

O'ZBEKISTON RESPUBLIKASI
OLIY VA O'RTA MAXSUS TA'LIM VAZIRLIGI
Z.M.BOBUR NOMIDAGI ANDIJON DAVLAT
UNIVERSITETI

Qo'lyozma huquqida

Ibragimova O'lmasxon

**Optik tolali lazerlar? Ularning kristallarning xossalariga
ta'sirini o'rganish**

5A140202- "Fizika (Lazer fizikasi)"

Magistr

akademik darajasini olish uchun yozilgan

DISSERTATSIYA

Ilmiy rahbar: f-m.f.n., dots. M.Nosirov

Andijon-2014

KIRISH

Mavzuning dolzarbligi: Ma'lumki, lazerlar moddalarning xossalarini, ularning optik xususiyatlarini aniqlashda muhim ahamiyatga ega. Hozirgi kunda, turli monoxramatik nurli lazerlar yaratilgan bo'lib, ular optoelektronika va fotoelektronikaning rivojlanishiga katta xissa qo'shib kelmoqda. Keyingi yillarda nafaqat mikro- balki, nanoo'lchamli tuzilmalar asosida nanofotonika ham jadal sur'atlarda rivojlanmoqda. Mikro- va nano- o'lchamli kristallarni o'rganishda lazer nurining dastasi nanometrik o'lchamda bo'lishi talab etiladi. Bunday lazerlar optik tolali lazerlar bo'lib, ularning ishlash va qo'llanilish sohalari to'la hal qilinmagan muammolardan biri hisoblanadi. Bundan tashqari, ular yordamida kristallarning xossalari yetarli darajada o'rganilmagan. Bu muammolarni hal qilish jarayonida, olib borilgan izlanishlar natijasida kutilayotgan yangi ma'lumotlar mikro- va nanotuzilmali yarimo'tkazgichlarning xossalarini o'rganishda muhim ahamiyatga ega.

Muammoning o'rganilganlik darajasi: Hozirgi kunda lazerlar texnologiyasi, fizikasi, ularning qo'llanilishi keng o'rganilib kelinayotgan sohalardan biri hisoblanadi. Bunday tadqiqotlarni olib boorish, ular yordamida mikro va nanoo'lchamdagi yarimo'tkazgichlarning xossalarini aniqlash, ulardan samarali foydalanish usullarini ishlab chiqish zamonaviy nanofizika, nanoelektronika, nanotexnologiyalar rivojlanishidagi asosiy omillardan biri hisoblanadi.

Dissertatsiya ishida hal qilingan metodlar mikro- va nanoo'lchamli yarimo'tkazgichlarning xossalarini o'rganishda, olingan natijalar bunday tuzilmalar haqida ilmiy tasavvurlarni boyitishda muhim ahamiyatga ega.

Tadqiqot maqsadi va vazifalari: Mazkur dissertatsiya ishida, optik tolali lazerlarning ishlash va qo'llanilish sohalari, ular yordamida mikro- va nanotuzilmali yarimo'tkazgichlarning xossalarini o'rganish ishning asosiy maqsadi qilib olindi.

Ishda oldinga qo'yilgan maqsadga erishish uchun quyidagi vazifalarni hal qilish zarur deb topildi:

- lazerlar, ularning tuzilishi va ishlash prinsipini o'rganish;
- optik tolali lazerlar tayyorlash hamda uni mikro- va nanotuzilmali yarimo'tkazgichlarning xossalariga ta'sirini o'rganish. Olingan natijalar asosida takliflar kiritish.

Tadqiqot ob'ekti va predmeti: Dissertatsiya ishining tadqiqot ob'ekti lazerlar, optik tolalar va mikro- va nanotuzilmali.

Tadqiqot metodlari va farazi: Dissertatsiya ishining metod va gipotezasi:

- optik tolali lazerlar tayyorlash;
- mikro- va nanotuzilmali yarimo'tkazgichlarning optik xossalarini hamda ularda namoyon bo'luvchi jarayonlarni o'rganishdan iborat.

Himoyaga olib chiqiladigan asosiy holatlar:

1. Mikro- va nano'lchamli yarimo'tkazgichlar tuzilishini o'rganishning optik metodlari. Bunday tuzilmalar tuzilishi jihatidan polikristal xususiyatga ega bo'lib, mikro- yoki nanokristalchalar va ularni ajratib turuvchi chegaraviy sohalardan iborat. Kristal panjaradagi atomlarning notekis taqsimlanishi ularning sirti va oraliq'ida chegaraviy sohalarning hosil bo'lishiga olib keladi.

