен сложный поэтапный механизм радиационного создания наночастиц с кристаллической структурой на реальных материалах (особенно на их поверхности) с образованием и сегрегацией радиационных дефектов:

1) неупругое взаимодействие - быстрое поглощение энергии (выше 1 МэВ) ядерного излучения со стороны мишени и рождение электронных возбуждений (электронно-дырочных пар, экситонов и т.д.);

2) радиолиз химической связи катион-анион с потерей аниона поверхности;

3) генерация дефектов решетки (вакансий и междоузельных атомов, термопиков смещения, треков) при ударных и неупругих смещениях атомов и при распаде электронных возбуждений;

4) сегрегация точечных дефектов на размерных дефектах с образованием агрегатов анионных вакансий и кластеров/коллоидов катионов;

5) самосборка наночастиц с кристаллической структурой и когерентными интерфейсами с матрицей с выполнением условия минимизации свободной энергии.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенных исследований по диссертации на соискание ученой степени доктора физико-математических наук (DSc) на тему: «Радиационно-индуцированные наноструктуры в кристаллах LiF и стеклах на основе  $\text{SiO}_2$ » сделаны следующие выводы:

1. В результате гамма-облучения в остановленном реакторе в воде в приповерхностном слое LiF образуется кристаллическая двойниковая структура с включениями примесной нанофазы LiOH с размерами до 28 нм, которая обладает микротвердостью выше, чем LiF.

2. Обнаружен плазмонный отклик в  $\gamma$ -облученном на воздухе кристалле LiF, связанный с радиолизом поверхности и потерей фтора с образованием металлических наночастиц Li размерами 5 нм самосборкой на месте агломератов точечных радиационных дефектов – анионных вакансий предположительно по механизму Мотта-Герни; nLi образует уровень 2.65 эВ.

3. Обнаружены расщепления полос поглощения изолированных  $F$ - и  $M$ -центров на узкие резонансы при высокой оптической плотности 3–4, которые возникают в  $\gamma$ -облученных кристаллах LiF при предельных расстояниях 14 и 22 нм между парными  $F$ - $F$  и  $M$ - $M$ -центрами в результате электро-дипольного взаимодействия. Показано, что широкие нестабильные полосы 620 и 960 нм и стабильная полоса 380 нм обусловлены плазмонным откликом Li-наночастиц, упорядоченных в сверхрешетку, а не заряженными  $F_2$ -центрами.

4. На поверхности кристалла LiF, облученного высокими дозами  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ -лучей  $>10^8$  Р и 4 МэВ электронами флюенсом  $10^{17}$  см $^{-2}$  при сильном токе 3  $\mu\text{A}$  обнаружены наночастицы Li, которые в случае  $\gamma$ -облучения образуют параллельные микронити, а под пучком электронов – отдельные островки.

5. Обнаружена анизотропия оптического поглощения, ИК отражения и микротвердости приповерхностного слоя 12–15  $\mu\text{m}$  относительно направления пучка электронов, связанная с формой пространственного заряда, характеризующая пластическую деформацию кристалла LiF с радиационными дефектами (дислокациями и агрегатными центрами).

6. Показано, что при изотропном  $\gamma$ -облучении кристалла LiF кубической симметрии возникает анизотропия оптического поглощения из-за вытянутой формы агрегатных  $F_n$ -центров. Согласно теории рассеяния Ми резонансное поглощение, максимум которого смещается от 272 до 295 нм с ростом дозы, приписывается нанокolloидам Li в плоскости (110), размеры которых растут с дозой облучения от 6 до 7 нм.

7. Показано, что облучения чистого кварцевого стекла быстрыми нейтронами флюенсом выше  $10^{19}$  см $^{-2}$  в тепловыделяющая сборка (ТВС) реактора в воде и 18 МэВ протонами флюенсами до  $5 \cdot 10^{15}$  см $^{-2}$  в вакууме создают термопики смещения, где вырастают нанокристаллиты тридимита и кристобалита, которые обуславливают интенсивные резонансы в УФ-поглощении, дополнительно к известным электронным и дырочным центрам.

8. Показано, что облучение  $\gamma$ -квантами  $^{60}\text{Co}$   $\sim 1.25$  МэВ и электронами энергией 4–8.5 МэВ силикатного стекла с примесями щелочных металлов BaO и PbO, приводит к образованию стабильных центров окраски, красному сдвигу края поглощения (согласно теории рассеяния Ми), по которому были определены размеры наночастиц, растущие от 15 до 30 нм и ограниченные сжимаемостью сетки стекла.

