

**O‘ZBEKISTON MILLIY UNIVERSITETI HUZURIDAGI  
YARIMO‘TKAZGICHLAR FIZIKASI VA MIKROELEKTRONIKA  
ILMIY-TADQIQOT INSTITUTI HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR  
BERUVCHI DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

---

**O‘ZBEKISTON MILLIY UNIVERSITETI HUZURIDAGI  
YARIMO‘TKAZGICHLAR FIZIKASI VA MIKROELEKTRONIKA  
ILMIY-TADQIQOT INSTITUTI**

**YO‘LDOSHEV MURODJON AKBARALI O‘G‘LI**

**FOTOREFRAKTIV YARIMO‘TKAZGICHLARNING VA OKSIDLI  
KRISTALLARNING OPTIK VA GOLOGRAFIK XOSSALARI**

**01.04.10 – Yarimo‘tkazgichlar fizikasi**

**FIZIKA-MATEMATIKA FANLARI BO‘YICHA FALSAFA DOKTORI (PhD)  
DISSERTATSIYASI AVTOREFERATI**

**Toshkent - 2024**

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

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

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

**Yo'ldoshev Murodjon Akbarali o'g'li**

Fotorefraktiv yarimo'tkazgichlarning va oksidli kristallarning optik va  
golografik xossalari ..... 3

**Йулдошев Муроджон Акбарали угли**

Оптические и голографические свойства фоторефрактивных  
полупроводников и оксидных кристаллов..... 23

**Yoldoshev Murodjon Akbarali ogli**

Optical and holographic properties of photorefractive semiconductors and  
oxide crystals ..... 43

**E'lon qilingan ishlar ro'uxati**

**Список опубликованных работ**

List of published works..... 47

**O‘ZBEKISTON MILLIY UNIVERSITETI HUZURIDAGI  
YARIMO‘TKAZGICHLAR FIZIKASI VA MIKROELEKTRONIKA  
ILMIY-TADQIQOT INSTITUTI HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR  
BERUVCHI DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

---

**O‘ZBEKISTON MILLIY UNIVERSITETI HUZURIDAGI  
YARIMO‘TKAZGICHLAR FIZIKASI VA MIKROELEKTRONIKA  
ILMIY-TADQIQOT INSTITUTI**

**YO‘LDOSHEV MURODJON AKBARALI O‘G‘LI**

**FOTOREFRAKTIV YARIMO‘TKAZGICHLARNING VA OKSIDLI  
KRISTALLARNING OPTIK VA GOLOGRAFIK XOSSALARI**

**01.04.10 – Yarimo‘tkazgichlar fizikasi**

**FIZIKA-MATEMATIKA FANLARI BO‘YICHA FALSAFA DOKTORI (PhD)  
DISSERTATSIYASI AVTOREFERATI**

**Toshkent - 2024**



## KIRISH (falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi annotatsiyasi)

**Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati.** Jahonda axborotni maksimal samaradorlik bilan saqlash muammosi muhim o‘rin kasb etadi. So‘ngi yillarda turli qayd qiluvchi vositalarda axborotni yozib oladigan o‘ta yuqori sig‘imga ega golografik saqlash qurilmalarini yaratish bo‘yicha kompleks nazariy va amaliy tadqiqotlar olib borilmoqda. Shuni ta’kidlash kerakki, golografik usullar yassi hamda hajmiy ko‘rinishdagi axborotlarni qayd etish, saqlash va tiklash imkonini beradi. Keng taqiqlangan sohaga ega bo‘lgan niobat litiy kristallari fotonika, kvant elektronikasi, opto va akustoelektronika sohasida qo‘llaniladigan istiqbolli materiallardan biri hisoblanadi. Elektrooptik, pezoelektrik, nochiziqli effektlar, ikkinchi garmonika generatsiyasi va lazer nurlanishi ta’sirida nur sindirish ko‘rsatkichining o‘zgarishi kabi optik xususiyatlari gologrammalarni qayd qilish uchun niobat litiy kristallaridan foydalanishga keng imkon beradi. Qolaversa, niobat litiy kristalining optik va fotoelektrik xususiyatlariga  $\gamma$ -nurlanishning ta’siri to‘g‘risida bir qator tadqiqotlar olib borilgan bo‘lsada uning radiatsion va nuqtaviy nuqsonlari, hamda rang markazlarining hosil bo‘lish mexanizmlari haqida aniq bir to‘xtamga kelinmagan. Shuning uchun, niobat litiy kristalining optik xususiyatlariga  $\gamma$ -nurlanishning ta’sirini tadqiq qilishga alohida e’tibor qaratilmoqda.

Turli nanoo‘lchamli yarimo‘tkazgich tuzilmalarini sintez qilish, ularning fizik xossalarini tadqiq qilish hamda ular asosida turli yarimo‘tkazgich-segnetoelektrik tuzilmalarda maydonli tranzistorlar yoki elektr maydon bilan boshqariladigan fotorezistor qurilmalari yaratishga katta e’tibor qaratilmoqda. Bunday nanomateriallar orasida rux oksidi nanotuzilmalari o‘zining noyob elektrooptik xususiyatlari sabab istiqbolli material sifatida qaralmoqda. Bu kabi xususiyatlarga ega ZnO nanotuzilmalarini keng taqiqlangan sohali materiallarda xususan, niobat litiy tagliklarida past haroratlarda o‘stirish, ularning kristall panjarasidagi xususiy nuqtaviy nuqsonlarning tabiati va o‘stirishdan keyingi nanotuzilmalarning optik xossalarini tadqiq qilish dolzarb vazifalardan hisoblanmoqda.

Respublikamizda materialshunoslik sohasidagi fundamental tadqiqotlarga yangi turdagi yarimo‘tkazgich materiallarni turli tarmoqlarda izlash va avvaldan ma’lum bo‘lgan materiallarning, jumladan, dielektrik, pezoelektrik va segnetoelektrik kristallarning xossalarini o‘rganishga katta e’tibor qaratilmoqda. Ushbu fundamental va amaliy tadqiqotlar yo‘nalishlari O‘zbekistonda ilm-fan va yuqori texnologiyali ishlab chiqarishni rivojlantirishda muhim ahamiyatga ega bo‘lib, 2022–2026-yillarda yangi O‘zbekistonni rivojlantirish strategiyasida<sup>1</sup> o‘z ifodasini topgan.

Ushbu dissertatsiya tadqiqoti O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2021-yil 19-martdagi “Ta’lim sifatini oshirish va fizika sohasida ilmiy tadqiqotlarni takomillashtirish chora-tadbirlari to‘g‘risida”gi PQ–5032-son qarori va O‘zbekiston Respublikasi Vazirlar Mahkamasining 2021-yil 12-oktyabrdagi

---

<sup>1</sup>2022 yil 28 yanvardagi PF–60-sonli “2022–2026-yillarga mo‘ljallangan yangi O‘zbekistonning taraqqiyot strategiyasi to‘g‘risida” dagi O‘zbekiston respublikasi prezidentining farmoni.

“Muqobil energetika, elektrotexnika va mikroelektronikani rivojlantirish, yarimo‘tkazgichlar fizikasi sohasidagi tadqiqotlar samaradorligini oshirishni davlat tomonidan qo‘llab-quvvatlash, shuningdek, Mirzo Ulug‘bek nomidagi O‘zbekiston Milliy universiteti huzuridagi Yarimo‘tkazgichlar fizikasi va mikroelektronika ilmiy-tadqiqot institutini mustahkamlash chora-tadbirlari to‘g‘risida”gi 639-son qarorlarida ko‘zda tutilgan vazifalarni bajarishga ma‘lum darajada xizmat qiladi.

**Tadqiqotning O‘zbekiston Respublikasida fan va texnologiyani rivojlanishning ustuvor yo‘nalishlariga mosligi.** Mazkur tadqiqot O‘zbekiston Respublikasi fan va texnologiyalar rivojlanishining III. «Energetika, energiya resurslarini tejash, elektron asbobsozlikni rivojlantirish, mashinasozlik va asbobsozlik; zamonaviy mikroelektronika, fotonika, transport» ustuvor yo‘nalishlariga muvofiq bajarilgan.

**Muammoning o‘rganilganlik darajasi.** Hozirgi kunga kelib fotorefraktiv kristallarning optik va golografik xossalari, hamda yarimo‘tkazgich-segnetoelektrik tuzilmalarning optik, fotoelektrik, morfologik va boshqa fizik xususiyatlari quyidagi ilmiy markazlarda tadqiq qilib kelinmoqda. Masalan, Parij ilmiy tadqiqotlar markazi (Fransiya), Praga universitetining ilg‘or tadqiqotlar markazi (Chexiya), Eyndxoven fan-texnologiya universiteti (Niderlandiya), Perlis universitetining nanoelektronika markazi (Malayziya), Uxan ilmiy-tadqiqot markazining fizika va matematika instituti (Xitoy), Lehi universitetining fizika fakulteti (AQSh), Pavia universitetining fizika fakulteti (Italiya), Belvauxning fan va texnologiya instituti (Lyuksemburg). Germaniya va Amerika olimlari (C.T.Myuller, E.V.Teylor va boshqalar) fotorefraktiv kristallarga  $\gamma$ -nurlanish ta‘siri va kombinatsion sochilish mexanizmlari, hamda yarimo‘tkazgich-segnetoelektrik tuzilmalarning elektrooptik xususiyatlarini keng miqyosda tadqiq qilganlar.

Tananayev M.N. nomidagi Rossiya nodir elementlar va mineral xomashyolar kimyosi va texnologiyasi institutida M.N.Palatnikov, I.N. Yefremov, N.V. Sidorov va ularning shogirdlari materialning molekulyar tuzilishini o‘zgartirish orqali niobat litiy kristallari va ularning kondensatlarining fotorefraktiv xossalarini nazorat qilishning samarali usulini ishlab chiqishni amalga oshirdilar. Qolaversa, ushbu olimlar guruhi tomonidan fotorefraktiv kristallarning tuzilmaviy xususiyatlarini, ularning tuzilishidagi mumkin bo‘lgan o‘zgarishlar darajasi va optik xususiyatlarini aniqlashning metodikasi ham ishlab chiqilgan. Qirg‘izistonlik olimlar Akayev A.A., Jamankyzov N.K., Jumaliyev K.M. yorug‘lik nuri shaklidagi axborotlarni golografik usullar yordamida qayd etish va saqlash, nazariyasi va amaliyoti muammolari bilan shug‘ullanganlar.

O‘zbekistonlik olimlar Xabibullaev P.K., Mirzayev S.Z., Azamatov Z.T., Krivorotov V.F., Sabirov L.M., Axmedjanov F.R., Semenov D.I. va boshqalar fotorefraktiv kristallarning optik va golografik xossalarini, shuningdek, bu xossalarga  $\gamma$ -nurlanishning ta‘siri to‘g‘risida bir qator tadqiqotlar olib borganlar. Biroq hozirgi vaqtga qadar keng taqiqlangan sohali niobat litiy kristallarining optik va golografik xususiyatlariga temir ionlarini hamda  $\gamma$ -nurlanishining ta‘sirini miqdoriy jihatdan baholash ishlari to‘liq amalga oshirilmagan. Bundan tashqari, ZnO nanotayoqchalarini niobat litiy tagliklarida past haroratlarda o‘stirish va

o‘stirishdan keyingi nanotuzilmalardagi morfologik va spektral o‘zgarishlar chuqur tadqiq qilinmagan.

**Dissertatsiya tadqiqotining dissertatsiya bajarilgan oliy ta’lim yoki ilmiy-tadqiqot muassasasining ilmiy-tadqiqot ishlari rejalari bilan bog‘liqligi.** Dissertatsiya ishi O‘zbekiston Milliy universiteti va O‘zbekiston Milliy universiteti huzuridagi yarimo‘tkazgichlar fizikasi va mikroelektronika ilmiy-tadqiqot instituti ilmiy tadqiqot dasturi doirasida “Yarimo‘tkazgichli geterotuzilmalarda, fotorefraktiv, fotoxrom va fotopolimer materiallarda axborotni saqlashning golografik jarayonlari va mexanizmlarini tadqiq qilish” mavzusida va BF-2-027 “Nanozarrachalarning hosil bo‘lish mexanizmlari va ularning noxizizli optik xususiyatlarini tadqiq qilish” (2018–2020 yy.) loyihasi doirasida bajarilgan.

**Tadqiqotning maqsadi** keng taqiqlangan sohali yarimo‘tkazgichli  $\text{LiNbO}_3$ ,  $\text{LiNbO}_3\text{:Fe}$  kristallarida golografik qayd qilish jarayoni,  $\gamma$ -nurlanishning ushbu kristallarning optik xususiyatlariga ta’siri va yarimo‘tkazgich-segnetoelektrik tuzilmalarning elektrooptik xossalarini tadqiq qilishdan iborat.

**Tadqiqotning vazifalari:**

keng taqiqlangan sohali niobat litiy kristallarining fotorefraktiv xususiyatlari, stoxiometriyasi, legirlanganlik darajasi va o‘stirish usularini tahlil qilish;

temir ionlari bilan legirlangan niobat litiy kristallaridagi sindirish ko‘rsatkichi o‘zgarishini qayd etish, golografik usulda axborotni yozish va o‘qishning xarakterli xususiyatlarini tahlil qilish;

nurlantirilmagan va turli dozalarda  $\gamma$ -nurlari bilan nurlantirilgan  $\text{LiNbO}_3$  va  $\text{LiNbO}_3\text{:Fe}$  kristallarining optik yutilish va kombinatsion sochilish spektrlarini tadqiq qilish;

$\text{LiNbO}_3$  va  $\text{LiNbO}_3\text{:Fe}$  monokristall tagliklarida gidrotermal usulda o‘stirilgan rux oksid nanotayoqchalarini optik xususiyatlarini tadqiq qilish;

Si asosli  $\text{LiNbO}_3$  yupqa plyonkalarini olish,  $\text{LiNbO}_3\text{/ZnO/Si}$  geterotuzilmalarining volt-amper xarakteristikalarini va morfologiyalarini tadqiq qilish.

**Tadqiqotning ob’yekti** sifatida keng taqiqlangan sohali sof va turli konsentratsiyada temir ionlari bilan legirlangan niobat litiy kristallari hamda yarimo‘tkazgich-segnetoelektrik tuzilmalari olingan.

**Tadqiqotning predmeti** sifatida keng taqiqlangan sohali niobat litiy kristallarida axborotni saqlash va golografik qayd qilishning fizik mexanizmlari va turli dozalardagi  $\gamma$ -kvantlarining niobat litiy kristalining optik xossalariga ta’siri, yarimo‘tkazgichli ZnO tuzilmalarning morfologiyasi, fotolyuminessensiya va yutilish spektrlari hamda volt-amper xarakteristikalarini olingan.

**Tadqiqotning usullari.** Qo‘yilgan vazifalarni amalga oshirish uchun quyidagi: kristallarning golografik xususiyatlarini aniqlash uchun ikki nurli stend usuli, yutilish va kombinatsion sochilish spektrlarini o‘lchashda UV-3600 (Shimadzu) va Ocean Optics QEPro qurilmasi, rux nanotayoqchalarini keng taqiqlangan sohali niobat litiy taglikga o‘stirishda gidrotermal usullaridan, yarimo‘tkazgichli rux oksid tuzilmalarning morfologiyasini tadqiq qilishda EVO MA10 (Carl Zeiss) skanerlovchi elektron mikroskoplaridan foydalanilgan.

### **Tadqiqotning ilmiy yangiligi** quyidagilardan iborat:

niobat litiy kristallarining difraksiya samaradorligi He-Ne lazeri uchun  $\eta=31\%$ , He-Cd lazeri uchun  $\eta=34\%$  ekanligi hamda fotosezgirliги temir ionlarining konsentratsiyasiga bog‘liq holda 3÷7 marta ortganligi aniqlangan;

ilk bor  $\text{LiNbO}_3$  va  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$  kristallarining fotorefraktiv sezgirliги  $\gamma$ -nurlanish dozasi (D<10<sup>8</sup> R) bog‘liqligi va taqiqlangan soha kengligi 3,39 eV dan 3,04 eV gacha o‘zgarishi aniqlangan;

ilk bor  $\gamma$ -kvantlari bilan nurlantirilgan niobat litiy kristallari spektrining 1300÷1600  $\text{sm}^{-1}$  oralig‘iga mos keluvchi maksimal nuqtasi aniqlangan;

$\text{ZnO-LiNbO}_3:\text{Fe}$  tuzilmalarining yutilish ko‘ffisiyenti  $\text{ZnO-LiNbO}_3$  tuzilmalarining yutilish ko‘ffisiyentiga nisbatan 3 marta yuqori ekanligi aniqlangan;

ilk bor yoritilmagan holatda  $\text{LiNbO}_3/\text{ZnO}/\text{Si}$  geteroo‘tishlarning to‘g‘rilash ko‘ffisiyenti 80÷90 oralig‘ida ekanligi aniqlangan;

ilk bor oq yorug‘lik nuri bilan yoritilganda  $\text{LiNbO}_3/\text{ZnO}/\text{Si}$  geterotuzilmalarida teskari tokning qiymati 3÷5 V oraliqda keskin ortganligi aniqlangan.

### **Tadqiqotning amaliy natijalari** quyidagilardan iborat:

Tadqiqot ishida olingan natijalar  $\text{LiNbO}_3$  va turli konsentratsiyali  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$  monokristallarining optik xossalari elektromagnit nurlanish natijasida sodir bo‘ladigan fizik jarayonlar to‘g‘risida ilmiy bilim va ko‘nikmalarni kengroq rivojlanishiga hissa qo‘shadi;

$\text{LiNbO}_3$  va turli konsentratsiyali  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$  kristallarida nurning ikkilanib sinish xususiyati, oddiy va g‘ayrioddiy nurlarning o‘zaro energiya ta’sirlashuvi, spekl tasvirlari fotorefraktiv kristallarning tuzilmaviy va optik jihatdan mukammalligini baholash usulini yaratish va golografik axborot zichligini oshirish uchun foydalaniladi.

**Tadqiqot natijalarining ishonchliligi** keng taqiqlangan sohali  $\text{LiNbO}_3$  va turli konsentratsiyali  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$  hamda yarimo‘tkazgich-segnetoelektrik tuzilmalarning morfologiya, fotoluminessensiya, yutilish spektrlari va kombinatsion sohilish xususiyatlarini tadqiq qilishda zamonaviy o‘lchov qurilmalaridan foydalanilganligi, bundan tashqari, nufuzli nashlarda chop etilgan ishlarning natijalariga mos kelishi bilan asoslanadi.

**Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati.** Tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati axborotni qayta ishlash va saqlash sohasida yangi bilimlarni olish,  $\gamma$ -nurlanish fotorefraktiv xususiyatini belgilovchi asosiy omillardan biri ekanligini hamda yarimo‘tkazgich-segnetoelektrik tuzilmalarning optik xossalari haqida fizik tushunchalarni kengaytirishga yordam berishi bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati shundan iboratki, niobat litiy materiallaridan qaytariluvchi xotira elementi sifatida foydalanish, dozimetriyada  $\gamma$ -nurlanish dozalarining ma’lum diapazonida sezuvchanligi yuqori bo‘lgan materialni yaratishda hamda yarimo‘tkazgich-segnetoelektrik tuzilmalardan maydonli tranzistorlar va fotorezistorlar olishda qo‘llanishi mumkin.