2. Optik tolalar, mikro- va nano'lchamli yarimo'tkazgich xossalarini o'rganishda optik tolali metodlarning o'rni. Optik tolalarning diametrini o'zgartirish mumkinligi polikristal xususiyatga ega bo'lgan nafaqat mikro- va nanotuzilma kristalchalarini balki ular o'rtasidagi chegaraviy sohalarni o'rganish imkinini beradi.

3. Mikro- va nanoo'lchamli yarimo'tkazgichlarning xossalari temperatura o'zgarishiga sezgir bo'lib, ularning sirlari ma'lum bir monoxromatik lazer nurlari bilan yoritilganda kristalchalar va o'rtasidagi chegaraviy sohalar elektro'tkazuvchanligi bir-biridan farq qiladi. Kristalchalar o'tkazuvchanligi ular

o'rtasidagi chegaraviy sohalaridan yuqori bo'ladi. Bu chegara sohalaridagi notekis taqsimlangan kirishmali holatlarga bog'liq.

Ishning ilmiy yangiligi:

1. Mikro- va nanoo'lchamli yarimo'tkazgichlar tuzilishi jihatidan kristalcha va ular o'rtasidagi chegara sohalaridan iborat. Kristal panjaradagi atomlarning notekis taqsimlanishi ularning sirti va oralig'ida chegaraviy sohalarining hosil bo'lishiga olib keladi.

2. Mikro- va nano'lchamli yarimo'tkazgich xossalarini o'rganishda optik tolalardan foydalanish metodi o'rganildi. Optik tolalarning diametrini o'zgartirilishi polikristal xususiyatga ega bo'lgan mikro- va nanotuzilma kristalchalarini hamda ular o'rtasidagi chegaraviy sohalarini o'rganish imkinini beradi.

3. Temperatura ortib borishi bilan donadorliklararo chegara sohadagi kirishmali holatlarda elektron-kovak juftliklarning xosil bo'lishi fototfokning ortishiga olib keladi.

Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati: Dissertatsiya ishida qo'llanilgan metodlar mikro- va nanotuzilmali yarimo'tkazgichlar-ning optik xossalarini o'rganishda, ularda yuz beruvchi jarayonlarni tushuntirishda muhim ahamiyatga ega. Bundan tashqari, moddalarning xossalarini o'rganish uchun ishlab chiqiladigan optik tolali lazerlar metodi o'quv jarayonida xususan fizik mutaxassislar tayyorlashda, ularga mikro- va nanotuzilmalarning xossalari, ularda yuz beruvchi jarayonlarni o'rgatishda katta ahamiyatga ega.

Natijalarning e'lon qilinganligi. Dissertatsiya ishida olingan natijalar va ularning muhokamasi nashr qilingan maqolalarda o'z aksini topgan. Dissertatsiya mavzusi bo'yicha davriy jurnallarda maqolalar, Respublika miqyosidagi davriy ilmiy jurnallarda 2 ta maqola nashr qilingan, shuningdek, Evrika to'garagida muhokama etilgan.

Ishning tuzilishi va hajmi: Dissertatsiya kirish, uchta asosiy bob va umumiy xulosadan iborat bo‘lib, hajmi: 69 betni tashkil qiladi. Shundan: 200 bet matn, 16 ta rasm, 1 ta jadval va 59 ta foydalanilgan adabiyotlar ro‘yxatidan iborat.

Muammoni hal etilishida muallifning hissasi. Dissertatsiya mavzusi, unda keltirilgan natijalar, himoyaga tavsiya etilgan holatlar, ishning ilmiy yangiligi, umumiy xulosalar ilmiy rahbarning bevosita ilmiy maslahatlari yordamida bajarilgan.