9. Обнаружены три разных механизма электропроводности бариевых и свинцовых стекол: низкотемпературный атермический электронный (210–285 К с энергией активации 0.014 эВ), высокотемпературный ионный (325–360 К с 1.003 эВ) и промежуточный прыжковый (260–350 К), сильно зависящие от

массового содержания нановключений PbO и BaO, которые усиливают транспорт носителей заряда по интерфейсам оксид кремния–оксид металла.

10. Проведена комбинированная оптическая и активационная дозиметрия с целью отдельного определения потоков нейтронов и гамма - компоненты в 20 каналах активной зоны реактора.

11. Темно-коричневая окраска натрий-бариевого стекла, приобретаемая облучением электронами (средняя энергия 4 МэВ, интегральный флюенс от  $1.8 \cdot 10^{13}$  до  $1.8 \cdot 10^{15}$  эл/см<sup>2</sup>), обусловленная центрами окраски на BaSiO<sub>2</sub> интерфейсах, сохраняет лекарственный препарат во флаконе и ампуле от фотохимических реакций под действием УФ и видимого освещения.

12. Наноккомпозит LiF–Li, сформировавшийся при  $\gamma$ - облучении как упорядоченные включения наночастиц металла в кристаллическом диэлектрике, имеет потенциал применения в современных оптоэлектронных приборах.

**SCIENTIFIC COUNCIL No.DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 ON AWARD  
OF SCIENTIFIC DEGREES AT THE INSTITUTE OF NUCLEAR  
PHYSICS**

---

**INSTITUTE OF NUCLEAR PHYSICS**

**MUSSAEVA MALIKA ANVAROVNA**

**RADIATION-INDUCED NANOSTRUCTURES IN LiF CRYSTALS AND  
SiO<sub>2</sub> BASED GLASSES**

**01.04.07- Condensed matter physics**

**DISSERTATION ABSTRACT  
of the doctor of science (DSC) on physical and mathematical sciences**

**Tashkent – 2022**

**The theme of the doctoral dissertation (DSc) was registered by the Supreme Attestation Commission of the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under number B2021.2.DSc/FM180**

The doctoral 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](http://www.inp.uz) and on the website of “Ziyonet” Information and Educational portal at [www.ziyonet.uz](http://www.ziyonet.uz).

**Scientific consultant:** **Ibragimova Elvira Memetovna**  
Doctor of physical and mathematical sciences, professor

**Official opponents:** **Mamadalimov Abdugafur Teshaboevich**  
Doctor of physical and mathematical sciences, professor,  
Academician of the Academy of sciences of the Republic of  
Uzbekistan

**Nuritdinov Izzatillo**  
Doctor of physical and mathematical sciences, professor

**Tashmukhamedova Dilnoza Artikbaevna**  
Doctor of physical and mathematical sciences, professor

**Leading organization:** **Fergana Polytechnic Institute**

The defense of the dissertation will be held on “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2022, 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: INP, Ulugbek settlement, 100124 Tashkent city. tel. (+99871) 289-31-18; fax (+99871) 289-36-65; e-mail: [info@inp.uz](mailto:info@inp.uz)).

The doctoral dissertation can be looked through at the Information Resource Centre of the Institute of Nuclear Physics (registered under No. \_\_\_) Address: INP, Ulugbek settlement, 100124 Tashkent city. tel. (+99871) 289-31-19.

The abstract of dissertation was distributed on “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2022.  
(Registry record No. \_\_\_ dated “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2022).

**M.Yu. Tashmetov**  
Chairman of the Scientific Council on award  
of Scientific degrees, D.Ph.-M.S., professor

**O.R. Tojiboyev**  
Scientific secretary of the Scientific Council on award  
of Scientific degrees, PhD.ph.-m.s

**S.V. Artemov**  
Deputy Chairman of the Scientific seminar of the Scientific Council  
on award of Scientific degrees, D.Ph.-M.S., professor

## INTRODUCTION (annotation of doctoral (DSc) dissertation)

**The aim of the research** elucidation of the mechanisms of the formation of nanoparticles and assembling of nanostructures in model dielectric crystalline and glass matrices with covalent and ionic chemical bonds under the action of nuclear radiation and charged particle beams.