### **Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi.**

LiNbO<sub>3</sub> va turli konsentratsiyali LiNbO<sub>3</sub>:Fe kristallarining fotorefraksiya mexanizmi,  $\gamma$ -nurlanishning ushbu kristallarning optik xususiyatlariga ta'siri va yarimo'tkazgich-segnetoelektrik tuzilmalarning morfologik, tarkibiy hamda elektrofizik xususiyatini o'rganish asosida:

LiNbO<sub>3</sub> va LiNbO<sub>3</sub>:Fe kristallarining lazer va gamma nurlanish ta'sirida oddiy va g'ayrioddiy nur sindirish ko'rsatkichi hamda nochiziqli optik xossalarning o'zgarishi bo'yicha olingan ilmiy natijalardan O'zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasining U.A. Arifov nomidagi Ion-plazma va lazer texnologiyalari institutining "Ko'p fazali tizimlarning termofizikasi" laboratoriyasida bajarilgan "Dielektrik va segnetoelektrik kristallardagi elastik, fotoelastik va superior xossalarning nochiziqli hodisalari, fazaviy o'tishlari va anizotropiyasi" mavzusidagi fundamental tadqiqot doirasida akustik to'lqinlarning yuqori chastotali diapazonida LiNbO<sub>3</sub> va LiNbO<sub>3</sub>:Fe kristallarning elastik va fotoelastik xususiyatlarini tadqiq qilish va niobat litiy kristallarining akusto-optik sifat ko'effitsiyentini aniqlashda foydalanilgan (O'zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasining 2023-yil 4-iyuldagi № 2/1255-1423-sonli ma'lumotnomasi). Ilmiy natijalardan foydalanish akustik to'lqinlar ta'sirida yorug'likning anizotrop difraksiyasi uchun difraksiya burchaklarini hisoblash imkonini bergan;

dissertatsiya ishida lazer nurlarining LiNbO<sub>3</sub> kristalida ikkilanib sinishi, nur sindirish ko'rsatkichi, yutilish ko'effitsiyentlari va nochiziqli optik xususiyatlari bo'yicha olingan ilmiy natijalardan Islom Karimov nomidagi Toshkent davlat texnika universiteti "Lazer texnologiyalari va optoelektronika" kafedrasida "Ko'p rangli ultraqisqa impulslar manbalarini yaratish usullari uchun nochiziqli foton kristallarida femtosekundli lazer impulslarining parametrik o'zaro ta'siri" mavzusidagi Uzb-Ind-96-2021-sonli loyihani bajarishda nochiziqli foton kristallarda lazer nurlanishini uchinchi tartibli nochiziqli optik chastotaga aylantirish jarayonlarida hosil bo'ladigan dispersiya va kubik nochizizliklarni aniqlashda foydalanilgan (O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligining 2023-yil 28-sentabrdagi 4/17-4/4-2884-sonli ma'lumotnomasi). Ilmiy natijalardan foydalanish chastota konvertatsiya jarayonlarining samaradorligini va hosil bo'lgan impuls davomiyligi bilan o'zaro ta'sirini hisoblash imkonini bergan.

**Tadqiqot natijalarining aprobatsiyasi.** Dissertatsiya ishi natijalari 8 ta xalqaro va 11 ta respublika ilmiy-amaliy anjumanlarida ma'ruza qilingan va muhokama qilingan.

**Tadqiqot natijalarining e'lon qilinganligi.** Dissertatsiya mavzusi bo'yicha asosiy natijalar 31 ta ilmiy ishda, ulardan 10 tasi dissertatsiya ishlarining asosiy ilmiy natijalarini nashr etish uchun O'zbekiston Respublikasi Oliy attestatsiya komissiyasi tomonidan tavsiya etilgan ilmiy jurnallarda, shu jumladan 5 ta maqola xorijiy xalqaro jurnallarda chop etilgan.

**Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi.** Dissertatsiya kirish, 4 ta bob, xulosa, foydalanilgan adabiyotlar ro'yxatidan iborat. Dissertatsiyaning hajmi 50 ta rasm, 7 ta jadvalni o'z ichiga olgan holda 110 betni tashkil etadi.

## DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

**Kirish** qismida dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurligi asoslangan, tadqiqotning respublikada fan va texnologiyalarni rivojlantirishning ustuvor yo'nalishlariga mosligi ko'rsatilgan, muammoning o'rganilganlik darajasi ochib berilgan, tadqiqot maqsadi va vazifalari belgilangan, tadqiqot ob'yektlari, tadqiqot usullari, tadqiqotning ilmiy yangiligi va amaliy ahamiyati, tadqiqot natijalarining joriy qilinishi, ishni aprotasiyadan o'tganligi va nashr qilinishi, shuningdek Dissertatsiyaning hajmi va tuzilishi to'g'risida qisqacha ma'lumot berilgan.

**“Segnetoelektrlarda axborotlarni qayd etish va saqlash xossalari tahlili”** deb nomlangan birinchi bobda niobat litiy kristalining segnetoelektrik xususiyatlari, fazaviy diagrammalari, optik, golografik va fotorefraktiv xususiyatlari hamda bu xususiyatlarga  $\gamma$ -kvantlarining va o'tuvchi elementlarining ta'siri to'g'risida batafsil to'xtalib o'tilgan. Tadqiqotlarning hozirgi holati va eng so'ngi ilmiy izlanishlari tahlil qilinib, hal etilishi zarur bo'lgan vazifalar belgilab berilgan.

Bundan tashqari, yarimo'tkazgich-segnetoelektrik tuzilmalarning optik xossalari va bu tuzilmalar asosida yaratilgan istiqbolli materiallarning johon va O'zbekiston olimlari tomonidan olingan bir qancha ilmiy va amaliy ishlarining adabiyotlar tahlili keltirilgan.

**“Niobat litiy monokristalining olish usullari, optik va golografik xossalarini tadqiq qiluvchi tajriba qurilmalarining tasnifi”** deb nomlangan ikkinchi bobda niobat litiy kristalini Choxral usulida o'stirish texnologiyasi to'liq yoritilgan. Niobat litiy kristalini o'tuvchi elementlar bilan legirlash texnologiyasi xususiyatlari tavsiflangan.

Namunalarning optik va golografik xossalarini qadqiq qilish uchun ikki nurli stend sxemasining nazariy va tajribaviy usullari bayon qilingan.

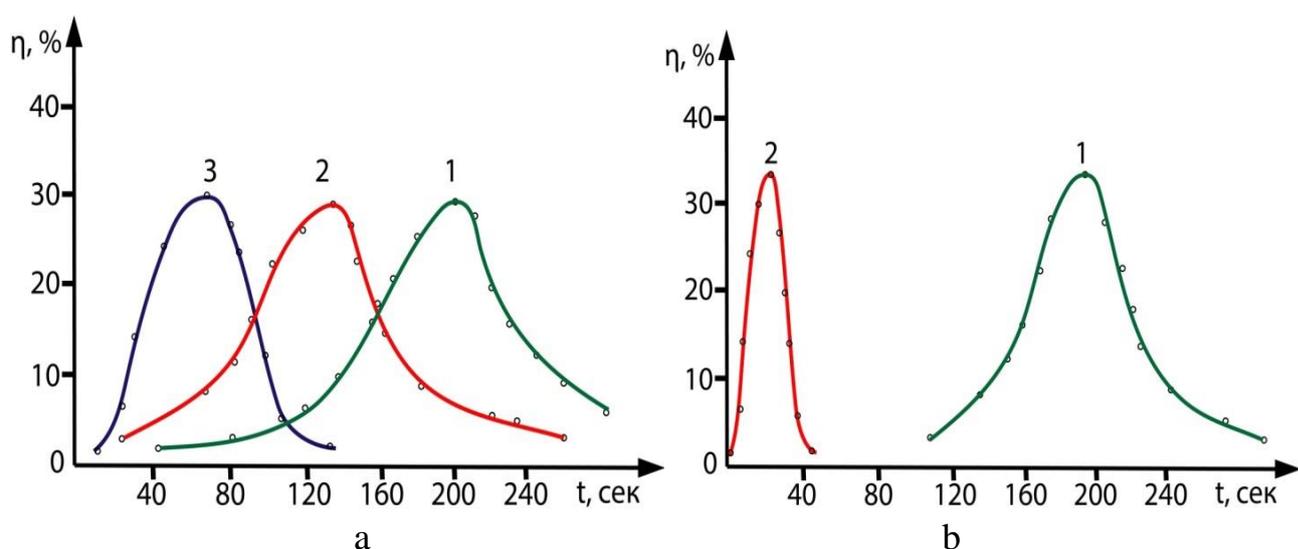
$\text{LiNbO}_3$  va turli konsentratsiyali  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$  kristallariga  $\gamma$ -nurlanish ta'sirini tadqiq qilish uchun 185 nm dan 3300 nm gacha UB va IQ-spektr sohasida ishlovchi ikki nurli UV 3600 spektrometri yordamida yutilish spektrlarini o'lchash uslubi bayon qilingan. Kombinatsion sochilish mexanizmlari o'lchash usullari keltirilgan.

Yarimo'tkazgich-segnetoelektrik tuzilmalarning morfologik va tarkibiy tahlil xususiyatlarini tadqiq qilishda skanerlovchi elektron mikroskop (EVO MA10 Carl Zeiss) qurilmasida o'lchash usullariga ham to'xtalib o'tilgan.

**“Fotorefraktiv kristallarning optik va golografik xususiyatlarining eksperimental tadqiqotlari”** deb nomlangan uchinchi bobda  $\text{LiNbO}_3$  va turli konsentratsiyali  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$  kristallarining optik va golografik xossalari va bu kristallarning optik xususiyatlariga  $\gamma$ -nurlanish ta'siri tadqiqot natijalari keltirilgan.

$\text{LiNbO}_3$  kristalining temir ionlarini turli xil konsentratsiyasi bilan legirlangan hamda geliy-neon ( $\lambda=630$  nm) va geliy-kadmiy ( $\lambda=440$  nm) lazeri bilan qayd etilgan gologrammalarning difraksiya samaradorligining ekspozitsiyasi tadqiqot natijalari keltirilgan (1-rasm). Namunalar (1-namuna 0,003% Fe, 2-namuna 0,005% Fe, 3-namuna 0,020% Fe) ga gologramma sifatida yassi to'lqin fronti

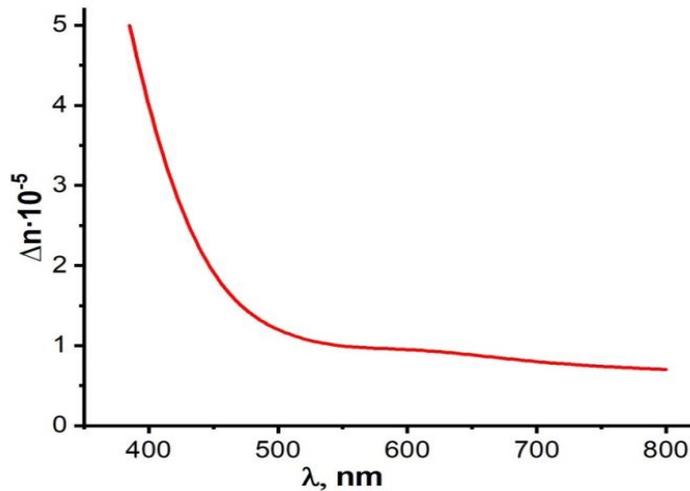
qayd qilinadi. Qayd qilingan gologrammani o‘chirish geliy-kadmiy lazeri ( $\lambda=440$  nm) bilan amalga oshirildi, chunki temir ionlari bilan legirlangan niobat litiy kristallari ko‘k to‘lqin uzunligi uchun yuqori yutilishga ega. Rasmlarda ko‘rishimiz mumkinki, temir ionlari konsentratsiyasining ortishi bilan kristallning fotosezgirliги sezilarli darajada ortadi. Gologrammalar  $\lambda=440$  nm to‘lqin uzunligi uchun ikkita namunada,  $\lambda=630$  nm to‘lqin uzunligi uchun esa uchta namunada qayd etilgan. Ko‘rinib turibdiki, axborot qayd etilganda 2-namunadagi fotosezgirlik 1-namunaga qaraganda 7 marta (1b-rasm), 1a-rasmda esa 1-namunaga qaraganda deyarli 3 barobar oshganligi kuzatildi. To‘lqin uzunligi  $\lambda=630$  nm bo‘lgan namuna uchun difraksiya samaradorlikning maksimal qiymati  $\eta=31\%$ ,  $\lambda=440$  nm to‘lqin uzunligi uchun esa difraksiya samaradorlikning maksimal qiymati  $\eta=34\%$  ga teng ekanligi tajriba natijasida olindi.



**1-rasm.** Difraksiya samaradorligining vaqtga bog‘liqligi: a)  $\lambda=630$  nm (1,2,3);  
b)  $\lambda=440$  nm (1,2)

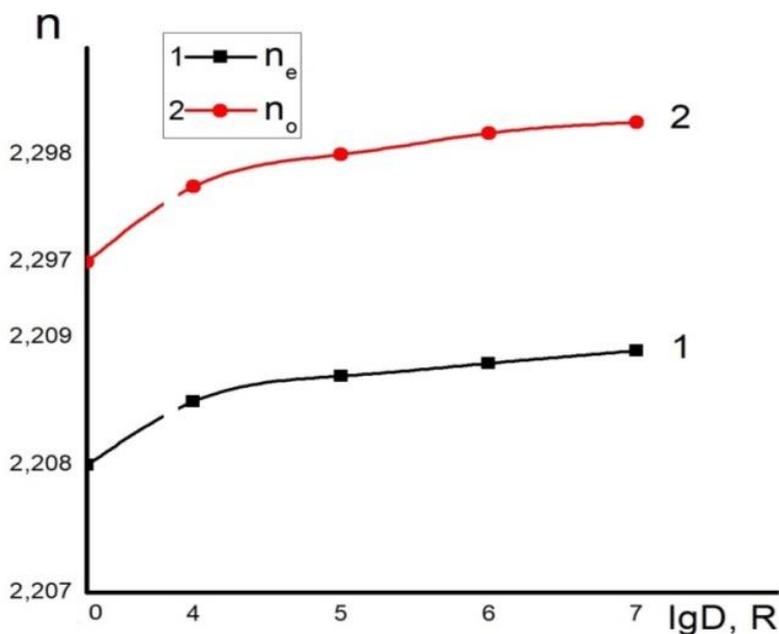
Olingan natijalar shuni ko‘rsatadiki,  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$  kristalining nur sindirish ko‘rsatkichining o‘zgarishi to‘lqin uzunligi ( $\lambda < 500$  nm) bo‘lganda sezilarli darajada oshmoqda (2- rasm). Grafikdan ko‘rinib turibdiki, axborotni yozib olish paytida  $\Delta n_e$  qiymatlari  $10^{-5}$  dan  $5 \cdot 10^{-5}$  gacha o‘zgarishi mumkin ekan.

Bizga ma‘lumki, o‘tish metallari nurlanish ta‘sirida o‘tkazuvchanlik sohasiga d-qobiqdagi elektronlarni beradi. Kristallga  $\text{Fe}^{3+}$  ionlari legirlanganda, undagi yorug‘likning yutilishi ionlanish natijasida yuzaga keladi. Temir bilan legirlangan kristallarning yorug‘likga sezgirliги  $\text{Fe}^{2+}$  ionlarining konsentratsiyasi bilan aniqlanadi. Yorug‘lik ta‘sirida uyg‘ongan  $\text{Fe}^{2+}$  ionlari fotoelektronni o‘tkazuvchanlik sohasiga beradi, bu diffuziya paytida yoritilmagan hududda  $\text{Fe}^{3+}$  ionlari tomonidan tutib qolinadi. Bu esa o‘z navbatida  $\text{Fe}^{2+}$  konsentratsiyasining ortishi bilan axborot qayd qiladigan  $\lambda_q$  to‘lqin uzunligidagi yutilishning kuchayishiga sabab bo‘ladi. Demak, kristallning yorug‘likga sezgirliğini oshiradi.



**2-rasm.** LiNbO<sub>3</sub>:Fe kristalida nur sindirish ko‘rsatkichi o‘zgarishining to‘lqin uzunligiga bog‘liqligi

LiNbO<sub>3</sub> kristalining turli xil zarrachalar va yuqori energiyali fotonlar bilan nurlanishi nuqtaviy va elektronlar bilan bog‘liq nuqsonlarning paydo bo‘lishiga olib keladi, masalan,  $\gamma$ -nurlanish kristallarning rangining o‘zgarishi, fotorefraksiyaning ortishi va optik yutilishning sezilarli o‘zgarishiga olib kelishi mumkin. Fotorefraktiv kristallarga kirishmalar kiritish optik va golografik xususiyatlarini bir muncha o‘zgartirishi mumkinligini bilamiz lekin nafaqat lazer nuri orqali balki  $\gamma$ -nurlanish ta’siri bilan ham bu xususiyatlarni o‘zgartirishimiz mumkin ekan. 3-rasmda  $\gamma$ -nurlanish ta’sirida namunaning oddiy ( $n_o$ ) va g‘ayrioddiy ( $n_e$ ) sindirish ko‘rsatkichining o‘zgarishi ko‘rsatilgan. Ko‘rinib turibdiki, nurlanish dozasining ortishi bilan sindirish ko‘rsatkichi nohiziqli ortib bormoqda.



**3-rasm.** LiNbO<sub>3</sub> kristallari uchun  $n_e$  va  $n_o$  larning  $\gamma$ -nurlanish dozasiga bog‘liqligi

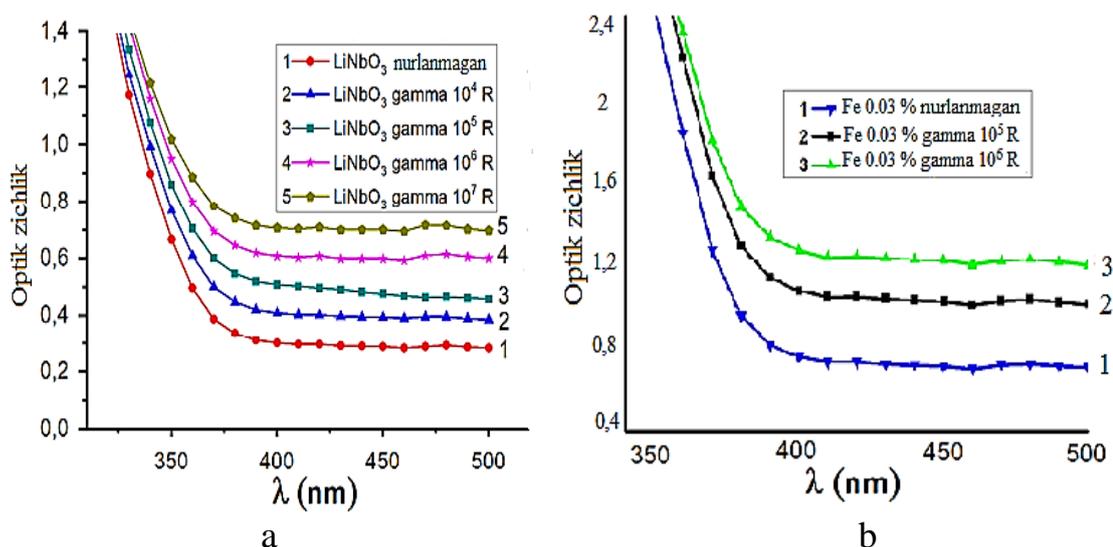
$\gamma$ -nurlanish ta'sirida fotorefraktiv sezgirlik natijalari esa 1-jadvalda keltirilgan. Natijalardan ko'rinib turibdiki,  $\gamma$ -kvantlari tadqiq qilinayotgan kristallarning fotorefraktiv sezgirlikni oshishiga olib keladi. Fotorefraktiv sezgirlik temir ionlari bilan legirlangan niobat litiy kristalida yuqori ekanligini ko'rishimiz mumkin. E'tibor bering, sezgirlikning qabul qilingan ta'rifiga binoan, bir xil tabiatdagi fotorefraktiv markazlarning konsentratsiyasining oshishi  $S=\Delta n/\Delta W$  qiymatning oshishiga olib kelmasligi kerak, chunki bu holda  $\Delta n$  ning oshishi bilan birga, yutilgan energiya miqdori  $\Delta W$  ham ortadi. Lekin kristallarning  $\gamma$ -nurlanish natijasida yuzaga keladigan sezgirlikning ortishi, yutilishning mexanik ortishi bilan emas, balki faqat o'stirish jarayonida hosil bo'ladigan yangi fotorefraktiv markazlarning paydo bo'lishi bilan izohlanadi.