I bob MAVZUGA OID ADABIYOTLAR TAXLILI

1.1. Lazerlar, ularning fizik xususiyatlari

1939 yilda V.A.Fabrikant birinchi marta yorulikni kuchaytiradigan muxit hosil qilish mumkinligini va shu muxitda nur majburiy nurlanish xisobiga kuchaytirilishi g'oyasini olg'a surdi. 1953 yilda I.G.Basov bilan A.M.Proxorovlar, AQSH dan Ch.Tauns bilan Veberlar tomonidan santimetr to'lqin uzunligidagi elektromagnit to'lqinlarni kuchaytiradigan molekulyar generatorlar yasaldi, bu generatorlar mazerlar deb ataladi. 1960 yilda esa T. Meyman tomonidan qattiq jismli, optik diapazonida ($\lambda = 6943 \text{ \AA}$) ishlaydigan optik generator yasaldi. Bunday generatorlarni lazerlar deb ataladi. Nurni kuchaytiradigan aktiv muxitning tipiga qarab lazerlar - qattiq jismli, gazli, yarimo'tkazgichli va suyuqlikli lazerlarga bo'linadi.

Yanada aniqroq aytganda lazerlarning turlarini sinflashda majburiy yig'ish usuli ham muxim rol o'ynaydi. Majburiy yig'ish usullari - optik, issiqlik, kimyoviy, elektroionizasion va boshqa usullardan iborat bo'ladi.

Bundan tashqari generatsiyalash turi uzluksiz yoki impulsli bo'lishi mumkin.

Lazerlar uchta asosiy qismdan iborat bo'ladi:

- 1) Aktiv muxit - metastabil holatga ega bo'lgan modda.
- 2) Majburiy yig'ish (optik nakachka) sistemasi - aktiv muxitda inversiyali joylashish holatini hosil qiladigan qurilmalar. Inversiyali joylashish holati deb asosiy holatdagi atomlar soniga nisbatan uyg'ongan holatdagi atomlar sonining ko'p bo'lishiga aytiladi.
- 3) Optik rezonator - lazer nurlanishini shakllantiruvchi qurilma.

Muxitga tushgan ω chastotali nur, modda atomlaridan birining $\omega = (E_n - E_m)/\hbar$ chastotasiga mos kelsa, bu holda atom $E_m \rightarrow E_n$ xolatga o'tsa, bu majburiy o'tishda u nurni yutadi. ($E_n > E_m$), agar $E_n \rightarrow E_m$ o'tish sodir bo'lsa, u holda tushayotgan nurning intensivligi muxitdan o'tishda kuchayadi.

Muxit orqali o'tgan nurning intensivligi Buger qonuniga asosan aniqlanadi:

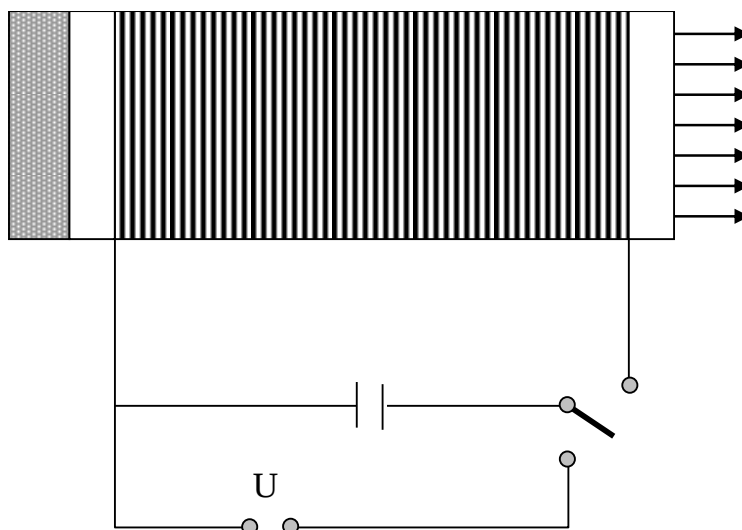
$$I = I_0 E^{-\mu X}$$

bunda, $\mu > 0$ bo'lsa, nur muxitda yutiladi, $\mu < 0$ bo'lsa, nur muxitdan o'tishda kuchayadi. Kvant generatorida $\mu < 0$ xolat vujudga keltiriladi. T.Meyman yasagan birinchi qattiq jismlı muxitga ega bo'lgan lazer bilan tanishaylik.

Kuchaytirgich sifatida alyuminiy oksidi Al_2O_3 olingan bo'lib (rubin yoki qizil yoqut) kristall panjarasining ba'zi tugunlarida uch valentli Cr^{3+} (0,005%-xrom) joylashgan

Bu qizil yoqutning uzunligi 5 sm, diametri esa 1 sm bo'lgan sterjen ko'rinishidadir. Uning asoslari o'zaro parallel va juda yaxshi silliqilgan.