**The tasks of the research** to achieve this goal, the following research objectives are formulated:

elucidation of the conditions (type of particles, energy, flux, fluence) for the effective creation of nanoparticles in alkali-halide crystals and in a glass matrix under prolonged irradiation in air with  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ - quanta and a mixed flux of neutrons and gamma rays in the WWR-SM reactor, as well as accelerated beams of protons in vacuum and electrons in air;

identification of the crystal structure, determination of a size, shape and orientation of Li nanoparticles in LiF crystals, nanoparticles of impurity phases of heavy metals (Ba, Pb) and their oxides in a glass  $\text{SiO}_2$  matrix;

estimation of local micro- and nano-nonstoichiometry of the elemental composition of irradiated surfaces of the crystal and glass;

elucidation of the dependence of the surface layer microhardness of LiF crystals and  $\text{SiO}_2$  glass matrix on the characteristics of Li nanoparticles and nanoparticles of impurity phases based on heavy metals (Ba,Pb), and assessment of the depth of this layer;

determination of the extinction band (absorption+scattering), its wavelength shift depending on the irradiation dose and estimation of the size and dimension of the related nanoparticles;

calculation of the energy and population of the electronic levels by optical absorption, photo and gamma luminescence, reflection, transmission before and after irradiation;

detection of anisotropy of optical absorption of non-spherical, low-dimensional metal nanoparticles on three axes of LiF crystals of a cube form after irradiation with gamma-rays and electrons;

revealing the effect of the size/shape of nanoparticles assembled from the lightest metal Li atoms and heavy metals (Ba,Pb) on the surface electrical conductivity (in Mott coordinates) of irradiated LiF crystal and  $\text{SiO}_2$  glass and calculation of the hopping activation energy.

**The objects of the research** are nanoparticles and nanostructures in model high-quality LiF single crystals with ionic bonds, in high-purity silica glass ( $\text{SiO}_2$ ) with covalent bonds and doped glass ( $\text{SiO}_2$ -Na,K,Ba), in industrial crystal glass ( $\text{SiO}_2$ -PbO).

**The subject of the research** are mechanisms of the formation of nanoparticles and nanostructures from 0-1-2-3-dimensional defects in ionic crystalline and glass dielectric matrices when exposed to nuclear radiation and beams of accelerated charged particles, the dependence of properties on structure and composition on a micro- and nanoscale.

### **The scientific novelty of the research work:**

Formation of Li nanoparticles in LiF was found under  $\gamma$ - irradiation to doses  $> 10^8$  R and electron fluencies to  $10^{17}$  cm<sup>-2</sup>, which are assembled in parallel electric-conducting microfilaments (at  $\gamma$ - irradiation) and separate hillocks (at 4 MeV electron irradiation), and increase of impurity nanophase LiOH at  $\gamma$ - irradiation in the shutdown reactor that result in increasing the intensity of  $\gamma$ - luminescence of  $F_4^+$ - centers and the contribution of radiative thermally stimulated recombination at Li-nanometal – LiF-dielectric interface;

Colorless LiF crystals were suggested to use as optical detectors of an absorbed dose in the range of  $10^4$ – $10^5$  Gy of  $\gamma$ - radiation from a shutdown reactor, but taking into account formation of nanoinclusions of LiOH impurity phase;

For the first time the nanocrystalline inclusions of cristobalites in pure SiO<sub>2</sub> glass, and BaO and BaSiO<sub>3</sub> in barium-containing glasses were found, their radiation-induced growth and oriented arrangement were established, leading to hardening of their surface and changes in microhardness;

It was proven that irradiation of silicate glass having impurities of alkali metals, oxides of Ba and Pb with  $\gamma$ - quanta and electrons of 4 and 8.5 MeV causes the generation of stable color centers and a red shift of the absorption edge due to the growth of nanoparticle sizes determined from 15 to 30 nm, limited by compressibility of the glass network;

In  $\gamma$ - irradiated quartz glass, nanocrystallites of  $\alpha$ -quartz, cristobalite and tridymite were found, in crystal – molecular crystallites of PbO and BaO, in silicate glasses – nanocrystallites of BaO<sub>2</sub> and perovskite BaSiO<sub>3</sub> (sizes from 8 to 30 nm), which should be taken into account in dosimetry, changes in the optical spectra of glasses are caused by the induced polarization of nanoparticles at the metal–dielectric interface, where an electric double layer is formed as a result of segregation;