**1-jadval**

LiNbO<sub>3</sub> va LiNbO<sub>3</sub>:Fe kristallarining fotorefraktiv sezgirlikni  $\gamma$ -nurlanish dozasi bog'liqligi

Namunalar	Turli xil dozalar uchun sezgirlik, J <sup>-1</sup> sm <sup>2</sup>				
	nurlanmagan	10 <sup>4</sup> R	10 <sup>5</sup> R	10 <sup>6</sup> R	10 <sup>7</sup> R
LiNbO <sub>3</sub>	3,9	9,3	12,2	19,5	36
LiNbO <sub>3</sub> :Fe	19	-	24,9	37,5	-

Radiatsiya markazlarining xususiyatlarini va ularning fotorefraksiyaga ta'sirini tadqiq qilish uchun niobat litiy va LiNbO<sub>3</sub>:Fe kristallarining yutilish spektrlarini tahlil natijalari keltirilgan (4-rasm).



**4-rasm.** Nurlanmagan va  $\gamma$ -nurlari bilan nurlangan kristallarining yutilish spektrlari: a) LiNbO<sub>3</sub>; b) LiNbO<sub>3</sub>:Fe

Spektrlarda sodir bo'lgan o'zgarishlarni tahlil qilish shuni ko'rsatadiki,  $\gamma$ -nurlanish ta'sirida yutilish LiNbO<sub>3</sub> kristallarida asosan 320-390 nm sohasida va temir bilan legirlangan kristallarda esa 320-410 nm sohasida sezilarli o'zgarishiga olib kelganligini ko'rishimiz mumkin. LiNbO<sub>3</sub> va LiNbO<sub>3</sub>:Fe monokristallarning nurlanmagan va  $\gamma$ -nurlari bilan nurlangan holdagi yutilish spektrining chegarasi nurlanish dozasi ortgani sari ko'zga ko'rinadigan soha tomon siljishini ko'rsatadi. Bu siljish LiNbO<sub>3</sub> uchun 370 nm dan, LiNbO<sub>3</sub>:Fe uchun esa 400 nm dan boshlanadi.

Endi  $\gamma$ -nurlanish ta'sirida yutilish chegarasini siljishi va optik yutilishning ortishini miqdoriy jihatdan tahlil qilib chiqsak. Ber-Burger-Lambert qonuniga asosan, biror muhitdan o'tgan yorug'lik intensivligi quyidagi formula yordamida aniqlanadi:

$$I = I_0 e^{-\alpha d} \quad (1)$$

bunda,  $I$ -qalinligi  $d$  bo'lgan muhitdan o'tgan yorug'lik intensivligi,  $I_0$ -muhitga tushayotgan yorug'lik intensivligi,  $\alpha$ -yutilish koeffitsiyenti.

1-ifodadan yutilish koeffitsiyenti  $\alpha$  ni topadigan bo'lsak, quyidagi tenglik hosil bo'ladi:

$$\alpha = \frac{1}{d} \cdot \ln \left( \frac{I_0}{I} \right) \quad (2)$$

Spektrometr optik zichlik ( $D$ ) ni qayd etishini hisobga olsak, quyidagini formulani olamiz:

$$D = \lg \frac{I_0}{I} \quad (3)$$

bundan:

$$\frac{I_0}{I} = 10^D \quad (4)$$

kelib chiqadi va (4) ni (2) formulaga qo'yib, quyidagi formulani olamiz:

$$\alpha = \frac{D}{d} \ln 10 \quad (5)$$

Quyidagi 2- va 3- jadvallarda  $\text{LiNbO}_3$  va  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$  kristallarining ultrabinafsha hamda ko'zga ko'rinadigan sohalar uchun  $\gamma$ -nurlanish ta'siridagi yutilish koeffitsiyentlarining o'zgarishi keltirilgan. Bu yerda  $\alpha_0$ -nurlantirilmagan namunalarning yutilish koeffitsiyenti.

### 2-jadval

Niobat litiy kristallarining  $\gamma$ -nurlanish dozasiga bog'liq ravishda yutilish koeffitsiyentini o'zgarishi

$\text{LiNbO}_3$	nurlanmagan	$10^4 \text{ R}$	$10^5 \text{ R}$	$10^6 \text{ R}$	$10^7 \text{ R}$
Ultrabinafsha soha					
$\alpha \text{ (mm}^{-1}\text{)}$	1,79	1,85	1,94	2,03	2,06
$((\alpha-\alpha_0)/\alpha_0) \cdot 100\%$		3	8	13	15
Ko'zga ko'rinadigan soha					
$\alpha \text{ (mm}^{-1}\text{)}$	0,32	0,44	0,53	0,69	0,80
$((\alpha-\alpha_0)/\alpha_0) \cdot 100\%$		36	62	112	147

### 3-jadval

$\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$  kristallarining  $\gamma$ -nurlanish dozasiga bog'liq ravishda yutilish koeffitsiyentini o'zgarishi

$\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$	nurlanmagan	$10^5 \text{ R}$	$10^6 \text{ R}$
Ultrabinafsha soha			
$\alpha \text{ (mm}^{-1}\text{)}$	5,28	6,34	6,68
$((\alpha-\alpha_0)/\alpha_0) \cdot 100\%$		20	28
Ko'zga ko'rinadigan soha			
$\alpha \text{ (mm}^{-1}\text{)}$	2,03	2,91	3,45
$((\alpha-\alpha_0)/\alpha_0) \cdot 100\%$		40	70

O'ldashlar ultrbinafsha soha uchun 350 nm, ko'zga ko'rinadigan soha uchun esa 500 nm to'lqin uzunliklarida olingan. Jadvallardan ko'rinib turibdiki, barcha namunalarda ikkala soha uchun ham yutilish ko'ffisiyenti sezilarli ortmoqda.

Muhim kattaliklardan yana biri bo'lgan nur sindirish ko'rsatkichini aniqlab olsak. Nur sindirish ko'rsatkichi tajriba (golografik usulida) yo'li bilan va xorijiy olimlar tomonidan keltirilgan bir nechta empirik formulalar yordamida aniqlangan. Buning uchun avvalo taqiqlangan soha kengligi ( $E_g$ ) ni topib olamiz.  $E_g$  xususiy yutilish chegarasiga urinma o'tkazish usuli bilan aniqlandi.  $\text{LiNbO}_3$  va  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$  kristallari uchun olingan natijalar quyida keltirilgan (4- va 5-jadval). Taqiqlangan soha kengligi quyidagi formula bo'yicha aniqlanadi:

$$E_g = \frac{hc}{\lambda}. \quad (6)$$

bu yerda,  $\lambda$ -yutilish chegarasiga mos keladigan to'lqin uzunligi, h-Plank doimiysi, c-yorug'likning vakuumdagi tezligi.

#### 4-jadval

$\text{LiNbO}_3$  kristallari uchun nurlanish dozasiga bog'liq ravishda nur sindirish ko'rsatkichlarining o'zgarishi

$\text{LiNbO}_3$	$E_g$ (eV)	n [7]	n [8]	n [9]	n, tajriba
nurlanmagan	3,39	1,9462	2,2387	2,2922	2,2971
$10^4$ R	3,34	1,9772	2,2520	2,3018	2,3018
$10^5$ R	3,31	1,9958	2,2600	2,3076	2,3085
$10^6$ R	3,28	2,0144	2,2682	2,3135	2,3123
$10^7$ R	3,25	2,033	2,2765	2,3195	2,3182

#### 5-jadval

$\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$  kristallari uchun nurlanish dozasiga bog'liq ravishda nur sindirish ko'rsatkichlarining o'zgarishi

$\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$	$E_g$ (eV)	n [7]	n [8]	n [9]	n, tajriba
nurlanmagan	3,17	2,0826	2,2989	2,3356	2,3285
$10^5$ R	3,11	2,1198	2,3160	2,3479	2,3447
$10^6$ R	3,04	2,1632	2,3366	2,3626	2,3561

Birinchi empirik formula hindistonlik olimlar guruhi Ravindra va boshqalar tomonidan keltirilgan. Olimlar taqiqlangan soha va yuqori chastotali nur sindirish ko'rsatkichi o'rtasidagi turli nisbatlarni taklif qilishdi va (n) ni chiziqli shaklini  $E_g$  ning funksiya ko'rinishida taqdim etishdi:

$$n = \alpha + \beta E_g. \quad (7)$$

bu yerda,  $\alpha=4,048$  va  $\beta=-0,62 \text{ eV}^{-1}$  o'zgarimas ko'ffisiyentlar.

Erve va Vandamm esa yorug'likning sinishi va tarqalishi fizikasining soddaligini hisobga olib, quyidagi empirik munosabat taklif qilishdi:

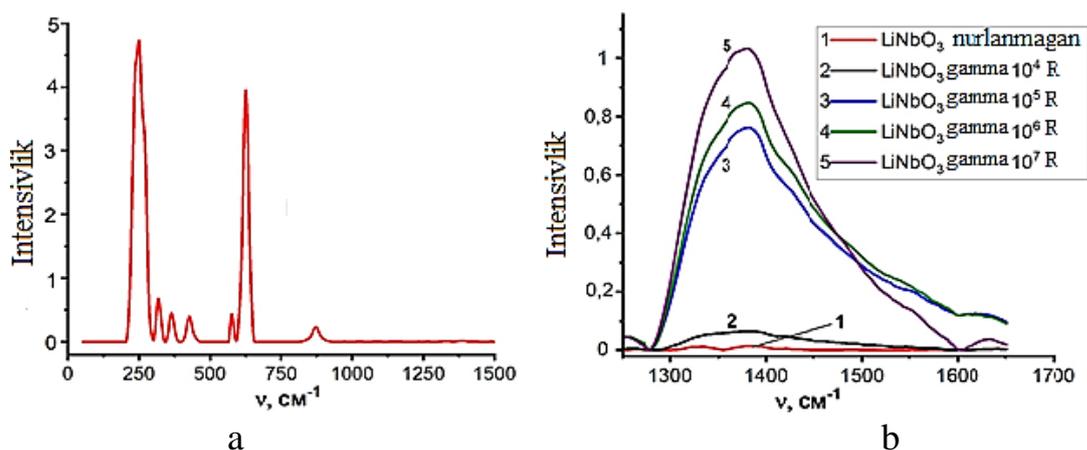
$$n = \sqrt{1 + \left(\frac{A}{E_g + B}\right)^2}. \quad (8)$$

bu yerda,  $A=13,6 \text{ eV}$  va  $B=3,4 \text{ eV}$ .

Gosh va boshqalar Penn va Van Vextenning sohaviy tuzilmasi va kvant-dielektrik jihatdan formulirovkasini ko‘rib chiqib, muammoga boshqacha yondashdilar. Ular A ni valent elektronlarining hissasi sifatida, B ni eng kichik taqiqlangan sohaga doimiy qo‘shimcha sifatida qabul qilib, yuqori chastotali nur sindirish ko‘rsatkichi uchun quyidagi ifodani oldilar:

$$n^2 - 1 = \frac{A}{(E_g + B)^2} \quad (9)$$

bu yerda,  $A=25E_g+212$ ,  $B=0,21E_g+4,25$  va  $(E_g+B)$  materialning mos keladigan taqiqlangan sohasiga ishora qiladi. Shunday qilib, hindistonlik va boshqa tadqiqotchilar  $E_g$  va  $n$  o‘rtasidagi bog‘liqlik uchun uchta empirik formulani taklif qilishdi.



**5-rasm.** Nurlanmagan va nurlangan  $\text{LiNbO}_3$  kristalining Raman spektri

Nurlangan va nurlanmagan  $\text{LiNbO}_3$  monokristallarining Raman spektrlari (5-rasm) keltirilgan. Asosiy  $245 \text{ cm}^{-1}$  va  $632 \text{ cm}^{-1}$  chastotadagi cho‘qqilar  $\text{LiNbO}_3$  kristaliga tegishli ekanligini bildiradi. Li kationlarning siljishi tebnarish chastotasining  $270\text{-}400 \text{ cm}^{-1}$  oralig‘iga to‘g‘ri keladi. Chastotaning  $550\text{-}670 \text{ cm}^{-1}$  diapazoni Nb-O valent modalariga bog‘langan, ular asosan kislorod atomlarining siljishlarini o‘z ichiga oladi; O-Nb-O egilgan modalari  $432 \text{ cm}^{-1}$  va undan quyi chastotalarda paydo bo‘ladi, shuning uchun o‘zgarish ko‘pincha Li-O cho‘zilgan modalari va O-Li-O egilgan modalari bilan kuchli bog‘liqligini ko‘rish mumkin.  $245 \text{ cm}^{-1}$  chastotada eng yuqori intensivlik asosan Nb-O bog‘ining deformatsiyasi bilan bog‘liqdir. Kombinatsion sochilish spektrlarining qiziq jihati shundaki, radiatsiya ta‘sirida namunalarning asosiy ( $250 \text{ cm}^{-1}$  va  $600 \text{ cm}^{-1}$ ) oraliqdagi cho‘qqilarida siljishlar kuzatilmadi. Lekin cho‘qqilarni intensivligi dozaga mos ravishda biroz tushdi.

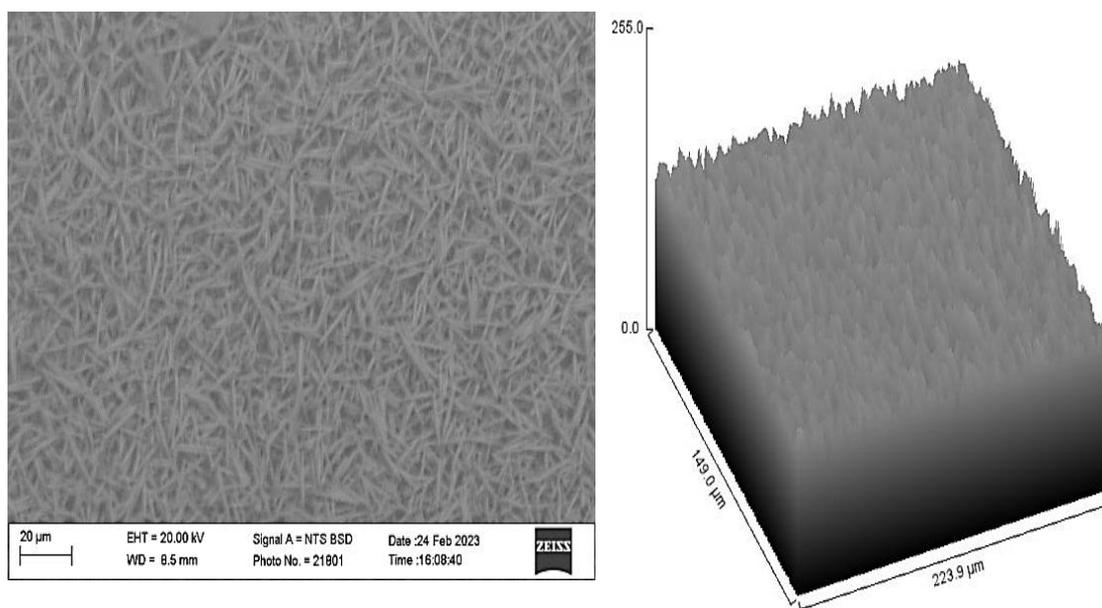
Spektrlardan ko‘rinib turibdiki,  $1300 \div 1600 \text{ cm}^{-1}$  oraliqda yuqori intensivligi  $1375 \text{ cm}^{-1}$  chastotaga to‘g‘ri keluvchi yangi cho‘qqilar paydo bo‘lmoqda, bu cho‘qqilarning intensivligi nurlanish dozasi ortishi bilan ortib bormoqda (5b-rasm). Bizning fikrimizcha bu cho‘qqilarning paydo bo‘lishi radiatsion nuqsonlardir va bu nuqsonlar  $\gamma$ -nurlanish ta‘sirida yuzaga keladigan kombinatsion sochilishga sezgir markazlar tufayli yuzaga keladi.

**“Yarimo‘tkazgich-segnetoelektrik tuzilmalarning optik va elektrooptik xossalarini tadqiq qilish”** deb nomlangan to‘rtinchi bobda yarimo‘tkazgich-segnetoelektrik tuzilmalarning morfologik, fotolyuminessensiya, yutilish spektrlari hamda  $\text{LiNbO}_3/\text{Si}$  va  $\text{LiNbO}_3/\text{ZnO}/\text{Si}$  geterotuzilmalarning volt-amper xarakteristikalari tadqiqot natijalari keltirilgan.

$\text{LiNbO}_3$  va  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$  tagliklarida past haroratlarda gidrotermal usulda o‘stirilgan  $\text{ZnO}$  nanotayoqchalaridan tashkil topgan yarimo‘tkazgich-segnetoelektrik tuzilmalarning ba’zi optik xossalariga to‘xtalib o‘tamiz.

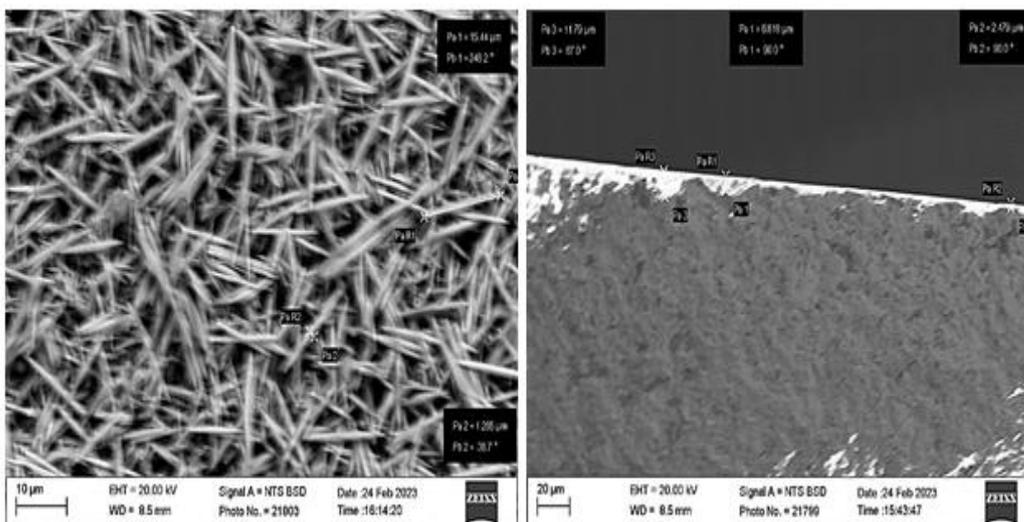
Hozirgi vaqtda yarimo‘tkazgich-segnetoelektrik tuzilmalar asosida radiofotonika va funksional mikroelektronika qurilmalarini yaratish imkoniyati mavjudligi tufayli tadqiqotchilarning e’tiborini tortib kelmoqda. Bundan tashqari, bu tuzilmalar asosida maydonli tranzistorlar yoki maydon bilan boshqariladigan fotorezistor qurilmalarini yaratishga imkon beradi. Rux oksid yupqa qatlamlari esa fizik parametrlarining ushbu tuzilma asosida ultrabinafsha, ko‘k, yashil va oq svetodilar, optik va gaz sensorlar, piezoelektrik sensorlar, shaffof kontaktlar va boshqalarni yaratish uchun xizmat qiladi.