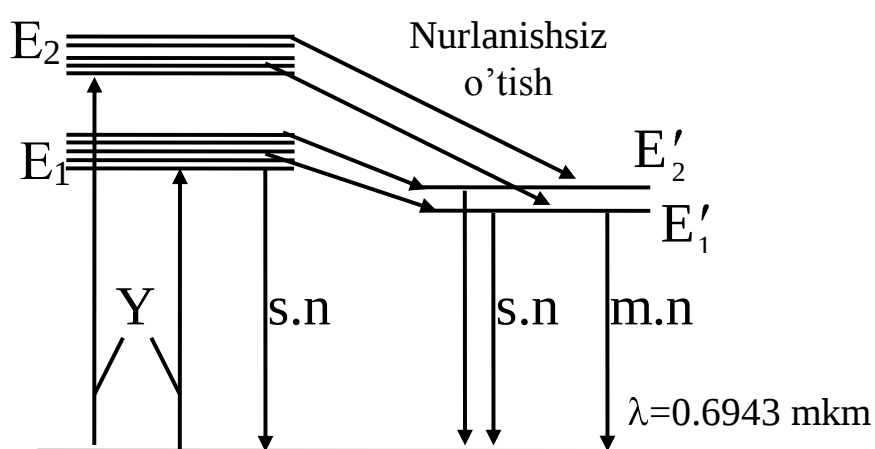
Sterjenning bir tomoni nur o'tkazmaydigan kumush qatlami bilan qoplangan, ikkinchi tomoni ham xuddi shunday kumush bilan qoplangan bo'lib, bu tomon faqat 8 % nurni o'tkazadi, xolos. Qurilmaning sxemasi 1.1 - rasmda keltirilgan.



1.1-rasm

O'tish jarayoni esa quyidagicha: nurlanish yoqut tarkibidagi xrom ionlarini E_0 asosiy energetik sathdan E_1 va E_2 uyg'ongan energetik sathlarga ko'taradi (1.2 - rasm). Bu uyg'ongan sathlarning yashash davomiyligi ancha kichik ($\tau \sim 10^{-7}$ s). Ulardan nurlanishsiz E'_1 va E'_2 sathlarga o'tish sodir bo'ladi. Bir-biriga yaqin

joylashgan bu sathlarning yashash davomiyligi anchagina katta $\tau=5 \cdot 10^{-3}$ s. Bunday sathlarni metastabil sathlar deyiladi. Metastabil sathlardagi ionlarning biroz spontan nurlanishi ham sodir bo'ladi. Kristall o'qi bo'ylab haraktlanayotgan fotonlar qaytaruvchi asoslardan ko'p marta qaytadi, bu harakat davomida ko'p sonli majburiy nurlanishlar vujudga keladi. Natijada fotonlarning kuchli oqimi kristallning shaffof tomonidagi asosi orqali tashqariga chiqadi. Shundan so'ng tashqi manбайдan yana energiya olinadi va jarayonlar bayon qilingan ketma-ketlikda takrorlanaveradi.

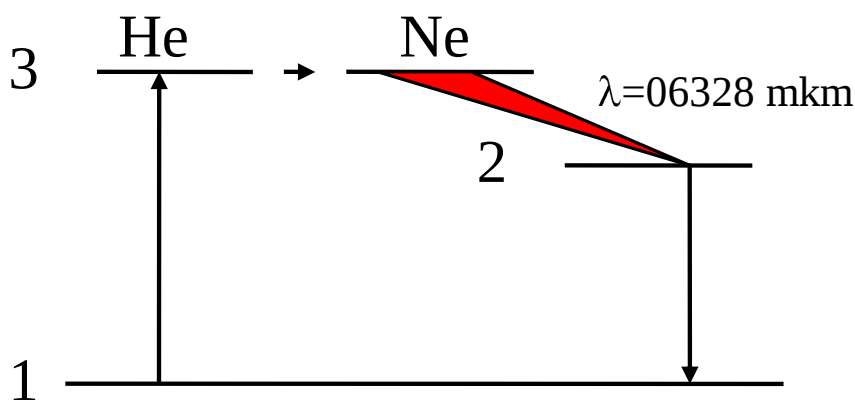


1.2-rasm

Metastabil sathda yig'ilgan energiya shu jismning o'zida spontan nurlanish sifatida ajralib chiqadi, ya'ni lazer generator vazifasini bajaradi. Shuning uchun lazerni kvant generatori deb ataladi. Agar metastabil sathdagi majburiy nurlanish tashqi ta'sir tufayli vujudga kelsa, lazer kirish signalini kuchaytirgan bo'ladi. Bunday lazerni kvant kuchaytirgich deyiladi.