It was revealed that irradiation of pure silica glass with fast neutrons to fluences above  $10^{19}$  cm<sup>-2</sup> in the reactor fuel assembly in water and with protons to fluences up to  $5 \cdot 10^{15}$  cm<sup>-2</sup> in vacuum create the displacement thermal peaks, where nanocrystallites of tridymite and cristobalite grow, being responsible for the intense resonances in UV absorption;

The technique is proposed for separate dosimetry of gamma-radiation fluxes in nuclear reactor in the presence/absence of fast neutrons by using fused silica.

**Implementation of the research results.** Based on the results obtained from the study of radiation processes in LiF crystals and SiO<sub>2</sub> based glasses:

the fact that formation of Li nanoparticles in LiF was found under  $\gamma$ -irradiation to doses  $>10^8$  R and electron fluencies to  $10^{17}$  cm<sup>-2</sup>, which are assembled in parallel electric-conducting microfilaments and separate hillocks, and increase of impurity nanophase LiOH at  $\gamma$ - irradiation in the shutdown reactor that result in increasing the intensity of  $\gamma$ - luminescence of  $F_4^+$ - centers and the contribution of radiative thermally stimulated recombination at Li-nanometal – LiF-dielectric interface were used by foreign researchers (references in international scientific journals: Technical

Physics Letters, 2019. vol. 45. No.7. pp. 679–682; Physical Chemistry Chemical Physics, 2021.23(17). pp. 10384–10394; Scientific Reports, 2016.6:25435. pp.1–6). The use of scientific results allowed to explain the radiation effects in thermoluminescent dosimeters based on LiF-Mg and Ti, and to explain the formation of Li clusters in the LiCl–Li melt;

colorless LiF crystals were suggested to use as optical detectors of an absorbed dose in the range of  $10^4$ – $10^5$  Gy of  $\gamma$ -radiation from a shutdown reactor, but taking into account formation of nanoinclusions of LiOH impurity phase, the nanocrystallites of  $\alpha$ -quartz, cristobalite, tridymite in the fused silica and molecular crystals of PbO and BaO in the crystal glass, BaO<sub>2</sub> and perovskite BaSiO<sub>3</sub> in the silicate glass were determined after  $\gamma$ -irradiation (their sizes from 8 to 30 nm), the changes in optical spectra are caused by the induced polarization of nanoparticles at the metal–dielectric interface, where a double electric layer is formed, that should be taken into account, were used at the unique research facility "Research Nuclear Reactor" of INP AS RUz for dosimetry of high doses, as well as within the framework of applied projects FA-A3-F004 "Development of methods for optimizing fuel cycles and monitoring the parameters of a nuclear reactor WWR-SM INP AS RUz" (2018–2020), FA-A14-F062 "Post-conversion improvement of the operational parameters of the research reactor WWR-SM" (2009–2011) (Letter of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan No. 31-2115-376 of 30.06.2020; Patent RUz No IAP 2009 0114 from 23.04.2009. 2010. No 4 (108). c.13.). The use of scientific results allowed to compare the calculated estimate of the fluxes of neutrons and associated gamma radiation in all vertical channels with the experimental values of dosimetric characteristics and to improve the accuracy of determining the duration and dose of irradiation, as well as the development of a radiation technology for coloring natural precious minerals in the WWR-SM reactor;

the nanocrystalline inclusions of cristobalites in pure SiO<sub>2</sub> glass, and BaO and BaSiO<sub>3</sub> in barium-containing glasses were found, their radiation-induced growth and oriented arrangement were established, leading to hardening of their surface and changes in microhardness has been used by foreign researchers (references in international scientific journals: Glass Physics and Chemistry, 2015. vol. 41. No. 4. pp. 385–388; Strength of Materials, 2011. vol. 43. No.1. pp.109–112; Prog. Photovolt: Res. Appl. 2004, 12: 569–572). The use of scientific results made it possible to explain the effect of high doses of irradiation by electrons on the structure and composition of films, and by neutrons on the volumetric expansion of quartz lattice; experimentally discovered oxidation and disproportionation at the boundaries of amorphous SiO<sub>2</sub>/Si after gamma irradiation, the effect of heat treatment on the microhardness of quartz glass, reactor radiation on the microhardness of SAV-1 type aviales;

the technique is proposed for separate dosimetry of gamma-radiation fluxes in nuclear reactor in the presence/absence of fast neutrons by using fused silica was implemented for metrological studies of the experimental channel of a research nuclear reactor OR with a capacity of 0.1–300 kW at the experimental base of the NRC "Kurchatov Institute" (links in international scientific journals: Measurement Techniques, 2021, vol. 64, pp.244–249; Journal of Nuclear Materials, 2013, vol.443.