Quyida yarimo‘tkazgich-segnetoelektrik tuzilmalarning SEM tasvirlari keltirilgan (6-rasm). Rux oksid nanotayoqchalari  $\text{LiNbO}_3$  va  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$  tagliklarga bir vaqt va ayni muhitda o‘stirilgani uchun tasvirlar deyarli bir xil. SEM tahlillaridan ko‘rinib turibdiki,  $\text{ZnO}$  nanotayoqchalarining uzunligi 10-20  $\mu\text{m}$  va diametrlari 1-3  $\mu\text{m}$  oraliqda joylashgan (7-rasm).



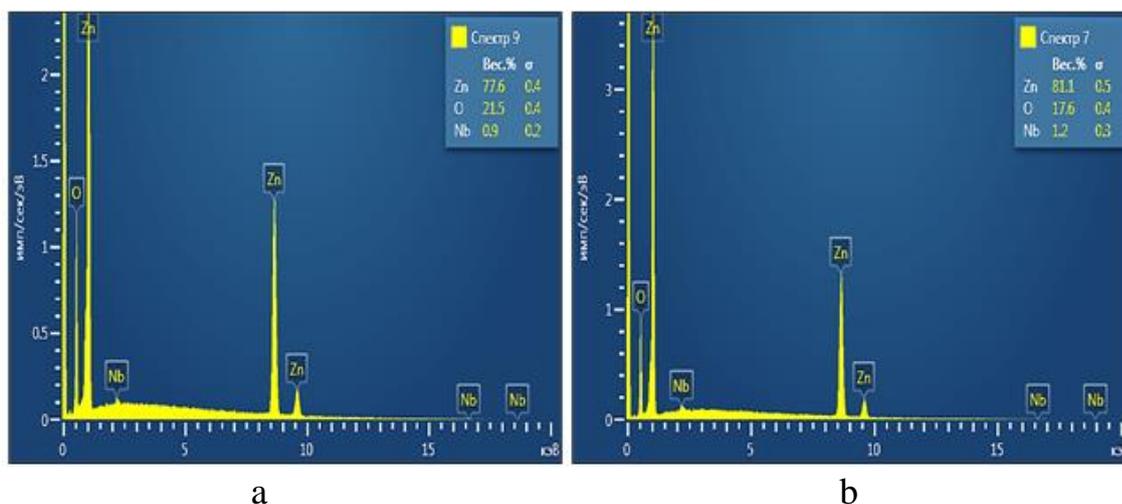
**6-rasm.**  $\text{ZnO}$  qatlamning sirtiy va hajmiy ko‘rinishi

$\text{ZnO}$  qatlamining qalinligini o‘lchash uchun namunalar nanotayoqcha o‘stirilgan sirtga nisbatan  $90^\circ$  burchak ostida joylashtirildi (7-rasm). Ko‘rinib turibdiki,  $\text{ZnO}$  qatlamning turli qismlaridan olingan qalinlik 2-12 mikron oralig‘ida. Qo‘yilgan vazifaga qarab, qatlam qalinligini o‘stirish vaqtida bog‘liq ravishda o‘zgartirish mumkin.



**7-rasm.** ZnO qatlarning qalinligi hamda nanotayoqchalarning chiziqli o'lchamlari

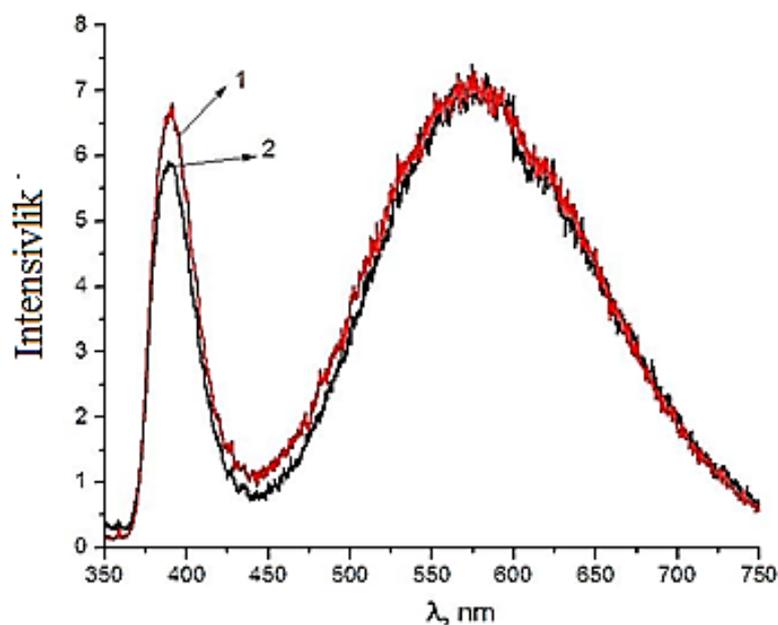
Har ikkala tuzilmalarda rux va kislorodning ulushi bir-biriga juda yaqin va niobiyni ham kam miqdordagi hissasini ko'rishimiz mumkin (8-rasm). Lekin ZnO-LiNbO<sub>3</sub>:Fe tuzilmada temir ionlarining ulushi ko'rinmadi. Buning sababi temir ionlarining ulushi qurilmaning o'lchash xatoligidan kichikligidadir.



**8-rasm.** Tarkibiy tahlil: a) ZnO-LiNbO<sub>3</sub>; b) ZnO-LiNbO<sub>3</sub>:Fe

Tadqiq qilinayotgan yarimo'tkazgich-segnetoelektrik tuzilmalarning fotoluminessensiya spektrlari keltirilgan (9-rasm). Tuzilmalarning har ikkala spektrida ultrabinafsha sohasida joylashgan tor intensivlikka ega polosalar mavjud bo'lib, bu intensivlikning maksimal qiymati 390 nm to'liq uzunligi yaqiniga to'g'ri keladi.

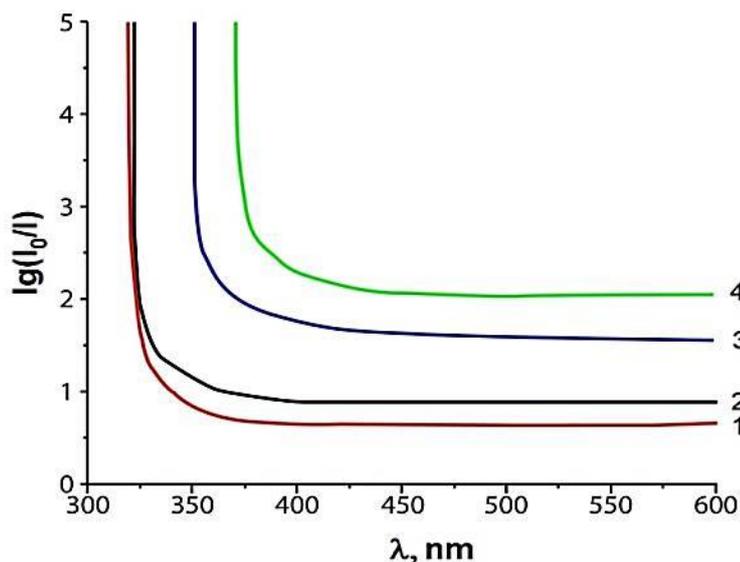
ZnO-LiNbO<sub>3</sub> tuzilmaning lyuminessensiya polosasi (9-rasm, 1-egri chiziq) bo'lib bu intensivlikning maksimal qiymati 387 nm to'liq uzunligiga va yarim kengligi 34 nm ga teng. ZnO-LiNbO<sub>3</sub>:Fe tuzilmaning lyuminessensiya polosasi esa (9-rasm, 2-egri chiziq) bo'lib bu intensivlikning maksimal qiymati 390 nm to'liq uzunligiga va yarim kengligi 32 nm ga teng.



**9-rasm.** Tuzilmalarning fotolyuminessensiya spektri: ZnO-LiNbO<sub>3</sub> (1); ZnO-LiNbO<sub>3</sub>:Fe (2)

LiNbO<sub>3</sub>:Fe tagligida o‘stirilgan ZnO nanotayoqchalari spektrining ultrabinafsha sohadagi polosa intensivligi LiNbO<sub>3</sub> tagligida o‘stirilgan ZnO nanotayoqchalari uchun fotolyuminessensiya spektrining intensivligidan 12% ga kamroq. Tor ultrabinafsha fotoluminessensiya polosalarining maksimal joylashuvi va ularning spektral yarim kengligi eksitonlar fotolyuminessensiyasiga o‘xshashligini ko‘rsatadi. Tadqiq qilinayotgan ikkala namunaning UB fotolyuminessensiya intensivligi o‘rtasidagi bunday nisbatni quyidagicha izohlash mumkin: UB spektral sohasida intensiv fotolyuminessensiya uchun javob beradigan jarayon ZnO qatlamining asosiy qismidagi eksitonlar rekombinatsiyasidir. UB fotolyuminessensiya sohasining 3 nm uzun to‘lqin tomon siljishi, segnetoelektrik tagliklarga gidrotermal usulda o‘stirilgan rux oksidi qatlamida kuzatilgan fotolyuminessensiya jarayonida mavjud bo‘lgan eksiton komplekslari va chuqur tuzoqlarning umumiy lyuminessensiya ta’siri bilan bog‘liq. Ko‘zga ko‘rinadigan sohadagi keng spektral chiziqlar tugunlararo joylashgan kislorodga tegishli bo‘lib, ZnO-LiNbO<sub>3</sub> va ZnO-LiNbO<sub>3</sub>:Fe tuzilmalar uchun deyarli bir xil ko‘rinishga ega va bu intensivlikning maksimal qiymati 562 nm to‘lqin uzunligiga to‘g‘ri keladi. Maksimal cho‘qqining yarim kengligi esa 154 nm ga tengdir.

Yarimo‘tkazgich-segnetoelektrik tuzilmalarning UB va spektrning ko‘zga ko‘rinadigan sohalarida optik xususiyatlarini tadqiq qilish uchun yutilish spektrlari tahlil qilindi. Yutilish spektrlari to‘lqin uzunligi 200 nm dan 900 nm gacha bo‘lgan intervalda tadqiq qilindi (10-rasm). Spektral chiziqlarning parallelligi 400 nm dan yaqin infraqizil sohagacha deyarli o‘zgarmaydi. Yutilish esa 400 nm dan boshlab tez o‘sa boshlaydi. Shuning uchun, rasmda 300 nm dan 600 nm gacha bo‘lgan oraliqda olingan. Taqqoslash uchun o‘lchashlar namunaning har ikkala tomonidan amalga oshirildi: ZnO qatlam tomonidan (1- va 4-chiziqlar) va taglik tomonidan (2- va 3-chiziqlar).



**10-rasm.** Tuzilmalarning yutilish spektri: ZnO-LiNbO<sub>3</sub> (1,2);  
ZnO-LiNbO<sub>3</sub>:Fe (3,4)

Spektrlardan ko‘rinib turibdiki, ZnO-LiNbO<sub>3</sub> tuzilmada ZnO qatlami tomondan olingan spektr taglik tomondan olingan spektrdan pastroqda joylashgan (10-rasm, 1-egri chiziq). Bu ZnO qatlamining yorug‘likni qaytarishi va sochishi bilan bog‘liq. Lekin ZnO-LiNbO<sub>3</sub>:Fe tuzilmada, aksincha, ZnO qatlamining spektri taglik tomondan olingan spektrga nisbatan yuqoriroqda joylashgan (10-rasm, 4-egri chiziq). Aytishimiz mumkinki, bu tuzilmada ishtirok etadigan Fe ionlarining ta‘siri bilan bog‘liq.

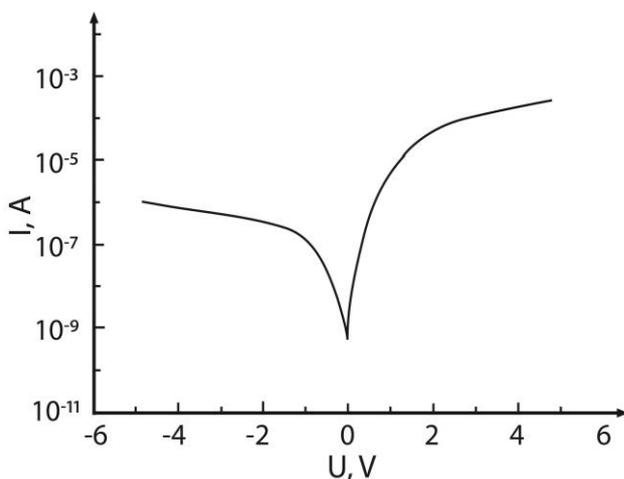
Endi yutilish spektrlaridan foydalangan holda yuqoridagi (6) va (9) formulalardan taqiqlangan soha kengligi va nur sindirish ko‘rsatkichlarini hisoblab chiqaylik. Olingan natijalar mos ravishda quydagicha: <sup>1</sup>E<sub>g</sub>=3,86; <sup>2</sup>E<sub>g</sub>=3,85; <sup>3</sup>E<sub>g</sub>=3,52; <sup>4</sup>E<sub>g</sub>=3,34 (eV) va n<sub>1</sub>=2,20; n<sub>2</sub>=2,21; n<sub>3</sub>=2,26; n<sub>4</sub>=2.30.

Shunday qilib, nur sindirish ko‘rsatkichi uchun (9) empirik formuladan foydalanish tajriba natijalari bilan deyarli bir xil ekanligini ko‘rsatib turibdi.

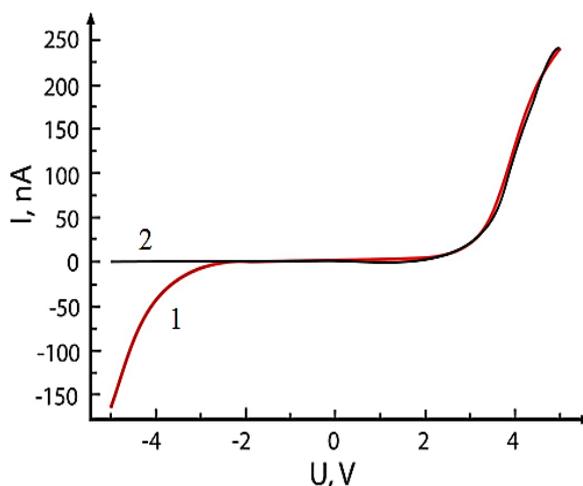
Niobat litiy yupqa plyonkalarining elektr o‘tkazuvchanligini tadqiq qilish uchun volt-amper xarakteristikalari usulidan foydalanilgan (11-rasm). Tokning kuchlanishga bog‘liqliklaridan kelib chiqqan holda, plyonkalarda elektr maydonining ma‘lum oraliqlariga mos keladigan turli o‘tkazuvchanlik mexanizmlari paydo bo‘lganligini kuzatishimiz mumkin.

Kuchlanishning -0,5÷0,5 V intervalida o‘tkazuvchanlikning omik mexanizmi ustunlik qiladi. Kuchlanish -5÷-2 V va 0,5÷5 V gacha bo‘lgan oraliqlarida esa fazoviy zaryad bilan cheklangan oqimlar mexanizmi o‘z ustunligini ko‘rsatadi. Qo‘yilgan kuchlanishning -2÷-0,5 V diapazoni o‘tish hududi sifatida belgilanadi, bu yerda dominant o‘tkazuvchanlik mexanizmi hali tadqiq qilinmagan.

Bundan tashqari, LiNbO<sub>3</sub>/ZnO/n-Si geterotuzilmalarning volt-amper xarakteristikalari yorug‘lik ta‘siridagi va yorug‘lik bo‘lmagandagi xolatlarida tadqiq qilindi (12-rasm).



**11-rasm.** LiNbO<sub>3</sub>/Si yupqa plyonkali geterotuzilma uchun volt-amper xarakteristika



**12-rasm.** Yorug'lik berilganida 1) va qorong'u 2) holatlaridagi LiNbO<sub>3</sub>/ZnO/n-Si geterotuzilmalarning volt-amper xarakteristikalari

O'lchashlar qorong'u xonada va oq yorug'lik intensivligi 30 mVt/sm<sup>2</sup> bo'lganida olib borilgan va bu o'lchashlar bizning tajribalarimizda fotosignallar xarakteristikalari uchun qo'llanilgan. Yorug'lik bo'lmagan holatda geteroo'tishlar, rasmda ko'rsatilganidek, yaxshi to'g'rilovchi xossalarni namoyish etadi. To'g'rilash koeffitsiyenti kuchlanishning -5÷5 V oralig'ida 80÷90 tartibida ekanligini ko'rsatadi. Yoritish sharoitlarida geteroo'tish toki teskari kuchlanishlar sohasida keskin oshganligini ko'rish mumkin, bunda to'g'ri tok deyarli o'zgarishsiz qoladi. Teskari kuchlanish 3 V bo'lganida tokning kuchayishi 5 atrofida tashkil etadi. Teskari kuchlanish ortishi bilan tok sekin asta oshib boradi. Teskari kuchlanish 5 V ga yetganida tok keskin tarzda 60 marta ortadi va yorug'lik bilan yoritilganida 160 nA qiymatga erishadi.

## XULOSA

1. Turli konsentratsiyali temir ionlari bilan legirlangan niobat litiy kristallarining maksimal difraksiya samaradorligi  $\lambda=630$  nm to'lqin uzunligi uchun  $\eta=31\%$ ,  $\lambda=440$  nm to'lqin uzunligi uchun esa  $\eta=34\%$  ekanligi hamda fotosergirlikning 3÷7 marta ortganligi aniqlangan.

2. LiNbO<sub>3</sub> va LiNbO<sub>3</sub>:Fe kristallarining fotorefraktiv sezgirliги kirishma atomlari konsentratsiyasi va nurlanish dozasi bog'liqligi hamda  $\gamma$ -nurlanish dozasi  $10^4 \div 10^7$  R oraliqda kristallarning fotorefraktiv sezgirliги deyarli 10 marta ortganligini va taqiqlangan soha kengligining qiymati 3,39 eV dan 3,04 eV gacha o'zgarishi aniqlangan.

3. Ilk bor  $\gamma$ -kvantlari bilan nurlantirilgan niobat litiy kristallarida  $1300 \div 1600$  sm<sup>-1</sup> oraliqda maksimal intensivligi  $1375$  sm<sup>-1</sup> chastotaga to'g'ri keluvchi nuqtasi aniqlangan.

4. ZnO-LiNbO<sub>3</sub>:Fe tuzilmalarining yutilish koeffitsiyenti ZnO-LiNbO<sub>3</sub> tuzilmalarining yutilish koeffitsiyentiga nisbatan 3 marta yuqori ekanligi aniqlangan.

5. ZnO-LiNbO<sub>3</sub> va ZnO-LiNbO<sub>3</sub>:Fe tuzilmalarning fotolyuminessensiya spektrlarida ultrabinafsha sohada ZnO-LiNbO<sub>3</sub> tuzilmaning intensivligi 12% ga ko'p ekanligi, yutilish spektrlarida esa ZnO-LiNbO<sub>3</sub>:Fe tuzilmaning ZnO qatlam tomonining spektr chiziqlari taglik spektr chiziqlaridan yuqorida joylashganligi aniqlangan.