Birinchi gazli lazer 1961 yilda neon va geliy gazi aralashmasi asosida yaratildi. Maolunki gazlar ingichka yutilish chiziqlariga ega bo'lgani uchun gazli lazerlarda majburiy yig'ish elektr razryadi orqali amalga oshiriladi. Geliy - neonli lazerda majburiy yig'ish ikki bosqichda amalga oshiriladi: geliy energiya tashuvchi vazifasini bajarsa, neon nurlanish hosil qiladi; gaz razryadida hosil bo'lgan elektronlar to'qnashishi natijasida geliy atomini uyg'otadi va 3 - holatga o'tadi

(1.3-rasm). Uyg'ongan geliy atomi neon atomlari bilan to'qnashib, ularni uyotadi va ular geliy satxiga yaqin bo'lgan neonning yuqori sathlaridan biriga o'tadi. Neon atomlarini 3-sathdan quyi sathlardan biriga o'tishi $\lambda=0,6328$ mkm. li to'lqin uzunlikdagi lazer nurlanishini vujudga keltiradi.



1.3-rasm

Lazer nurlari quyidagi xossalarga ega:

- 1) Ular yuqori darajada kogerent va dastasi esa nihoyatda ingichka.
- 2) O'ta monoxromatik ($\Delta\lambda < 10^{-16}$ mkm).
- 3) Katta quvvatli: masalan, $W=20$ J energiya bilan majburiy yig'ish (optik nakachka) va 10^{-3} s nurlantirilsa, nurlanish oqimi $\Phi=2 \cdot 10^{-4}$ J/s, $R=2 \cdot 10^{16}$ Vt/m².
- 4) Tarqalish burchagi (ingichka) juda kichik

hozirgi paytda f.i.k. 0,01 % — 75 % bo'lgan lazerlar mavjud. Lekin ko'pchilik lazerlarning f.i.k. i 0,1 - 1% oraliqda bo'ladi. Uy temperaturasida uzluksiz ishlaydigan quvvatli SO₂ lazer yaratildi. Bu lazer to'lqin uzunligi $\lambda=16,6$ mkm bo'lgan infraqizil elektromagnit to'lqinlarni ishlab chiqaradi. Uning f.i.k. 30% dan yuqoridir. Lazer nurlardan metallarni kesishda, payvandlashda, buyumlardagi nuqsonlarni aniqlashda, medisinada nozik operatsiyalarni bajarishda, nihoyatda toza materiallar olishda, o'lchash texnikasida, aloqada ham keng foydalaniladi.

Optik garmonikalarni generatsiyalash

Intensiv lazer nuri suyuqlik va kristallarda sochilganda spektrning yo'ldosh komponentlari bilan birgalikda tushuvchi yorug'lik chastotasi ω ga karrali bo'lgan 2ω , 3ω , ... - optik garmonikalar ham generatsiyalanishi aniqlangan. Ba'zi kristallarda optik garmonikalarning intensivligi shu darajada katta bo'ladiki, ularga nurlanishning 30-50% quvvati to'g'ri keladi. Misol uchun rubin lazerining kuchli nur dastasi kvartsdan o'tganda lazer nuri to'lqin uzunligiga to'g'ri keluvchi nur ($\lambda=6943$ A) bilan birga $\lambda/2=3471$ A ga teng bo'lgan ultrabinafsha nur borligi aniqlangan. Xuddi shuningdek, ko'zga ko'rinmaydigan infraqizil ($\lambda=10600$ A) neodim lazer yorug'lik dastasi kristallga tushirilganda, chiqishda ikkinchi garmonika ko'rinuvchi ko'k sohaga to'g'ri keladi ($\lambda_2=5330$ A).