pp.393–397; Journal of Advanced Concrete, 2018, vol. 16. Issue 5. pp.191–209). The use of scientific results made it possible to determine the contribution of the absorbed dose of gamma radiation to the total absorbed dose during irradiation in the reactor in the steady state and in the modes of increasing and decreasing the power of the OR reactor.

**The structure and volume of the dissertation.** The dissertation consists of an introduction, five chapters, a conclusion, a list of cited literature. The volume of the thesis is 225 pages.

**ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ**  
**СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ**  
**LIST OF PUBLISHED WORKS**

**I бўлим (Часть I; Part I)**

1. Муссаева М.А., Ибрагимова Э.М. Спектры поглощения и гаммалюминесценции облученных стекол и кристаллов SiO<sub>2</sub> с пленочным покрытием // Узбекский физический журнал. – Ташкент, 2002. – № 5–6 (4). – С. 340–345. (01.00.00. №5).
2. Mussaeva M.A., Ibragimova E.M., Muminov M.I., Vahidov Sh.A. Radiation Resistance and Mechanical Stability of SiO<sub>2</sub>–BaO - Based Glass Coatings for Space Solar-Cell Panels // Glass Physics and Chemistry. – Saint Petersburg (Russia), 2004. –Vol. 30. No 3. – pp. 226–229. (№11. Springer; IF=0.883).
3. Mussaeva M.A., Kalanov M.U., Ibragimova E.M., Muminov M.I. The Influence of Irradiation on the Microhardness and Photoluminescence of SiO<sub>2</sub> // Glass Physics and Chemistry. – Saint Petersburg (Russia), 2006. –Vol. 32, No 5. –pp. 516–523. (№11. Springer; IF=0.883).
4. Mussaeva M.A., Ibragimova E.M., Kalanov M.U., Muminov M.I. Formation of nanodefects in LiF crystals at gamma-irradiation // Physics of the solid state. – Saint Petersburg (Russia), 2006. –Vol 48, No 12. – pp. 2295–2299.(№11. Springer; IF=0.925).
5. Mussaeva M.A., Ibragimova E.M., Muminov M.I. Reactor radiation dosimetry using fused quartz // Atomic Energy. – Moscow, 2006. – Vol.100, No 3. – pp. 210–214. (№11. Springer; IF=0.18).
6. Mussaeva M.A., Ibragimova E.M., Muminov M.I. Determination of  $\gamma$  - ray flux in a stopped WWR-SM reactor from the color- center formation in LiF // Atomic Energy. – Moscow, 2006. – Vol.100, No 5. – pp. 365–369 (№11. Springer; IF=0.18).
7. Mussaeva M.A., Ibragimova E.M., Mukhamedshina, N.M. Muminov M.I., Baitelesov S.A., Dosimbaev A.A. Determination of the neutron flux and  $\gamma$  - radiation in the core of operating and shut-down reactors using quartz glasses and element monitors // Atomic Energy. – Moscow, 2008. – V.105, No 3. –pp. 208–213. (№11. Springer; IF=0.18).
8. Муссаева М.А., Ибрагимова Э.М., Бузриков Ш.Н. Образование наночастиц при взаимодействии радиационных точечны дефектов в кристаллах LiF // Доклады Академии наук Республики Узбекистан. – Ташкент, 2011. – № 1. – С. 29–31 (01.00.00. №7)
9. Ибрагимова Э.М., Муссаева М.А., Каланов М.У, Рустамова В.М. Радиационно индуцированные нанокристаллиты в чистом кварцевом и бариевом стекле // Известия высших учебных заведений. Физика. – Томск (Россия), 2011. – № 1/2(54). – С.288–293. (№1. Web of Sciences; IF=0.268).
10. Ibragimova E.M., Mussaeva M.A. Electron structure modification of interfaces in SiO<sub>2</sub> glass with PbO nanoparticles at gamma-irradiation // Journal of Nanoscience and Nanotechnology. –American Scientific Publishers (USA),