6. Ilk bor yoritilmagan holatda LiNbO<sub>3</sub>/ZnO/Si geteroo'tishlarning to'g'rilash koeffitsiyenti 80÷90 oraliq'ida ekanligi hamda oq yorug'lik nuri bilan yoritilganda teskari tokning qiymati 3÷5 V oraliqda keskin ortganligi aniqlangan.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ  
УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОМ  
ИНСТИТУТЕ ФИЗИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ И  
МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ ПРИ НАЦИОНАЛЬНОМ  
УНИВЕРСИТЕТЕ УЗБЕКИСТАНА**

---

**НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ФИЗИКИ  
ПОЛУПРОВОДНИКОВ И МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ ПРИ  
НАЦИОНАЛЬНОМ УНИВЕРСИТЕТЕ УЗБЕКИСТАНА**

**ЙУЛДОШЕВ МУРОДЖОН АКБАРАЛИ УГЛИ**

**ОПТИЧЕСКИЕ И ГОЛОГРАФИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА  
ФОТОРЕФРАКТИВНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ОКСИДНЫХ  
КРИСТАЛЛОВ**

**01.04.10 – Физика полупроводников**

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

**Ташкент – 2024**

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за B2020.2.PhD/FM482.

Диссертация выполнена в научно-исследовательском институте физики полупроводников и микроэлектроники при Национальном Университете Узбекистана

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице Научного совета (isrpm.uz) и на Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» (www.ziyo.net.uz).

**Научный руководитель:**

**Азаматов Закиржан Тахирович**  
доктор физико-математических наук, профессор

**Официальные оппоненты:**

**Разинов Тахирджан Муталович**  
доктор физико-математических наук, профессор

**Юлдашев Шавкат Узгенович**  
доктор физико-математических наук, профессор

**Ведущая организация:**

**Ферганский политехнический институт**

Защита диссертации состоится «13» 06 2024 года в 12<sup>00</sup> часов на заседании Научного совета DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 по присуждению ученых степеней при Научно-исследовательском институте Физики полупроводников и микроэлектроники Национального университета Узбекистана (Адрес: 100057, Узбекистан, г. Ташкент, ул. Янги Алмазар, дом 20. Тел: (+99871) 248-79-94, факс (+99871) 248-79-92, e-mail: info@isrpm.uz).

С диссертацией можно ознакомиться в Отделе внедрения информационных технологий института (зарегистрирована за № 61) по адресу: 100057, Узбекистан, г. Ташкент, ул. Янги Алмазар, дом 20. Тел: (+99871) 248-79-59

Автореферат диссертации разослан «28» 05 2024 г.  
(реестр протокола рассылки № 61 от 28.05 2024 г.).



**Ш.Б. Утамурадова,**  
Председатель Научного совета  
по присуждению ученых степеней, д.ф.-м.н., профессор

**Ж.Ж. Хамдамов,**  
Ученый секретарь Научного совета  
по присуждению ученых степеней, PhD, с.н.с.

**Н.А. Тургунов**  
Председатель научного семинара  
при Научном совете по присуждению  
ученых степеней, д.ф.-м.н., доцент

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

**Актуальность и востребованность темы диссертации.** В мире проблема максимально эффективного хранения информации стоит особенно остро. В последние годы проводятся комплексные теоретические и практические исследования по созданию голографических накопителей большой емкости, записывающих информацию на различные носители. Следует отметить, что голографические методы позволяют записывать, хранить и восстанавливать волновые поля, трехмерные изображения и другие виды информации. Кристаллы ниобата лития, обладающие широкой запрещенной зоной, являются одним из перспективных материалов, используемых в области фотоники, квантовой электроники, оптоэлектроники и акустоэлектроники. Оптические свойства, такие как электрооптический, пьезоэлектрический, нелинейные эффекты, генерация второй гармоники и изменение показателя преломления под действием лазерного излучения, позволяют использовать кристаллы ниобата лития для записи голограмм. Кроме того, хотя был проведен ряд исследований влияния  $\gamma$ -облучения на оптические и фотоэлектрические свойства кристалла ниобата лития, не сделано однозначного вывода о его радиационных и точечных дефектах, а также механизмах образования центров окраски. Поэтому особое внимание уделяется исследованию влияния  $\gamma$ -излучения на оптические свойства кристалла ниобата лития.

Большое внимание уделяется синтезу различных наноразмерных структур, исследованию их физических свойств, созданию на их основе полевых транзисторов или управляемых электрическим полем фоторезисторных устройств в различных полупроводниково-сегнетоэлектрических структурах. Среди таких наноматериалов наноструктуры оксида цинка считаются перспективными материалами благодаря их уникальным электрооптическим свойствам. Синтез наноструктур ZnO с такими свойствами в сегнетоэлектрических материалах, особенно в подложках из ниобата лития, при низких температурах, природа специфических точечных дефектов в их кристаллической решетке и исследование оптических свойств наноструктур после синтеза является актуальной задачей.

В нашей республике большое внимание уделяется фундаментальным исследованиям в области материаловедения сосредоточенных на поиске новых типов полупроводниковых материалов различных областях и изучению свойств кристаллов известных материалов, в том числе, диэлектрических, пьезоэлектрических и сегнетоэлектрических. Направления этих фундаментальных и прикладных исследований имеют большое значение

для развития науки и наукоемкого производства в Узбекистане и отражены в Стратегии<sup>1</sup> развития нового Узбекистана на 2022–2026 гг.

Данное диссертационное исследование в определенной степени служит выполнению задач, предусмотренных в постановлении Президента Республики Узбекистан «О мерах по повышению качества образования и совершенствованию научных исследований в области физики» от 19 марта 2021 года № ПП-5032 и Постановлении Кабинета Министров Республики Узбекистан «О мерах по развитию альтернативной энергетики, электротехники и микроэлектроники, государственной поддержке повышения эффективности исследований в области физики полупроводников, а также о мерах по укреплению Научно-исследовательского института физики полупроводников и микроэлектроники при Национальном университете Узбекистана имени Мирзо Улугбека» от 12 октября 2021 года № 639.

**Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан.** Данное исследование выполнено в соответствии с приоритетными направлениями развития науки и технологий Республики Узбекистан: III. «Энергетика, энерго-и ресурсосбережение, транспорт, машиностроение и приборостроение; развитие современной микроэлектроники, фотоники, электронного приборостроения».

**Степень изученности проблемы.** На сегодняшний день оптические и голографические свойства фоторефрактивных кристаллов, а также оптические, фотоэлектрические, морфологические и другие физические свойства полупроводниково-сегнетоэлектрических структур исследуются в следующих научных центрах. Например, в Эйндховенском технологическом университете (Нидерланды), Центре наноэлектроники Университета Перлиса (Малайзия), Новом исследовательском центре Чешского университета (Чехия), Школе физики и математики Уханьского исследовательского университета (Китай), Физическом факультете Университета Павии (Италия), Французском центре научных исследований, Физическом факультете Университета Лихай (США), Институте науки и технологий Бельво (Люксембург). Ученые из Германии и Америки (Ч.Т. Мюллер, Е.В. Тейлор, и др.) изучали влияние  $\gamma$ -излучения на фоторефрактивные кристаллы и механизмы комбинационного рассеяния, а также широко исследовали электрооптические свойства полупроводниково-сегнетоэлектрических структур.

В Российском Институте химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В. Тананаева Кольского научного центра М.Н. Палатников, И.Н. Ефремов, Н.В. Сидоров и его учениками проводили всесторонние разработки и исследовали эффективный метод управления фоторефрактивными свойствами кристаллов ниобата лития и их конденсатов

---

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

посредством изменения молекулярной структуры материала. Кроме того, этой группой ученых разработана методика определения изменений структурных особенностей фоторефрактивных кристаллов, степени изменения их структуры и определения оптических свойств. Кыргызские ученые Акаев А.А., Джаманкызов Н.К., Жумалиев К.М. занимались проблемами теории и практики записи и хранения информации в виде излучения с использованием голографических методов.

Узбекскими учёными Хабибуллаевым П.К., Мирзаевым С.З., Азаматовым З.Т., Криворотовым В.Ф., Сабировым Л.М., Ахмеджановым Ф.Р., Семеновым Д.И. и др. проводились ряд исследований по изучению оптических и голографических свойств фоторефрактивных кристаллов, а также влияния  $\gamma$ -излучения на эти свойства. Однако полная количественная оценка влияния ионов железа и  $\gamma$ -излучения на оптические и голографические свойства кристаллов ниобата лития с широкой запрещенной зоной в настоящее время отсутствует. Кроме того, недостаточно исследованы процесс выращивания наностержней ZnO на подложках ниобата лития при низких температурах, а также морфологические и спектральные изменения наноструктур после выращивания.

**Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего образовательного или научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация.** Диссертационная работа выполнена в рамках программы научных исследований научно-исследовательского института физики полупроводников и микроэлектроники при Национальном университете Узбекистана по теме: «Исследование голографических процессов и механизмов хранения информации в полупроводниковых гетероструктурах, фоторефрактивных, фотохромных и фотополимерных материалах», и по гранту БФ-2-027 «Механизмы формирования наночастиц, исследование их нелинейно оптических свойств» в 2018–2020 гг.

**Целью исследования является** изучение процесса голографической записи в кристаллах широкозонных полупроводников  $\text{LiNbO}_3$ ,  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ , влияния  $\gamma$ -излучения на оптические свойства таких кристаллов и электрооптические свойства полупроводниково-сегнетоэлектрических структур.

**Задачи исследования:**

анализировать фоторефрактивные характеристики широкозонных кристаллов ниобата лития в зависимости от их стехиометрии, способа легирования и выращивания;

регистрировать изменения показателя преломления кристаллов ниобата лития, легированных ионами железа, анализировать особенности записи и считывания информации голографическим методом;

исследовать спектры оптического поглощения и комбинационного рассеяния необлученных и облученных различными дозами  $\gamma$ -излучения кристаллов  $\text{LiNbO}_3$ ,  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ ;

исследовать оптические свойства наностержней оксида цинка, выращенных гидротермальным методом на монокристаллических подложках  $\text{LiNbO}_3$  и  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ ;

получить тонкие пленки  $\text{LiNbO}_3$  на основе Si, исследовать вольт-амперные характеристики и морфологию гетероструктур  $\text{LiNbO}_3/\text{ZnO}/\text{Si}$ .

**Объектом исследования** являются номинально чистые и легированные ионами железа с различной концентрацией широкозонные кристаллы ниобата лития, а также структуры полупроводник-сегнетоэлектрик.

**Предметом исследования** являются физические механизмы хранения информации и голографической записи в кристаллах ниобата лития, влияние  $\gamma$ -квантов в различных дозах на оптические свойства кристалла ниобата лития и морфологию, спектры фотолюминесценции, спектр поглощения и вольт-амперные характеристики полупроводниково-сегнетоэлектрических структур.

**Методы исследований.** Для решения поставленных задач были использованы следующие методы: двухлучевой метод определения голографических свойств кристаллов, измерения спектров поглощения и комбинационного рассеяния на приборе UV-3600 (Shimadzu) и Ocean Optics QEPro, гидротермальный метод выращивания наностержней цинка на подложке ниобата лития, изучение морфологии и структурного анализа полупроводниково-сегнетоэлектрических структур методом сканирующей электронной микроскопии EVO MA10 (Carl Zeiss).

**Научная новизна** исследования заключается в следующем:

установлено, что дифракционная эффективность кристаллов ниобата лития составляет  $\eta=31\%$  для He-Ne-лазера и  $\eta=34\%$  для He-Cd-лазера, а фоточувствительность увеличивается в  $3\div 7$  раз в зависимости от концентрации ионов железа;

впервые определена зависимость фоторефрактивной чувствительности кристаллов  $\text{LiNbO}_3$  и  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$  от дозы  $\gamma$ -излучения ( $D < 10^8$  P) и изменение ширины запрещенной зоны от 3,39 эВ до 3,04 эВ;

впервые установлен максимум спектра, соответствующий диапазону  $1300\div 1600\text{ см}^{-1}$  в кристаллах ниобата лития, облученного  $\gamma$ -квантами;

обнаружено, что коэффициент поглощения в структурах  $\text{ZnO}-\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$  в 3 раза превышает коэффициент поглощения в структурах  $\text{ZnO}-\text{LiNbO}_3$ ;

впервые установлено, что коэффициент выпрямления гетеропереходов  $\text{LiNbO}_3/\text{ZnO}/\text{Si}$  в темновом состоянии находится в диапазоне  $80\div 90$ ;

впервые установлено, что величина обратного тока в гетероструктурах  $\text{LiNbO}_3/\text{ZnO}/\text{Si}$  при освещении белым светом резко возрастает в диапазоне  $3\div 5$  В.

**Практические результаты исследования** заключаются в следующем:

полученные в исследовании работе результаты по оптическим свойствам монокристаллов  $\text{LiNbO}_3$  и  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$  с различной концентрацией, способствуют более широкому развитию научных знаний и навыков о

физических процессах, происходящих под действием электромагнитного излучения;

двулучепреломление света в кристаллах  $\text{LiNbO}_3$  и  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$  различной концентрации, взаимное энергетическое взаимодействие обыкновенных и необыкновенных лучей, спекл-изображения используются для создания методики оценки структурного и оптического совершенства фоторефрактивных кристаллов и повышения плотности голографической информации.

**Достоверность результатов исследования** основана на использовании современных измерительных приборов, при исследовании морфологии, структурного анализа, фотолюминесценции, спектров поглощения и комбинационного рассеяния на кристаллах  $\text{LiNbO}_3$  и  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$  с различной концентрацией и полупроводниково-сегнетоэлектрических структур, они соответствуют результатам научных работ, опубликованным в авторитетных изданиях.

**Научная и практическая значимость результатов исследования.** Научная значимость результатов исследования заключается в получении новых знаний в области обработки и хранения информации, а также, что одним из основных факторов, определяющих фоторефрактивные свойства  $\text{LiNbO}_3$  и  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ , является  $\gamma$ -излучение, которое способствует расширению физических представлений об их оптических свойствах. свойствах полупроводниково-сегнетоэлектрических структур.

Практическая значимость результатов исследования заключается возможностью использования материалов из ниобата лития в качестве реверсивного элемента памяти, при создании материалов с высокой чувствительностью в определенном диапазоне доз  $\gamma$ -излучения в дозиметрии, при производстве полевых транзисторов и фоторезисторов на основе полупроводниково-сегнетоэлектрических структур.

#### **Внедрение результатов исследования.**

На основе изучения: механизма фоторефракции кристаллов  $\text{LiNbO}_3$  и  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$  при различных концентрациях Fe; влияния  $\gamma$ -излучения на оптические свойства этих кристаллов; морфологических, структурных и электрофизических свойств полупроводниково-сегнетоэлектрических структур:

получены научные результаты по изменениям обыкновенного и необыкновенного показателей преломления и нелинейно-оптических свойств кристаллов  $\text{LiNbO}_3$  и  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$  под воздействием лазерного и гамма-излучения использованы при выполнении в лаборатории «Теплофизика многофазных систем» Института ионно-плазменных и лазерных технологий имени У.А. Арифова Академии наук Республики Узбекистан фундаментальной бюджетной темы «Нелинейные явления, фазовые переходы и анизотропия упругих, фотоупругих и суперионных свойств в диэлектрических и сегнетоэлектрических кристаллах», для определения акустооптического коэффициента качества кристаллов ниобата лития

(справка №2/1255-1423 от 4 июля 2023 г. Академии наук Республики Узбекистан). Использование научных результатов позволило рассчитать углы дифракции при анизотропной дифракции света под действием акустических волн;

научные результаты, полученные в диссертационной работе о двулучепреломлении лазерных лучей в кристалле  $\text{LiNbO}_3$ , показателях преломления, коэффициентах поглощения и нелинейно-оптических свойствах этих кристаллов, использованы при выполнении международного проекта Uzb-Ind-96-2021 на тему «Параметрические взаимодействия фемтосекундных лазерных импульсов в нелинейных фотонных кристаллах для методов создания источников многоцветных сверхкоротких импульсов» на кафедре «Лазерные технологии и оптоэлектроника» Ташкентского государственного технического университета имени Ислама Каримова для определения дисперсионной и кубической нелинейностей, возникающих в процессе преобразования лазерного излучения в нелинейную оптическую частоту третьего порядка в нелинейных фотонных кристаллах (справка №4/17-4/4-2884 от 28 сентября 2023 г. Министерства высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан). Использование научных результатов позволило рассчитать эффективность процессов преобразования частоты и их взаимодействие с длительностью генерируемого импульса.

**Апробация результатов исследования.** Результаты диссертационной работы были представлены и обсуждены на 8 международных и 11 республиканских научно-практических конференциях.

**Публикации результатов исследований.** Основные результаты по теме диссертации опубликованы в 31 научных работах, 10 из них опубликованы в научных журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертационных работ, в том числе 5 статьи в зарубежных международных журналах.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы. Объем диссертационной работы, включая 50 рисунков, 7 таблиц, составляет 110 страниц текста.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**Во введении** приведены результаты исследований по теме диссертации, выполненных различными исследователями, дана широкая география лабораторий мира, занимающихся этими проблемами, обоснована актуальность и востребованность темы диссертации, определена связь исследований с приоритетными направлениями развития науки и технологий республики, раскрыта степень изученности проблемы, сформулированы цели и задачи, приведены объекты, предметы и методы исследования, изложена научная новизна и практическая значимость исследования, приведены

краткие сведения о внедрении результатов, апробации и публикациях работы, а также об объеме и структуре диссертации.

В первой главе **«Обзор литературы в области записи и хранения информации на сегнетоэлектриках»** подробно обсуждаются сегнетоэлектрические свойства, фазовые диаграммы, оптические, голографические и фоторефрактивные свойства кристалла ниобата лития, а также влияние  $\gamma$ -квантов и переходных элементов на эти свойства. Анализируется современное состояние исследований и новейшие научные достижения, определяются задачи, которые необходимо решить.

Кроме того, представлен литературный обзор оптических свойств полупроводниково-сегнетоэлектрических структур и перспективных материалов, созданных на их основе, и ряда научно-практических работ ученых мира и Узбекистана.

Во второй главе **«Методики получения монокристаллов ниобата лития, экспериментальные установки для исследования оптических и голографических свойств»** полностью раскрыта технология выращивания кристалла ниобата лития методом Чохральского. Описаны особенности технологии легирования кристалла ниобата лития переходными элементами.

Описаны теоретические и экспериментальные методы двухлучевой схемы при исследовании оптических и голографических свойств образцов.

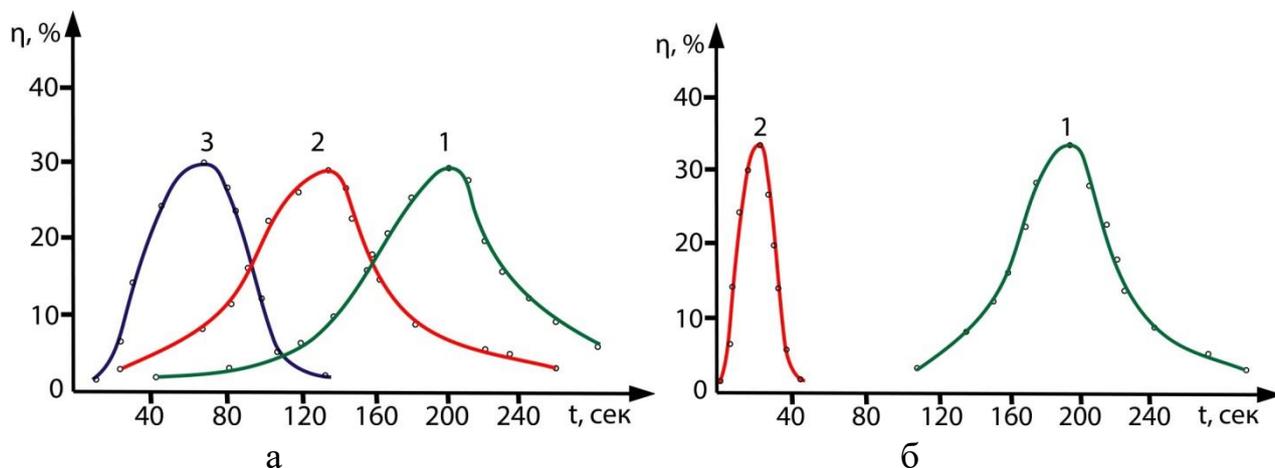
С целью изучения влияния  $\gamma$ -облучения на кристаллы  $\text{LiNbO}_3$  и  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$  различной концентрации описан метод измерения спектров поглощения с помощью двухлучевого спектрометра UV 3600, работающего в УФ и ИК спектре от 185 нм до 3300 нм. Приведены методы измерения комбинационного рассеяния на исследуемых образцах.