Bundan tashqari kuchli dasta ta'sirida muhit shaffofligi ham o'zgarar ekan. Kuchsiz intensivlikda shaffof bo'lgan muhit, kuchli intensivlikda shaffof bo'lmay qolar ekan. Boshqa muhitlarda aksi bo'lishi mumkin. Kuchli yorug'lik ta'sirida fotoeffektning qizil chegarasi yo'qolar ekan. Fotoeffekt ionlashtirish energiyasidan 2-3, ba'zida 6-7 marta kam energiyali fotonlar bilan amalga oshirilishi mumkin.

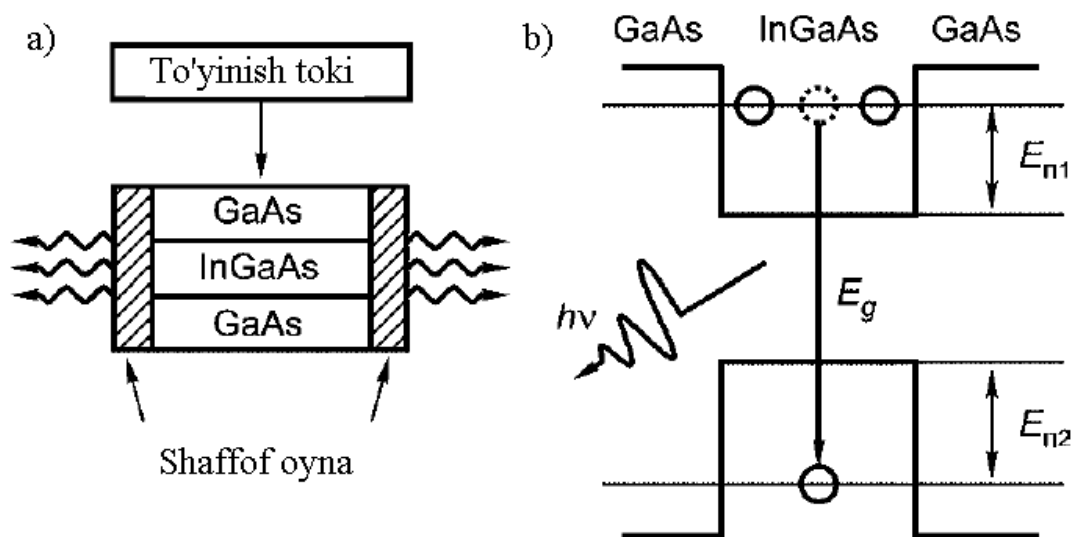
Shunday qilib, yorug'lik intensivligining ortishi ma'lum optik hodisalarning yangi qirralarini va yangi effektlarni ochish imkonini beradi. Bunda intensivlik 1 Vt/sm^2 dan $\sim 10^{10} - 10^{11} \text{ Vt/sm}^2$ gacha, ya'ni $10^9 - 10^{10}$ marta ortadi. Bu hodisalarni birlashtiruvchi umumiy narsa: ularning tabiati intensivlikka bog'liqligidir. Bu effektlarning aksariyat ko'pida intensivlik chegarasi mavjud.

Nanoelektron lazerlar

Nanoelektron lazerlar tuzilishi va ishlash prinsipiga ko'ra, gorizontal rezonatorli nanoelektron lazerlari, vertikal rezonatorli nanoelektron lazerlari hamda optik modulyatorlarga bo'linadi. Quyida ularni ko'rib chiqaylik.

Gorizontal rezonatorli nanoelektron lazerlar

Ma'lumki, istalgan turdagi lazerlarning ishlashi uchun asosan quyidagi ikkita muhim talab qo'yiladi. Birinchidan, energetik sathlarning ko'p bo'lishi, ya'ni yuqori sathli elektronlarning ko'p bo'lishini ta'minlash lozim. Ikkinchidan har bir lazerda ishchi hajmida elektromagnit nurlanishini berkituvchi optik rezonatorlar yoki optik ko'zgu bo'lishi kerak. Ular o'tkazuvchanlik zonasida valent zonaga o'tuvchi elektronlarning majburiy rekombinasiyalanish mexanizmlarini berkitadi. Majburiy rekombinasiya jarayonida ma'lum chastotali va fazali fotonlar generatsiyalanadi. Spontan rekombinasiya jarayonida esa fazalar va erkin harakat jarayonida foton generatsiyasi kuzatiladi. Hozirgi kunda yarimo'tkazgichli lazerlardan ikki geterotuzilmali lazerlar keng tarqalgan. Bu turdagi lazerlar tuzilishi jihatidan ikki tomondan mahkamlangan yupqa qatlamli yarimo'tkazgichlardan iborat (1.4-rasm). Yupqa qatlam kvant o'ralarga asoslangan bo'lib, unda energetik spektrlarning kvantlanishi lazerlarning xossalari o'zgartiradi. Ishchi sohani elektronlar bilan to'xtovsiz ta'minlab turish uchun metall kontaktlar qo'llaniladi.