2012. –Vol.12, No11. – pp. 8818–8821 (№26. Academic Journals Database; IF=1.354).
11. Ibragimova E.M., Mussaeva M.A., Kalanov M.U., Mukhamedshina N.M., Sandalov V.N. Lithium nanoparticles in lithium fluorite crystals // *Journal of Physics: Conference Series*. – Bristol (UK), 2012. –Vol.391.–id. 012172. – pp. 1–8. (№3. Scopus; IF=0.55).
  12. Муссаева М.А., Сандалов В.Н., Ибрагимова Э.М. Транспорт носителей заряда в облученных LiF с наночастицами Li // *Доклады Академии наук Республики Узбекистан*. –Ташкент, 2013. – № 2. – С.22–24 (01.00.00. №7).
  13. Ibragimova E.M., Mussaeva M.A., Kalanov M. U. Nanostructures formed in pure quartz glass under irradiation in the reactor core // *Radiation Physics and Chemistry*. – Elsevier, 2014. –Vol.97. –pp. 398–405. (№23. Scientific Journal Impact Factor; IF=2.181).
  14. Муссаева М.А., Сандалов В.Н., Ибрагимова Э.М. Электропроводность нанокompозитного стекла SiO<sub>2</sub>-BaO // *Доклады Академии наук Республики Узбекистан*. – Ташкент, 2014. – № 3. – С. 31–34. (01.00.00. №7)
  15. Ibragimova E.M., Mussaeva M.A., Buzrikov Sh.N. Recombination gamma-luminescence at the nanometal Li - dielectric LiF interface // *Radiation Physics and Chemistry*. – Elsevier, 2015. – Vol.111. – pp. 40–45 (№23. Scientific Journal Impact Factor; IF=2.181).
  16. Mussaeva M.A., Ibragimova E.M. Influence of Gamma Radiation and Action of Neutrons on Photoluminescence and the Microhardness of Barium Silicate Glass // *Glass Physics and Chemistry*. – Saint Petersburg (Russia), 2017. –Vol. 43, No 2. – pp. 151–157 (№11. Springer; IF=0.883).
  17. Муссаева М.А., Ибрагимова Э.М., Сандалов В.Н., Бузриков Ш.Н. Электропроводность свинцовосиликатного стекла // *Доклады Академии наук Республики Узбекистан*. – Ташкент, 2017 – №2. – С. 21–23 (01.00.00. №7).
  18. Mussaeva M.A., Ibragimova E.M., Buzrikov S.N. Study of Radiation-Induced Processes in Electron-Irradiated Alkali-Silicate Glass // *Glass Physics and Chemistry*. - Saint Petersburg (Russia), 2018. –Vol. 44, No.3. – P. 170–173. (№11. Springer; IF=0.883).
  19. Mussaeva M.A., Ibragimova E.M., Buzrikov Sh.N. Optical Spectra of Gamma-Irradiated LiF Crystals with Anisotropic Lithium Nanoparticles // *Optics and Spectroscopy*. – Pleiades Publishing (USA), 2018. – Vol. 124, No 5. – pp.644–648. (№11. Springer; IF=0.824).
  20. Муссаева М.А., Ибрагимова Э.М. Формирование микронитей металлического лития при облучении фторида лития гамма-лучами и электронами // *Доклады Академии наук Республики Узбекистан*. – Ташкент, 2018. – №2. – С. 38–43 (01.00.00. №7).
  21. Mussaeva M.A., Ibragimova E.M. Electron microscopy and elemental composition of the near-surface layer of electron-irradiated LiF crystals // *Technical Physics Letters*. – Springer, 2019. –Vol.45, No 2. – pp. 155–158. (№11. Springer; IF=0.714).

22. Муссаева М.А., Ибрагимова Э.М. Анизотропия оптических спектров кристаллов LiF:Cu с наночастицами лития после облучения электронами // Доклады Академии наук Республики Узбекистан. – Ташкент, 2019. – №6. – С.29–37 (01.00.00. №7).
23. Патент РУз № IAP 2009 0114 от 23.04.2009. Способ окрашивания хрустальных изделий / Ибрагимова Э.М., Мухамедшина Н.М., Муссаева М.А. // Расмий ахборотнома. 2010. – №4 (108) – С.13.