При изучении морфологических и структурно-аналитических характеристик полупроводниково-сегнетоэлектрических структур применялись методы измерения с помощью сканирующего электронного микроскопа (EVO MA10 Carl Zeiss).

В третьей главе **«Экспериментальное определение оптических и голографических свойств фоторефрактивных кристаллов»** представлены сведения об оптических и голографических свойствах кристаллов  $\text{LiNbO}_3$  и  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$  различной концентрации, влияние  $\gamma$ -излучения на эти свойства.

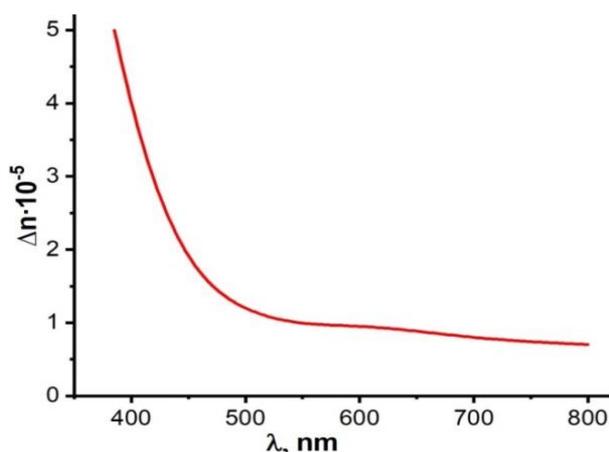
На рис.1 приведены экспериментальные исследования зависимости влияния различных концентраций ионов железа в  $\text{LiNbO}_3$  на дифракционную эффективность голограмм  $\eta$ , записанных гелий-неоновым лазером  $\lambda=630$  нм рис.1а и гелий-кадмиевым лазером  $\lambda=440$  нм рис.1б в виде плоского волнового фронта (образец 1-0,003вес.% Fe, образец 2-0,005вес.% Fe, образец 3-0,02вес.% Fe). Стирание производилось гелий-кадмиевым лазером ( $\lambda=440$  нм), так как кристаллы ниобата лития, легированные ионами железа, обладают большим поглощением в синем диапазоне спектра частот. С повышением концентраций ионов железа, как показано на рис.1 значительно увеличивается светочувствительность кристалла. Голограммы записывались на длине волны  $\lambda=440$  нм для двух образцов. Как видно из рис.1б

светочувствительность в образце 2 в 7 раз больше, чем в образце 1, и почти в 3 раз больше, чем в образце 1 при записи информации на  $\lambda=630$  нм рис. 1а. Для волны с длиной  $\lambda=630$  нм получена  $\eta=31\%$ , для длины волны  $\lambda=440$  нм  $\eta=34\%$ .



**Рис. 1.** Экспериментальные зависимости дифракционной эффективности голограмм от экспозиции: а)  $\lambda=630$  нм для образцов (1,2,3); б)  $\lambda=440$  нм для образцов (1,2,)

Полученные результаты показывают, что изменение показателя преломления кристалла  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$  значительно возрастает при длине волны ( $\lambda < 500$  нм) (рис. 2). Значения  $\Delta n_e$  во время записи информации могут изменяться от  $10^{-5}$  до  $5 \cdot 10^{-5}$ .

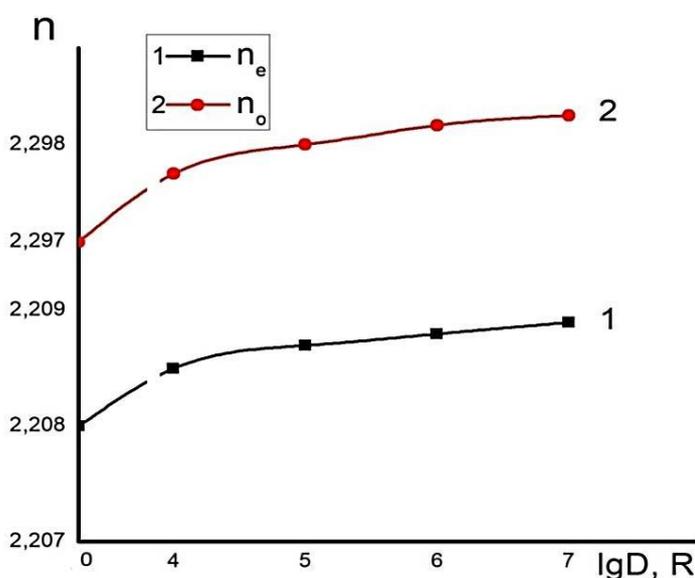


**Рис. 2.** Зависимость изменения показателя преломления в кристалле  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$  от длины волны

Известно, что использование переходных металлов в качестве легирующих добавок связано с их способностью обратимо отдавать d-электроны в зону проводимости под действием излучения. При легировании кристалла ионами  $\text{Fe}^{3+}$  поглощение света в нем вызывается ионизацией. Чувствительность к свету кристаллов, легированных железом, определяется концентрацией ионов  $\text{Fe}^{2+}$ . При фотовозбуждении  $\text{Fe}^{2+}$  отдает фотозлектрон в зону проводимости, который в процессе диффузии

захватывается ионом  $Fe^{3+}$  в неосвещенной области. Следовательно с ростом концентрации  $Fe^{2+}$  увеличивается поглощение на длине волны  $\lambda_3$ , на которой записывается информация, что повышает чувствительность кристалла к свету.

Облучение кристалла  $LiNbO_3$  частицами и фотонами высоких энергий ведет к образованию точечных и электронных дефектов, к примеру,  $\gamma$ -излучение может привести к окрашиванию кристаллов, увеличению фоторефракции и значительному изменению оптического поглощения. Легирование кристаллов может, существенно, изменять его оптико-голографические свойства, например, чувствительность к повреждению не только лазерным, но и  $\gamma$ -излучением. Изменения показателя преломления образца по отношению к обыкновенному ( $n_o$ ) и необыкновенному ( $n_e$ ) лучу показаны на рис. 3. Видно, что показатели преломления с увеличением дозы облучения нелинейно увеличиваются.



**Рис. 3.** Зависимости  $n_e$  и  $n_o$  от дозы  $\gamma$ -излучения для кристаллов  $LiNbO_3$

Результаты фоторефрактивной чувствительности под действием  $\gamma$ -облучения представлены в таблице 1. Как видно из приведенных результатов, облучение  $\gamma$ -квантами приводит к увеличению фоторефрактивной чувствительности исследуемых кристаллов. Наибольшее изменение в результате  $\gamma$ -облучения претерпевает легированный железом кристалл ниобата лития. Отметим, что, следуя принятому определению чувствительности, увеличение концентрации фоторефрактивных центров одной природы не должно было бы привести к возрастанию величины  $S = \Delta n / \Delta W$ , так как в этом случае наряду с увеличением  $\Delta n$  выросла бы и величина поглощенной энергии  $\Delta W$ .

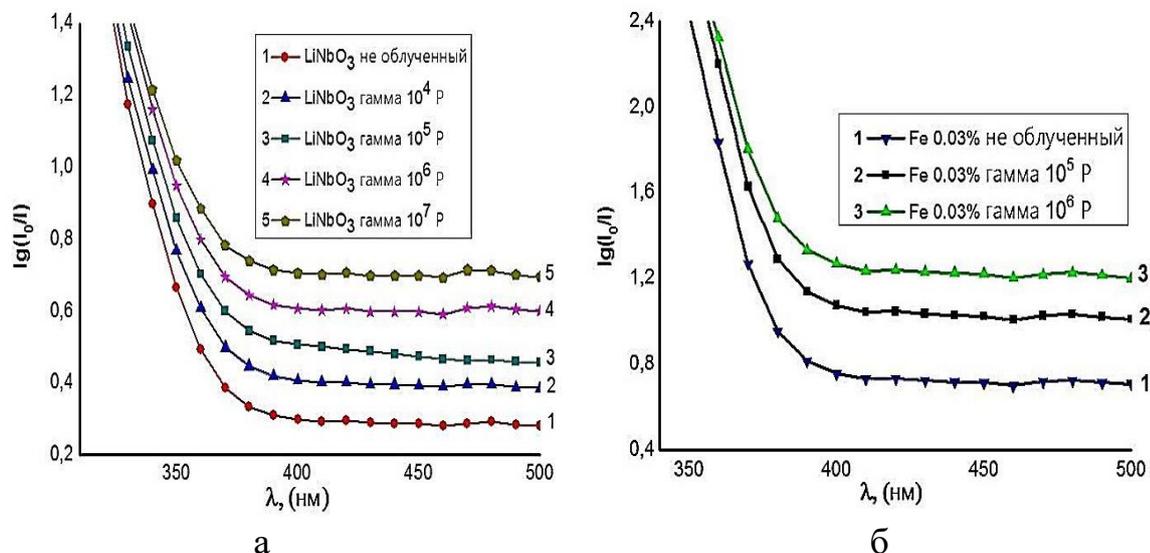
**Таблица 1**

Зависимость фоторефрактивной чувствительности кристаллов ниобата лития и  $LiNbO_3:Fe$  от дозы  $\gamma$ -облучения

Образец	Величина чувствительности, $Дж^{-1} \cdot см^2$ , при дозе облучения
---------	--

	не облучен	$10^4$ P	$10^5$ P	$10^6$ P	$10^7$ P
LiNbO <sub>3</sub>	3,9	9,3	12,2	19,5	36
LiNbO <sub>3</sub> :Fe	19	-	24,9	37,5	-

Для изучения свойств центров излучения и их влияния на фоторефракцию приведены результаты анализа спектров поглощения ниобата лития и кристаллов LiNbO<sub>3</sub>:Fe (рис. 4).



**Рис. 4.** Спектры поглощения необлученных и облученных  $\gamma$ -кристаллов: а) LiNbO<sub>3</sub>; б) LiNbO<sub>3</sub>:Fe

Анализ изменений в спектрах показывает, что поглощение, вызванное  $\gamma$ -облучением, привело к изменению спектров поглощения в кристаллах LiNbO<sub>3</sub> преимущественно в диапазоне 320-390 нм, а в легированных железом кристаллах в диапазоне 320-410 нм. Сдвиг спектров поглощения монокристаллов LiNbO<sub>3</sub> и LiNbO<sub>3</sub>:Fe в необлученном и облученном  $\gamma$ -квантами показывает, что граница спектра поглощения смещается в сторону видимого диапазона по мере увеличения дозы облучения. Этот сдвиг начинается при 370 нм для LiNbO<sub>3</sub> и 400 нм для LiNbO<sub>3</sub>:Fe.

Теперь проанализируем, количественно, сдвиг границы поглощения и увеличение оптического поглощения под действием  $\gamma$ -излучения. На основании закона Бера-Бургера-Ламберта интенсивность света, проходящего через среду, определяется по следующей формуле:

$$I = I_0 e^{-\alpha d} \quad (1)$$

где,  $I$ -интенсивность света, прошедшего через среду толщиной  $d$ ,  $I_0$ -интенсивность света, падающего на среду,  $\alpha$ -коэффициент поглощения.

Если из выражения 1 найти коэффициент поглощения  $\alpha$ , то получится следующее уравнение:

$$\alpha = \frac{1}{d} \cdot \ln \left( \frac{I_0}{I} \right) \quad (2)$$

Учитывая, что спектрометр регистрирует оптическую плотность ( $D$ ), получаем следующую формулу:

$$D = \lg \frac{I_0}{I} . \quad (3)$$

из которого получаем:

$$\frac{I_0}{I} = 10^D . \quad (4)$$

Подставив (4) в формулу (2), получим рабочую формулу:

$$\alpha = \frac{D}{d} \ln 10 . \quad (5)$$

В таблицах 2 и 3 ниже представлены изменения коэффициентов поглощения кристаллов  $\text{LiNbO}_3$  и  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$  под действием  $\gamma$ -излучения для ультрафиолетовой и видимой части спектров. Здесь  $\alpha_0$ -коэффициент поглощения необлученных образцов.

**Таблица 2**

Изменения коэффициентов поглощения в зависимости от дозы  $\gamma$ -облучения номинально чистых монокристаллов ниобата лития

$\text{LiNbO}_3$	не облучен	$10^4 \text{ P}$	$10^5 \text{ P}$	$10^6 \text{ P}$	$10^7 \text{ P}$
Ультрафиолетовая область					
$\alpha \text{ (мм}^{-1}\text{)}$	1,79	1,85	1,94	2,03	2,06
$((\alpha - \alpha_0) / \alpha_0) \cdot 100\%$		3	8	13	15
Видимая область					
$\alpha \text{ (мм}^{-1}\text{)}$	0,32	0,44	0,53	0,69	0,80
$((\alpha - \alpha_0) / \alpha_0) \cdot 100\%$		36	62	112	147

**Таблица 3**

Изменения коэффициентов поглощения в зависимости от дозы  $\gamma$ -облучения  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$

$\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$	не облучен	$10^5 \text{ P}$	$10^6 \text{ P}$
Ультрафиолетовая область			
$\alpha \text{ (мм}^{-1}\text{)}$	5,28	6,34	6,68
$((\alpha - \alpha_0) / \alpha_0) \cdot 100\%$		20	28
Видимая область			
$\alpha \text{ (мм}^{-1}\text{)}$	2,03	2,91	3,45
$((\alpha - \alpha_0) / \alpha_0) \cdot 100\%$		40	70

Измерения проводились при длинах волн 350 нм для ультрафиолетовых волн и 500 нм для видимого света. Как видно из таблиц, коэффициент поглощения для обоих секторов значительно увеличивается во всех образцах.

Определим показатель преломления, который является еще одной важной величиной. Показатель преломления определялся экспериментально (голографическим методом) и с использованием нескольких эмпирических формул, представленных зарубежными учеными. Для этого сначала найдем ширину запрещенной зоны ( $E_g$ ).  $E_g$  определяли с помощью метода определения края собственного поглощения. Результаты, полученные для кристаллов  $\text{LiNbO}_3$  и  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ , представлены ниже (табл. 4 и 5). Ширина запрещенной зоны определяется по следующей формуле:

$$E_g = \frac{hc}{\lambda} . \quad (6)$$

где,  $\lambda$ -длина волны, соответствующая пределу поглощения,  $h$ -постоянная планка,  $c$ -скорость света в вакууме.

**Таблица 4**

Изменения показателей преломления кристаллов  $\text{LiNbO}_3$  в зависимости от дозы облучения

$\text{LiNbO}_3$	$E_g$ (эВ)	$n$ (7)	$n$ (8)	$n$ (9)	$n$ , экс
не облучен	3,39	1,9462	2,2387	2,2922	2,2971
$10^4$ P	3,34	1,9772	2,2520	2,3018	2,3018
$10^5$ P	3,31	1,9958	2,2600	2,3076	2,3085
$10^6$ P	3,28	2,0144	2,2682	2,3135	2,3123
$10^7$ P	3,25	2,033	2,2765	2,3195	2,3182

**Таблица 5**

Изменения показателей преломления кристаллов  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$  в зависимости от дозы облучения

$\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$	$E_g$ (эВ)	$n$ (7)	$n$ (8)	$n$ (9)	$n$ , экс
не облучен	3,17	2,0826	2,2989	2,3356	2,3285
$10^5$ P	3,11	2,1198	2,3160	2,3479	2,3447
$10^6$ P	3,04	2,1632	2,3366	2,3626	2,3561

Первая эмпирическая формула была представлена группой индийских ученых *gavindra* и др. Ученые предложили различные соотношения между шириной запрещенной зоны и высокочастотным показателем преломления и представили линейную форму  $n$  как функцию  $E_g$ :

$$n = \alpha + \beta E_g. \quad (7)$$

где,  $\alpha=4,048$  и  $\beta=-0,62$  эВ<sup>-1</sup>.

Эрве и Вандамм, учитывая простоту физики преломления и рассеивания света, предложили следующее эмпирическое соотношение:

$$n = \sqrt{1 + \left(\frac{A}{E_g+B}\right)^2}. \quad (8)$$

где,  $A=13,6$  эВ и  $B=3,4$  эВ.

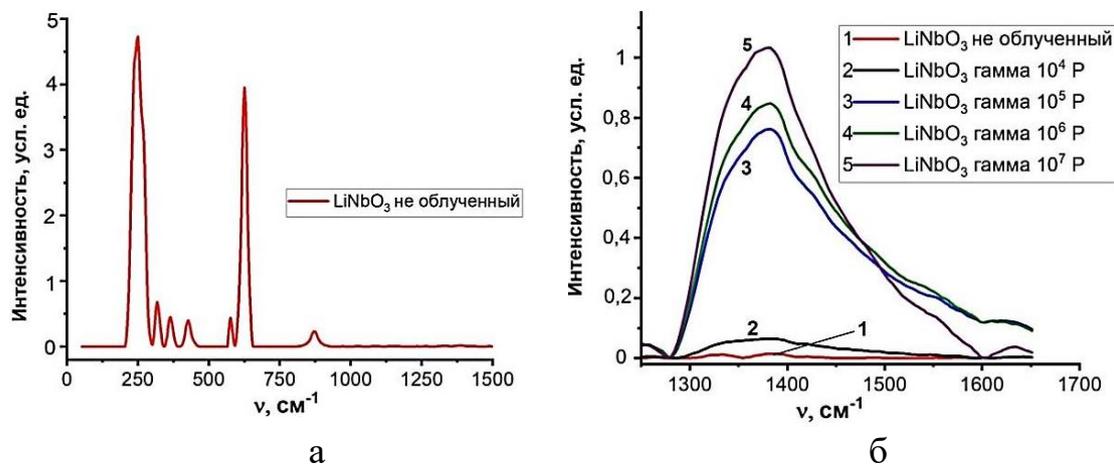
Рассмотрев зонную структуру и квантово-диэлектрическую формулировку Пенна и Ван Вехтена, Гош и др. по-иному подошли к проблеме. Приняв  $A$  как вклад валентных электронов,  $B$  как постоянную добавку к наименьшей запрещенной зоне  $E_g$ , получили выражение для высокочастотного показателя преломления:

$$n^2 - 1 = \frac{A}{(E_g+B)^2}. \quad (9)$$

где,  $A=25E_g+212$ ,  $B=0,21E_g+4,25$  и  $(E_g+B)$  относятся к соответствующей ширине запрещенной зоны материала. Таким образом, индийскими и

другими исследователями были предложены три эмпирической формулы для изменения  $n$  в зависимости от ширины запрещенной зоны –  $E_g$ .

Спектры комбинационного рассеяния монокристаллических образцов облученных и не облученных кристаллов  $\text{LiNbO}_3$  представлены на рис. 5. Основные пики при  $245 \text{ см}^{-1}$  и  $632 \text{ см}^{-1}$  принадлежат кристаллу  $\text{LiNbO}_3$ .



**Рис. 5.** Спектры Рамановского рассеяния света необлученного и облученного кристалла  $\text{LiNbO}_3$

Можно заметить, что смещения катионов  $\text{Li}$  влияют только на частоты в диапазоне  $270\text{--}400 \text{ см}^{-1}$ . Диапазон  $550\text{--}670 \text{ см}^{-1}$  отнесен к валентным модам  $\text{Nb}\text{--}\text{O}$ , включающим в основном сдвиги атомов кислорода; изгибные моды  $\text{O}\text{--}\text{Nb}\text{--}\text{O}$  появляются при  $432 \text{ см}^{-1}$  и ниже, таким образом, видно, что изменение часто сильно связаны и с валентными модами  $\text{Li}\text{--}\text{O}$ , и изгибными модами  $\text{O}\text{--}\text{Li}\text{--}\text{O}$ . Самая высокая интенсивность при частоте  $245 \text{ см}^{-1}$  связана в основном с деформацией  $\text{Nb}\text{--}\text{O}$ -каркаса. При снятии спектров Рамановского рассеяния с  $\gamma$ -облученных кристаллов, в низкочастотной части спектра пики на частотах  $250 \text{ см}^{-1}$  и  $600 \text{ см}^{-1}$  не меняются, а в высокочастотной части спектра при частоте  $1375 \text{ см}^{-1}$  проявляются пики, увеличивающиеся соответственно дозам  $\gamma$ -облучения.

Из спектров видно, что в интервале  $1300\text{--}1600 \text{ см}^{-1}$  при  $\gamma$ -облучении на частоте  $1375 \text{ см}^{-1}$  проявляются пики, высота которых растет с ростом дозы облучения (рис.5б). Появление пиков вызвано радиационными дефектами, очагами значительных изменений частот комбинационного рассеяния, которые возникают под воздействием  $\gamma$ -излучения, что в какой-то мере влияет на фоторефрактивные свойства  $\gamma$ -облученных кристаллов ниобата лития.

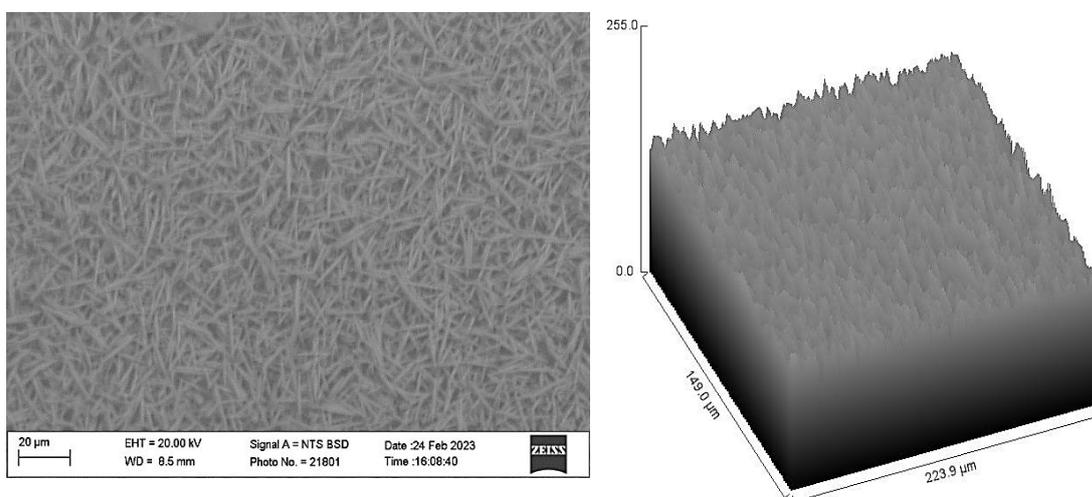
В четвертой главе «Исследование оптических и электрооптических свойств полупроводниково-сегнетоэлектрических структур» представлены морфология, фотолюминесцентные свойства, спектры поглощения полупроводниково-сегнетоэлектрических структур и вольт-амперные характеристики гетероструктур  $\text{LiNbO}_3/\text{Si}$  и  $\text{LiNbO}_3/\text{ZnO}/\text{Si}$ .

Остановимся на некоторых оптических свойствах полупроводниково-сегнетоэлектрических структур, состоящих из наностержней  $\text{ZnO}$ ,

выращенных гидротермальным способом, при низких температурах, на подложках  $\text{LiNbO}_3$  и  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ .

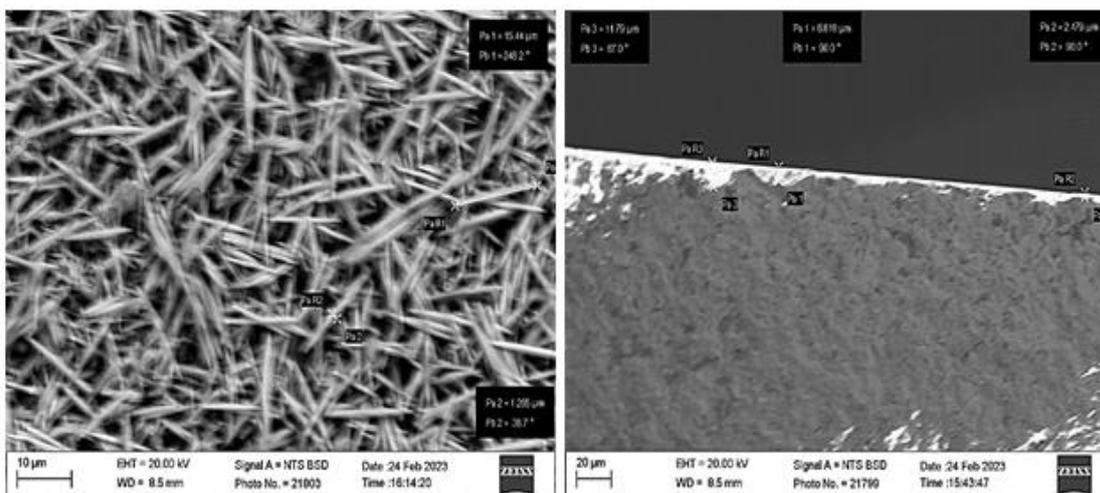
В настоящее время, возможность создания устройств радиофотоники и функциональной микроэлектроники на основе полупроводниково-сегнетоэлектрических структур, привлекает внимание исследователей. Кроме того, на основе этих структур возможно создание полевых транзисторов или полевых фоторезисторных устройств, тонкие слои оксида цинка служат для создания ультрафиолетовых, синих, зеленых и белых светодиодов, оптических и газовых датчиков, пьезоэлектрических датчиков, прозрачных контактов и т.д.

На рис. 6 представлены СЭМ-изображения полупроводниково-сегнетоэлектрических структур. Поскольку наностержни оксида цинка были выращены на подложках  $\text{LiNbO}_3$  и  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$  в одинаковых условиях то, изображения практически идентичны. СЭМ-анализ показывает, что длина наностержней  $\text{ZnO}$  составляет 10-20  $\mu\text{m}$ , а диаметр 1-3  $\mu\text{m}$  (рис. 7).



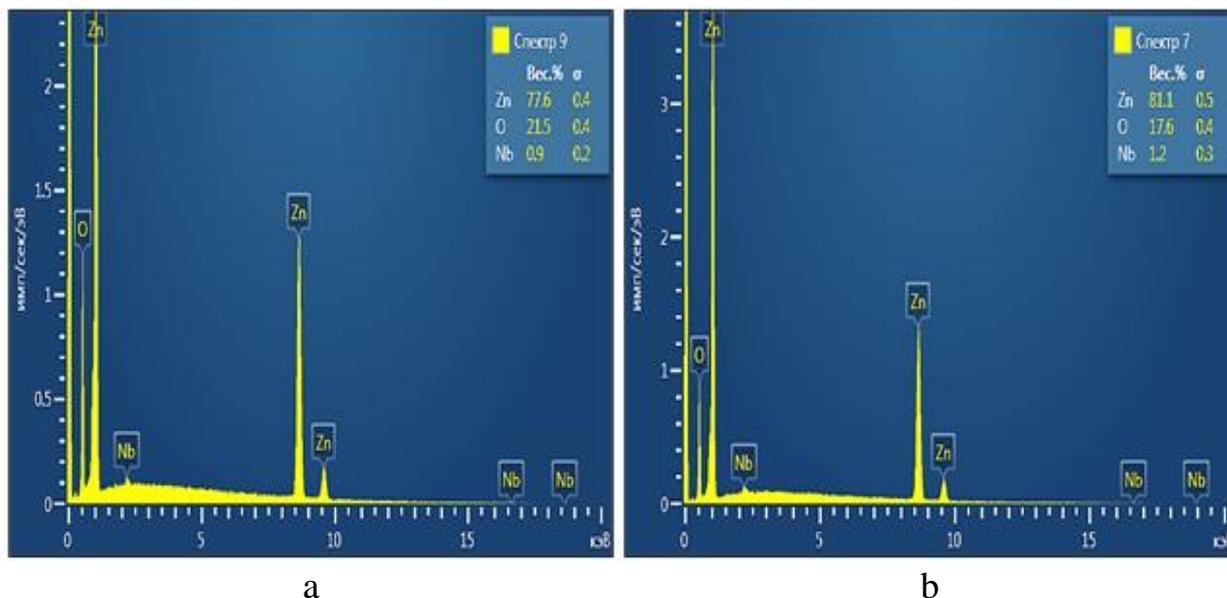
**Рис. 6.** Вид поверхности и объема слоя  $\text{ZnO}$

Для измерения толщины слоя наностержней в СЭМ, образец поворачивали на угол  $90^\circ$  к поверхности, выращенной структуры из  $\text{ZnO}$  (рис. 7). Видно, что толщины, в разных участках нанесенной слой, находятся в пределах 2-12 микрон. Отметим, что в зависимости от задачи толщину слою можно изменять во время её выращивания.



**Рис. 7.** Толщина слоя ZnO и линейные размеры наностержней

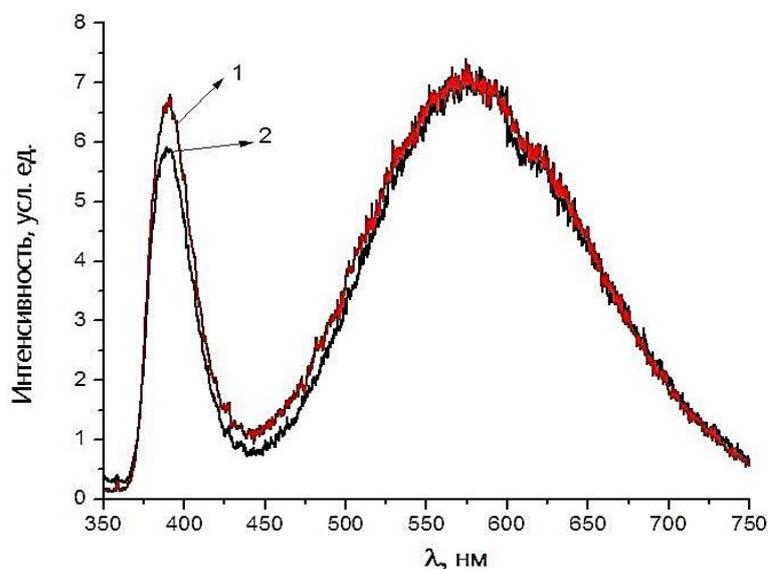
Как видно, из рис. 8 элементные анализ спектров показывает наличие и процентное содержание всех компонентов структур, но Fe прибор не видит, ввиду его низкого содержания, выходящий за пределы измерений прибора.



**Рис. 8.** Элементный анализ: а) ZnO-LiNbO<sub>3</sub>; б) ZnO-LiNbO<sub>3</sub>:Fe

Спектры фотолюминесценции, исследуемых структур, приведены на рис. 9. На обоих спектрах структур присутствует узкая интенсивная полоса люминесценции, находящаяся в УФ области, максимум которой приходится на окрестность длины волны—390 нм.

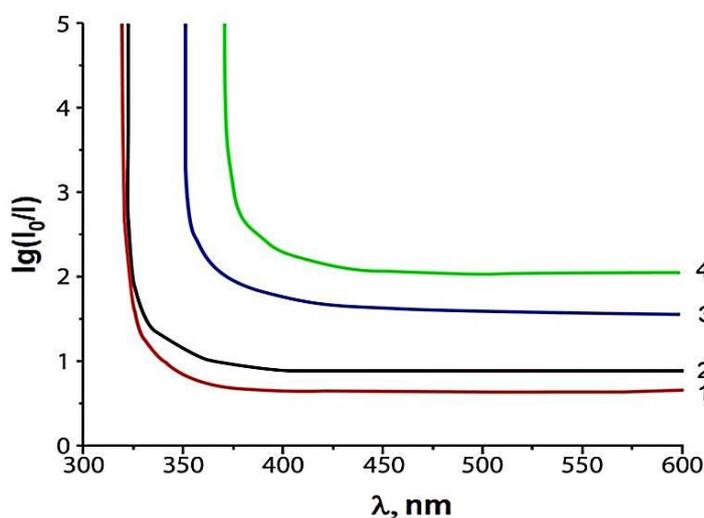
Максимум полосы люминесценции, соответствующей слою ZnO на поверхности LiNbO<sub>3</sub> (рис. 9, кривая 1), находится на длине волны 387 нм и имеет полуширину 34 нм. Максимум полосы люминесценции, соответствующий слою ZnO, на поверхности LiNbO<sub>3</sub>:Fe (рис. 9, кривая 2), находится на длине волны 390 нм и имеет полуширину 32 нм.



**Рис. 9.** Спектры фотолюминесценции структур: ZnO-LiNbO<sub>3</sub> (1); ZnO-LiNbO<sub>3</sub>:Fe (2)

Интенсивность УФ-полосы спектра наностержней ZnO, выращенных на подложке LiNbO<sub>3</sub>:Fe меньше на 12 %, чем интенсивность аналогичной полосы спектра фотолюминесценции для наностержней ZnO, выращенных на подложке из LiNbO<sub>3</sub>. Положение максимумов узких полос УФ фотолюминесценции и их спектральная полуширина позволяют предположить их сходство с экситонной полосой фотолюминесценции. Такое соотношение интенсивностей полос УФ фотолюминесценции двух исследуемых образцов может быть объяснено следующим образом: процессом, ответственным за интенсивную фотолюминесценцию в УФ диапазоне спектра, является рекомбинация экситонов в объеме слое ZnO. Сдвиг полосы УФ фотолюминесценции на 3 нм в сторону длинных длин волн может быть связан с тем, что наблюдаемая фотолюминесценция в слоя оксида цинка, гидротермально нанесенного на сегнетоэлектрические подложки, является суммарным эффектом люминесценции как экситонных комплексов, так и глубоких ловушек, присутствующих в объеме слое оксида цинка.

Для изучения оптических свойств полученных структур полупроводник-сегнетоэлектрик в УФ и видимом диапазонах спектра были проведены исследования спектров поглощения. Исследование спектров поглощения (рис.10) проводилось в диапазоне длин волн от 200 до 900 нм. Параллельность спектральных линий остается практически неизменной от 400 нм до ближней инфракрасной области. Поглощение начинает интенсивно возрастать с 400 нм. Поэтому на рисунке взят диапазон от коротковолнового диапазона до 600 нм. спектры поглощения снимались с обеих образцов – со стороны: ZnO (1,4) и подложек (2,3). Для сравнения были измерены спектры поглощения образцов с обеих сторон. Из спектров видно, что в структуре ZnO-LiNbO<sub>3</sub> спектр, снятый со стороны слоя ZnO, ниже, чем спектр, снятый со стороны основания (рис. 10, кривая 1). Это указывает на то, что слой ZnO



**Рис. 10.** Спектры поглощения структур: ZnO-LiNbO<sub>3</sub> (1,2); ZnO-LiNbO<sub>3</sub>:Fe (3,4)

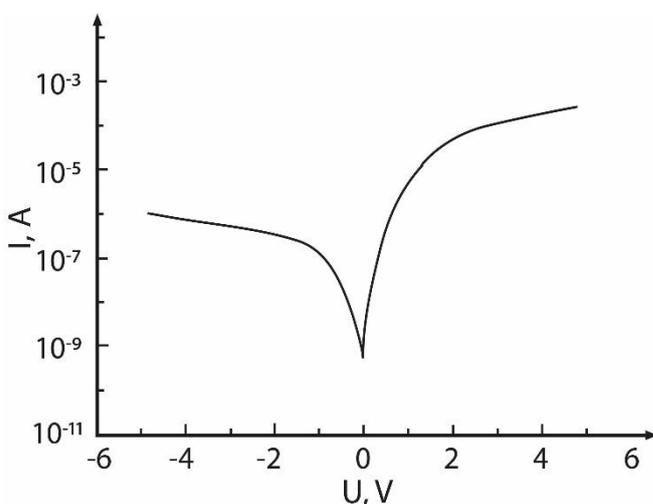
отражает свет. А вот в структуре ZnO-LiNbO<sub>3</sub>:Fe, наоборот, спектр слоя ZnO выше (рис. 10, кривая 4). Можно сказать, что это влияние ионов Fe, участвующих в структуре.

Используя спектры поглощения, были рассчитаны ширина запрещенной зоны и показатель преломления по формулам (6) и (9) выше. Получены следующие результаты:  $^1E_g=3,86$ ;  $^2E_g=3,85$ ;  $^3E_g=3,52$ ;  $^4E_g=3,34$  (eV) и  $n_1=2,20$ ;  $n_2=2,21$ ;  $n_3=2,26$ ;  $n_4=2,30$ .

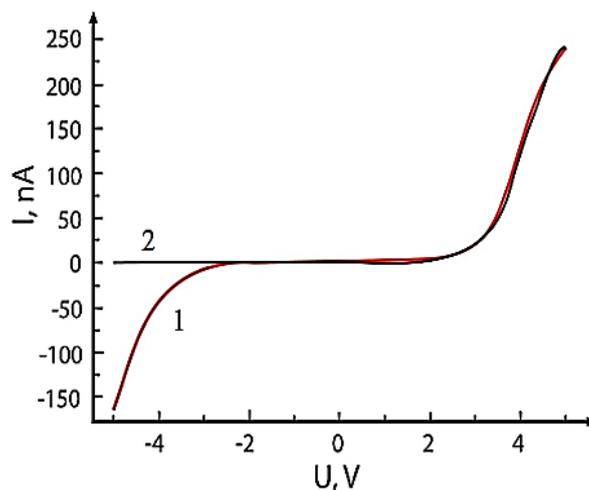
Таким образом, использование эмпирической формулы (9) для показателя преломления показывает, что он почти совпадает с экспериментальными результатами.

Методом вольт-амперных характеристик исследована электропроводность тонких пленок ниобата лития (рис. 11). По зависимости тока от напряжения можно наблюдать, что в пленках появились разные механизмы проводимости, соответствующие определенным интервалам электрического поля.

В диапазоне напряжений  $-0,5 \div 0,5$  В преобладает омический механизм проводимости. В диапазонах напряжений от  $-5 \div -2$  В и  $0,5 \div 5$  В механизм ограничения токов пространственным зарядом показывает свое превосходство. Диапазон приложенного напряжения  $-2 \div -0,5$  В определяется как переходная область, где механизм доминирующей проводимости еще не исследован.



**Рис. 11.** вольт-амперная характеристика тонкопленочной гетероструктуры LiNbO<sub>3</sub>/Si



**Рис. 12.** вольт-амперные характеристики гетероструктур LiNbO<sub>3</sub>/ZnO/n-Si в 1) светлом и 2) темном состоянии

Кроме того, были исследованы вольт-амперные характеристики гетероструктур LiNbO<sub>3</sub>/ZnO/n-Si под действием света и без света (рис. 12).