### **Ибўлим (Ичасть; partII)**

24. Mussaeva M.A., Kalanov M.U., Ibragimova E.M., Karabaev Kh.Kh. Determination of the gamma-ray flux of the stopped WWR-SM reactor by color center production in LiF // The Third Eurasian Conference «Nuclear Science and its Application»: Book of Abstracts, October 5–8, 2004. – Tashkent, 2004. – p.60.
25. Mussaeva M.A., Kalanov M.U., Ibragimova E.M., Sandalov V.N., Muminov M.I. Defect production in silica glasses under gamma-irradiation at the quenched nuclear reactor // The third Eurasian Conference «Nuclear Science and its Application»: Book of Abstracts, October 5–8, 2004. – Tashkent, 2004. – p. 61.
26. Mussaeva M.A., Ibragimova E.M., Dusenbaev A., Muminov M.I. Separate dosimetry of gamma-radiation with fused quartz // 5-th International Conference «Nucler and radiation and physics». – Almaty (Kazakhstan), 2005. – p. 265–266.
27. Ибрагимова Э.М., Каланов М.У., Муссаева М.А. Дефектообразование в стеклах при воздействии выделенной гамма-компоненты излучения реактора // Тезисы докладов Шестого Международного Уральского семинара «Радиационная физика металлов и сплавов», 20–26 февраля 2005. – Екатеринбург (Россия), 2005. – С.124–125.
28. Муссаева М.А., Ибрагимова Э.М., Муминов М.И. Радиоллиз в кристаллах фторида лития под действием радиационного поля // Радиационно-термические эффекты и процессы в неорганических материалах: Труды V Международной научной конференции. – Томск (Россия), 2006. – С. 254–256.
29. Mussaeva M.A., Ibragimova E.M., Kalanov M.U. Formation of nanostructure fragments in quartz glass at irradiation in the reactor core // The seventh international conference «Modern problems of nuclear physics» 22–25 September 2009. –Tashkent, 2009. – С. 169–171.
30. Муссаева М.А. Центры окраски SiO<sub>2</sub>–BaO стекол гамма-облученных в тепловой колонне реактора и <sup>60</sup>Co // 7-я международная конференция «Ядерная и радиационная физика»: Сборник докладов, 8-11 сентября 2009. – Алматы (Казахстан), 2009. – С. 341–345.
31. Ибрагимова Э.М., Муссаева М.А., Каланов М.У., Рустамова В.М. Радиационно-индуцированные нанокристаллиты в чистом кварцевом и бариевом стекле // Радиационно-термические эффекты и процессы в