Измерения проводились в темной комнате при интенсивности белого света  $30 \text{ мВт/см}^2$ , и эти измерения использовались для определения характеристик фотосигналов в наших экспериментах. Из рис.12 видно, что в отсутствие света гетеропереходы проявляют хорошие выпрямляющие свойства. Поправочный коэффициент указывает, что напряжение находится в

пределах  $-5 \div 5$  В порядка  $80 \div 90$ . В условиях освещения видно, что ток гетероперехода резко возрастает в области обратных напряжений, в то время как прямой ток остается практически неизменным. При обратном напряжении 3 В коэффициент усиления по току составляет около 5. По мере увеличения обратного напряжения ток увеличивается медленно. Когда обратное напряжение достигает 5 В, ток резко возрастает в 60 раз и при освещении светом достигает значения 160 нА.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Установлено, что максимальная дифракционная эффективность кристаллов ниобата лития, легированных ионами железа в различной концентрации, составляет  $\eta=31\%$  при длине волны  $\lambda=630$  нм и  $\eta=34\%$  при длине волны  $\lambda=440$  нм, а их фоточувствительность увеличивается в  $3 \div 7$  раз.

2. Установлено, что фоторефрактивная чувствительность кристаллов  $\text{LiNbO}_3$  и  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$  зависит от концентрации атомов введенной примеси и дозы облучения, причем, в диапазоне доз  $\gamma$ -излучения  $10^4 \div 10^7$  Р, фоторефрактивная чувствительность кристаллов возрастает почти в 10 раз, а значение ширины запрещенной зоны изменяется от 3,39 эВ до 3,04 эВ.

3. Впервые установлен пик с максимальной интенсивностью в точке, соответствующей частоте  $1375 \text{ см}^{-1}$  в диапазоне  $1300 \div 1600 \text{ см}^{-1}$  в кристаллах ниобата лития, облученных  $\gamma$ -квантами.

4. Обнаружено, что коэффициент поглощения в структурах  $\text{ZnO-LiNbO}_3:\text{Fe}$  в 3 раза превышает коэффициент поглощения в структурах  $\text{ZnO-LiNbO}_3$ .

5. Установлено, что в структурах  $\text{ZnO-LiNbO}_3$  и  $\text{ZnO-LiNbO}_3:\text{Fe}$  интенсивность структуры  $\text{ZnO-LiNbO}_3$  в ультрафиолетовой области на 12 % выше, а в спектрах поглощения линии спектра со стороны слоя  $\text{ZnO}$  структуры  $\text{ZnO-LiNbO}_3:\text{Fe}$ , расположены над линиями спектра подложки.

6. Впервые установлено, что коэффициент выпрямления гетеропереходов  $\text{LiNbO}_3/\text{ZnO}/\text{Si}$  в неосвещенном состоянии находится в пределах  $80 \div 90$ , а величина обратного тока при освещении белым светом резко увеличивается в диапазон  $3 \div 5$  В.

**SCIENTIFIC COUNCIL DSc. 03/30.12.2019.FM/T.01.12 ON THE  
AWARDING ACADEMIC DEGREES AT THE INSTITUTE OF  
SEMICONDUCTOR PHYSICS AND MICROELECTRONICS AT THE  
NATIONAL UNIVERSITY OF UZBEKISTAN**

---

**INSTITUTE OF SEMICONDUCTOR PHYSICS AND  
MICROELECTRONICS AT THE NATIONAL UNIVERSITY OF  
UZBEKISTAN**

**YOLDOSHEV MURODJON AKBARALI OGLI**

**OPTICAL AND HOLOGRAPHIC PROPERTIES OF PHOTOREFRACTIVE  
SEMICONDUCTORS AND OXIDE CRYSTALS**

**01.04.10 - Physics of semiconductors**

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

**Tashkent – 2024**

The theme of the dissertation of the doctor of philosophy (PhD) on physical and mathematical sciences was registered by the Supreme Attestation Commission under the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under number B2020.2.PhD/FM482.

The dissertation was carried out at the Institute of Semiconductor Physics and Microelectronics at the National University 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.ispm.uz](http://www.ispm.uz) and on the website of "ZiyoNet" Information and Educational Portal at [www.ziynet.uz](http://www.ziynet.uz).

**Scientific supervisor:** **Azamatov Zakirjan Taxirovich**  
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

**Official opponents:** **Razikov Takhirdjan Mutalovich**  
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

**Yuldashev Shavkat Uzgenovich**  
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

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

The defense of the doctoral dissertation will be held on "13" 06 2024, at 12<sup>00</sup> at the meeting of the Scientific Council No. DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 at the Scientific Research Institute of Physics of Semiconductors and Microelectronics of the National University of Uzbekistan (Address: 20 Yangi Olmazor str., 100057 Tashkent city, Uzbekistan. Tel. (+99871) 248-79-94, fax: (+99871) 248-79-92, e-mail: [info@ispm.uz](mailto:info@ispm.uz))

The doctoral dissertation can be looked through in the ICT Implementation Unit (registered under No. 61). Address: 20 Yangi Olmazor str., 100057 Tashkent city, Uzbekistan. Tel.: (+99871) 248-79-59, e-mail: [info@ispm.uz](mailto:info@ispm.uz).

The abstract of the dissertation was distributed on 28 05 2024.  
(Registry record No. 61 dated "28" 05 2024)



**Sh.B. Utamuradova,**  
Chairwoman of the Scientific Council for the award of scientific degrees, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

**J.J. Khamdamov,**  
Scientific Secretary of the Scientific Council for the award of scientific degrees, PhD, Senior Researcher

**N.A. Turgunov,**  
Chairman of the Scientific Seminar at the Scientific Council for the Awarding of Academic Degrees, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Ass.Professor

## INTRODUCTION (abstract of the PhD dissertation)

**The aim of the research work** is to study the process of holographic recording in crystals of wide-gap semiconductors  $\text{LiNbO}_3$ ,  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ , the influence of  $\gamma$ -radiation on the optical properties of these crystals and the electro-optical properties of semiconductor-ferroelectric structures.

**The object of study** is nominally pure wide-gap lithium niobate crystals doped with iron ions of various concentrations, as well as semiconductor-ferroelectric structures.

**The scientific novelty of the research work** consists of the following:

it was found that the diffraction efficiency of lithium niobate crystals is  $\eta=31\%$  for a He-Ne laser and  $\eta=34\%$  for a He-Cd laser and photosensitivity increases 3÷7 times depending on the concentration of iron ions;

for the first time, the dependence of the photorefractive sensitivity of  $\text{LiNbO}_3$  and  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$  crystals on the dose of  $\gamma$ -radiation ( $D < 10^8$  R) and the change in the band gap from 3,39 eV to 3,04 eV were determined;

for the first time, the maximum of the spectrum has been established, corresponding to the range of 1300÷1600  $\text{cm}^{-1}$  in lithium niobate crystals irradiated with  $\gamma$ -quanta;

it was found that the absorption coefficient in  $\text{ZnO-LiNbO}_3:\text{Fe}$  structures is 3 times higher than the absorption coefficient in  $\text{ZnO-LiNbO}_3$  structures;

it was established for the first time that the rectification coefficient of  $\text{LiNbO}_3/\text{ZnO}/\text{Si}$  heterojunctions in the dark state is in the range of 80÷90;

it was discovered for the first time that the magnitude of the reverse current in  $\text{LiNbO}_3/\text{ZnO}/\text{Si}$  heterostructures when illuminated with white light increases sharply in the range of 3÷5 V.

**Implementation of the research results.**

Based on the study of: the mechanism of photorefraction of  $\text{LiNbO}_3$  and  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$  crystals at different Fe concentrations; the influence of  $\gamma$ -radiation on the optical properties of these crystals; morphological, structural and electrical properties of semiconductor-ferroelectric structures:

scientific results were obtained on the change in the ordinary and extraordinary refractive index and nonlinear optical properties of  $\text{LiNbO}_3$  and  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$  crystals under the influence of laser and gamma radiation; they were used in the laboratory “Thermophysics of multiphase systems” of the Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies named after U.A. Arifov of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan on the fundamental budget topic “Nonlinear phenomena, phase transitions and anisotropy of elastic, photoelastic and superionic properties in dielectric and ferroelectric crystals”, to determine the acousto-optic quality factor of lithium niobate crystals (certificate №2/1255-1423 dated July 4, 2023 Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan). The use of scientific results made it possible to calculate diffraction angles for anisotropic diffraction of light under the influence of acoustic waves;

scientific results obtained in the dissertation work on the birefringence of laser beams in a  $\text{LiNbO}_3$  crystal, refractive indices, absorption coefficients and

nonlinear optical properties of these crystals were used in the implementation of the international project Uzb-Ind-96-2021 on the topic “Parametric interactions of femtosecond laser pulses in nonlinear photonic crystals for methods of creating sources of multicolor ultrashort pulses” at the Department of Laser Technologies and Optoelectronics of the Tashkent State Technical University named after Islam Karimov is used to determine dispersive and cubic nonlinearities that arise in the process of converting laser radiation into a third-order nonlinear optical frequency in nonlinear photonic crystals (certificate №4/17-4/4-2884 dated September 28, 2023 of the Ministry of Higher Education, Science and Innovation of the Republic of Uzbekistan). The use of scientific results made it possible to calculate the efficiency of frequency conversion processes and their interaction with the duration of the generated pulse.

**The structure and scope of the dissertation.** The dissertation consists of an introduction, four chapters, annotations, a list of references, 50 figures, 7 tables, 110 pages of typewritten text.

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

**I bo'lim (I часть; part I)**

1. Z.T.Azamatov, Sh.B.Utamuradova, N.N.Bazabayev, M.A.Yuldoshev. Some properties of semiconductor-ferroelectric structures // East European Journal of Physics. 2023, №2, pp.187-190. (№3 Scopus, IF:0.8)
2. Sh.B.Utamuradova, Z.T.Azamatov, M.A.Yuldoshev, N.N.Bazabayev, A.B.Bahromov. Investigations of nonlinear optical properties of lithium niobate crystals // East European Journal of Physics. 2023, №4, pp.147-152. (№3 Scopus, IF:0.8)
3. Z.T.Azamatov, N.N.Bazabayev, M.A.Yuldoshev. Optical and holographic properties of a photorefractive crystal of lithium niobate doped with iron ions // European Science Review. 2022, №9-10, pp.39-43. (№5 GIF:1.44)
4. З.Т.Азаматов, Н.Н.Базарбаев, М.А.Йулдошев. Исследование влияния  $\gamma$ -облучения на оптические свойства ниобата лития методами оптического поглощения и Рамановского рассеяния // Сибирский физический журнал. 2022, Том 17, №4, с.95-102. (01.00.00; №14)
5. З.Т.Азаматов, Н.Н.Базарбаев, М.А.Йулдошев. Перспективы голографических систем хранения информации // ДАН РУз. 2022, №1, с.17-21. (01.00.00; №7)
6. З.Т.Азаматов, Н.Н.Базарбаев, М.А.Йулдошев. Исследование влияния гамма-излучения на оптические и голографические свойства кристаллов ниобата лития // ДАН РУз. 2022, №5, с.11-15. (01.00.00; №7)
7. З.Т.Азаматов, Н.Н.Базарбаев, М.А.Йулдошев. Исследование голографических характеристик фотохромных материалов // Физика полупроводников и микроэлектроника. 2021, том 3, вып. 6, с.45-49. (01.00.00; №16)
8. Sh.B.Utamuradova, Z.T.Azamatov, S.A.Muzafarova, M.A.Yo'ldoshev. Yarimo'tkazgich-segnetoelektrik tuzilmalarning elektrooptik xossalarni tadqiq qilish // Talqin va tadqiqotlar. 2023, №27, 20-28-b. (№43 UIF:8.2)
9. Z.T.Azamatov, M. A.Yuldoshev, V.A.Kim. Compact speckle interferometer for digital shearography // Semiconductor Physics and Microelectronics. 2019, Vol. 2, Issue 4, pp.41-46. (01.00.00; №16)
10. Sh.B.Utamuradova, Z.T.Azamatov, M.A.Yuldoshev. Optical Properties of ZnO-LiNbO<sub>3</sub> and ZnO-LiNbO<sub>3</sub>:Fe Structures // Russian Microelectronics. 2023, Vol. 52, Suppl. 1, pp. S99-S103. (№3 Scopus, IF:1)

**II bo'lim (II часть; part II)**

11. З.Т.Азаматов, Н.Н.Базарбаев, М.А.Йулдошев. Влияние гамма-облучения на оптические свойства кристаллов ниобата лития и LiNbO<sub>3</sub>:Fe // Известия вузов. Физика, 2023, Том 66, №2, с.106-112.
12. З.Т.Азаматов, М.А.Йулдошев, В.А.Ким. Компактный спекл-интерферометр для цифровой ширрографии // Международная конференция

«Современные тенденции развития физики полупроводников: достижения, проблемы и перспективы» НИИ ФПМ. 28 май 2020 г., с. 239-245.

13. З.Т.Азаматов, М.А.Йулдошев, И.А.Соловьев. Экспериментальные исследования записи фазовых голограмм в кристаллах ниобата лития с примесью железа ( $\text{LiNbO}_3\text{:Fe}$ ) // V Международная конференция «Оптические и фотоэлектрические явления в полупроводниковых микро-и наноструктурах». 13-14 ноябрь. 2020 г., с. 83-86.

14. З.Т.Азаматов, М.А.Йулдошев. Голографические характеристики реверсивных сред // Международная научная конференция «Наука и инновации». 26 ноябрь 2020., с. 201-204.

15. З.Т.Азаматов, М.А.Йулдошев. Голографические характеристики фазовых голограмм в кристаллах ниобата лития с примесью железа // XIV Материалы Республиканской конференции «Роль одаренной молодежи в развитии физики» НУУз. 2021 г., том1. с. 205-209.

16. З.Т.Азаматов, М.А.Йулдошев. Ограничения информационной емкости, связанные с движением носителя информации при записи и восстановлении голограмм в голографических запоминающих устройствах // «I Республиканская научная конференция молодых ученых и студентов-физиков» НИИ ФПМ. 21-22апрель 2021 г., с.151-152.

17. З.Т.Азаматов, М.А.Йулдошев. Голографические характеристики голограмм в кристаллах ниобата лития с примесью железа // Республиканская конференция «Физика полупроводников, микро- и наноэлектроника: перспективы интеграции науки, образования и промышленности» 21-май 2021., с.17-20.

18. З.Т.Азаматов, М.А.Йулдошев. Некоторые свойства кристалла  $\text{LiNbO}_3$  для записи информации // Республиканской конференции «фундаментально инновационные исследования в развитии физики и ее перспективы» 14- октября 2021 г., с. 6-8.

19. З.Т.Азаматов, М.А.Йулдошев. Исследование голографических характеристик фотохромных материалов // I международная конференция «Физика полупроводников, фундаментальные и практические проблемы микро-и наноэлектроники». 28-октября 2021 г., с. 50-52.

20. Z.T.Azamatov, M.A.Yo'ldoshev, K.S.Kayumova. Niobat litiy ( $\text{LiNbO}_3$ ) kristalining optik va golografik xususiyatlari // Respublika ilmiy-amaliy anjumani "Yarimo'tkazgichlar va polimerlar fizikasining dolzarb muammolari" 2022-yil 1- fevral., 248-250-b.

21. З.Т.Азаматов, Н.Н.Базарбаев, М.А.Йулдошев, М.О.Ашурмахмадова, К.С. Каюмова. Голографические системы хранения информации // XV Материалы Республиканской конференции «Роль одаренной молодежи в развитии физики» НУУз. 2022 г., с.73-75.

22. З.Т.Азаматов, М.А.Йулдошев, К.С.Каюмова. Уплотнение объема хранимой информации в голографических запоминающих устройствах // I Международная научная конференция «Научные основы использования

информационных технологий нового уровня и современные проблемы автоматизации» 25-26 апреля 2022 г., с. 134-136.

23. З.Т.Азаматов, М.А.Йулдошев, Н.Н.Базарбаев. Некоторые особенности записи фазовых голограмм на кристаллах  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$  // II Республиканская научная конференция «Молодых ученых и студентов-физиков» НИИ ФПМ. 20-21 май 2022 г., с. 121-124.

24. З.Т.Азаматов, Н.Н.Базарбаев, М.А.Йулдошев, М.О.Ашурмахмадова, К.С.Каюмова. Исследование фоторефрактивных кристаллов ниобата лития легированных ионами железа для голографического хранения информации // Республиканская научно-практическая конференция «Проблемы фотоники и перспективы развития» 27-28 май 2022 г., с. 13-16.

25. З.Т.Азаматов, М.А.Йулдошев, Н.Н.Базарбаев. Оптические и голографические свойства фоторефрактивных кристаллов ниобата лития // Международная научная конференция «Наука и инновации» 20-октября 2022 г., с. 323-324

26. З.Т.Азаматов, М.А.Йулдошев, Н.Н.Базарбаев. Влияние гамма-облучения на оптические и голографические свойства кристаллов ниобата лития и  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$  // Международный Форум «Физика-2022 посвященной обсуждению состояния и перспектив развития новых направлений физики в Ферганской долине» 4-5 октября 2022 г., с. 28-29.

27. З.Т.Азаматов, М.А.Йулдошев, Н.Н.Базарбаев. Об изменениях показателей преломления широкозонных полупроводников  $\text{LiNbO}_3$  и  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$  // II Международная научная конференция «Современные тенденции развития физики полупроводников: достижения, проблемы и перспективы» 27-28 декабря 2022 г., с. 358-360.

28. З.Т.Азаматов, М.А.Йулдошев, Н.Н.Базарбаев, А.Б. Бахромов. Оптические характеристики широкозонных полупроводников  $\text{LiNbO}_3$  и  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$  // Республиканская научно-практическая конференция «Физика полупроводников и современные проблемы устройств на их основе» 12-апреля 2023 г., с. 102-105.

29. Ш.Б.Утамурадова, З.Т.Азаматов, С.А.Музафарова, М.А.Йулдошев. Вольт-Амперные характеристики гетероструктур  $\text{LiNbO}_3/\text{Si}$  и  $\text{LiNbO}_3/\text{ZnO}/\text{n-Si}$  // XXXII Международная научно-практическая конференция «Фундаментальная и прикладная наука: состояние и тенденции развития» 12-июля 2023 г., с. 225-229.

30. З.Т.Азаматов, М.А.Йулдошев, Н.Н.Базарбаев. О воздействии  $\gamma$ -облучения на оптические свойства ниобата лития, исследованного методом рамановского рассеяния // «III Республиканская научная конференция молодых ученых и студентов-физиков» НИИ ФПМ. 15-июня 2023 г., с. 246-248.

31. Z.T.Azamatov, M.A.Yo'ldoshev, N.N.Bazarbayev, A.B.Baxromov. Yarimo'tkazgich-segnetoelektrik tuzilmalarning morfologiyasi // III Yosh olimlar va fizik talabalarning respublika ilmiy amaliy konferensiyasi. 2023-yil 15- iyun., 140-141-b.



Avtoreferat “Til va adabiyot ta’limi” jurnali tahririyatida tahrirdan o‘tkazildi va o‘zbek, rus va ingliz tillaridagi matnlarining mosligi tekshirildi (28.05.2024).

Bichim 60x841/16. Raqamli bosma usuli. Times garniturası.  
Shartli bosma tabog‘i: 3,25. Adadi 70 dona. Buyurtma №57.  
Guvohnoma reestr № 10-4434

Yarimo‘tkazgichlar fizikasi va mikroelektronika ilmiy-tadqiqot instituti bosmaxonasida chop etilgan.

Bosmaxona manzili: 100057, Toshkent sh., Yangi Olmazor ko‘chasi, 20-uy.