- неорганических материалах: Труды VII Международной научной конференции, 2-7 октября 2010. – Томск (Россия), 2010. – С. 450–456.
32. Mussaeva M.A., Ibragimova E.M. Lithium nanoparticles optical absorption of gamma-irradiated LiF crystals // The 9<sup>th</sup> Joint Uzbek-Korea Symposium Nanoscience: Problems and Prospects Quantum Functional Materials and Devices, 2-5 November. 2010. – Tashkent, 2010. – p. 21.
  33. Ибрагимова Э.М., Муссаева М.А., Каланов М.У. Образование наноструктуры и наночастиц в кристаллах фторида лития при гамма-облучении // 9-международный Уральский Семинар «Радиационная физика металлов и сплавов», 20–26 февраля 2011: Тез. докл. – Кыштым (Россия). – С. 65–66.
  34. Муссаева М.А. Образование наночастиц в кристаллах LiF при гамма облучении // 8-я Международная конференция «Ядерная и радиационная физика», 20–23 сентября 2011: Тез. докл. – Алматы (Казахстан), 2011. – С. 324.
  35. Муссаева М.А. Влияние облучения на наночастицы свинца (PbO) в матрице SiO<sub>2</sub> стекла // 8-я Международная конференция «Ядерная и радиационная физика», 20-23 сентября 2011: Тез. докл. – Алматы (Казахстан), 2011. – С. 298.
  36. Mussaeva M.A, Ibragimova E.M., Sandalov V.N., Muminov M.I. Radiation-stimulated electric transport in SiO<sub>2</sub>–BaO glasses with nanocrystallites // “Nuclear science and its application”: Book of abstracts of the International Conference September 25–28, 2012, Samarkand. – Tashkent, 2012. – pp. 293–294.
  37. Ibragimova E.M., Mussaeva M.A., Sandalov V.N., Muminov M.I. Electric conductivity of gamma-irradiated lithium fluorite with metal nanoparticles // Internat. Conf. on Low-dimensional functional materials, NATO Advanced Research Workshop, 15–19 October 2012. –Tashkent, 2012. – pp. 48–49.
  38. Mussaeva M.A., Ibragimova E.M. Quantum effects in optical response of nanocrystals in crystal and amorphous matrices under irradiation // Internat. Conf. Low-dimensional nanoscale systems: quantum effects, particle transport and advanced materials November 6–7, 2012. – Tashkent, 2012. –p.16.
  39. Ibragimova E.M., Mussaeva M.A., Kalanov M.U. Nanostructures formed in pure quartz glass at reactor irradiation // The 7-th Internat. Conf. on Advanced Materials. ROCAM, 28–31 avgust 2012: Book of Abstracts. – Romania, 2012. – pp.17.
  40. Mussaeva M.A., Ibragimova E.M. Recombination gamma-luminescence at the Li-nanometal – LiF-dielectrics interface // VII Eurasian Conference “Nuclear science and its application”, October 21–24, 2014: Book of Abstracts. – Baku (Azerbaijan), 2014. – pp. 237–238.
  41. Mussaeva M.A., Ibragimova E.M., Buzrikov Sh.N. Thermoradiation effect on interfaces in SiO<sub>2</sub>–BaO glass // The International Symposium “New Tendencies of Developing Fundamental and Applied Physics: Problems, Achievements. Prospectives” November 10–11, 2016: Book of Abstracts. – Tashkent, 2016. –pp. 348–350.

42. Муссаева М.А., Ибрагимова Э.М., Бузриков Ш.Н., Исматов Н.Б. Механизмы создания сложных радиационных дефектов в кристаллах LiF при электронном облучении // «Фундаментальные и прикладные вопросы физики»: Труды международной конференции, 13–14 июня 2017. – Ташкент, 2017. – С.62–67.
43. Муссаева М.А., Ибрагимова Э.М., Бузриков Ш.Н. Центры окраски силикатного стекла после облучения электронами // Международный научный форум «Ядерная наука и технологии», 12–15 сентября 2017: Тез.докл. – Алматы (Казахстан), 2017. –С.230.
44. Муссаева М.А., Ибрагимова Э.М. Неоднородная по глубине дефектность при гамма и электронном облучении кристаллов LiF // «Седьмая Международная конференция по физической электронике IPES-7» 18-19 мая 2018: Тез.докл. – Ташкент, 2018. –С.41.
45. Муссаева М.А., Ибрагимова Э.М., Сандалов В.Н., Амонов М.З., Бузриков Ш.Н. Поверхностная электропроводность кристаллов LiF, облученных электронами // Труды XXVII Международной конференции «Радиационная физика твердого тела» 09 июля -14 июля 2018. – Севастополь, 2018. – С. 375–381.
46. Муссаева М.А., Ибрагимова Э.М. Образование нанотрубок графена на облученных поверхностях диэлектриков // XIV Международная научная конференция «ФТТ, функциональные материалы и новые технологии» 1-4 августа 2018: Тез.докл. – Бишкек, 2018. –С.121–123.
47. Муссаева М.А., Ибрагимова Э.М. Рост низкоразмерных наночастиц лития в кристаллах LiF при высокоэнергичном облучении // VIII Международная конференция «Семипалатинский испытательный полигон: наследие и перспективы развития научно-технического потенциала, 11-13 сентября 2018: Тез. докл. – Курчатов (Казахстан).– С.134–135.
48. Ибрагимова Э.М., Муссаева М.А., Саттарова Ш.Г. Стабильные и нестабильные центры в щелочносиликатном стекле, наведенные 4 МэВ электронным облучением // Труды международной конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы физики», 22–23 сентября 2020. – Ташкент: Физико-технический институт НПО «Физика-Солнце» Академии наук Республики Узбекистан, 2020. –С.38–43.

Илмий маслаҳатчи

Э.М. Ибрагимова

Талабгор

М.А. Муссаева