1.4-rasm. Kvant o'rali lazer.

a) – ikkilangan geterastruktura, b) – energetik diagramma.

Bunday lazerlar quyidagicha ishlaydi. Metall kontaktlarning biridan elektronlar ishchi zonaga tushib turadi. Ular o'tkazuvchanlik zonasidan valent

zonaga o'tganda elektromagnit nurlanishni nurlaydi. Uning chastotasini quyidagicha aniqlash mumkin.

$$\hbar\omega = E_g + E_{\Pi 1} + E_{\Pi 2}$$

Priboorning markaziy sohasidagi generasiyalangan nurlarni to'plash uchun tashqi sohaga nisbatan ichki qatlam sohasi sindirish ko'rsatkichi katta bo'lishi ta'minlanadi. Bunday munosabat masalan, GaAs/InGaAs tuzilmalarda olish mumkin. Bunday holda, ichki soha optik-tola to'lqin yo'liga aylanadi. Chetki tomonlariga shafof oyna qo'yilgan bo'lib, u rezonator bazifasini bajaradi.

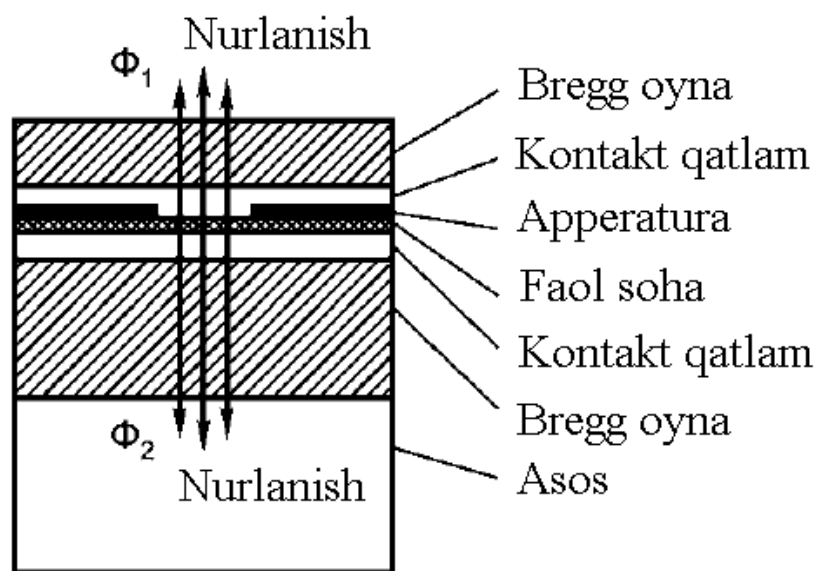
Kvant o'raga asoslangan lazerlar oddiy yarimo'tkazgichli lazerlardan bir qator avfzalliklari bilan farq qiladi. Bu lazerlar ishchi soha qalinligiga bog'liq. O'ralar o'lchami kichiklashishi bilan $E_{\Pi 1}$ va $E_{\Pi 2}$ sathlarda elektronlar energiyasi ortadi. Bu holatda lazerlar bilan generasiyalanish, nurlar chastotasi va (1.1) ifoda ortadi. Kvant o'ralar kengligini tanlash orqali optik chiziqli bog'liqligi va to'lqin yutilishini eng kichik holatigacha ega bo'lishi mumkin. Boshqa tomondan, kvant o'radagi ikkilamchi elektron gaz zichligi oshadi. Bu zona chetidagi holat zichliklariga bog'liq. Agar yarimo'tkazgichlarda zona chetki sohalarida holat zichligi kam bo'lsa, kvant o'lchamli sistemalarda chetki sohasida doimiydir. Shuning uchun kvant o'ralar tejamkor bo'ladi. Ular kam tok istemol qiladi va birlik yuzada katta yorug'lik beradi. Uning 60 % gacha elektrik quvvati yorug'lik nuriga aylanadi.

Kvant o'raga nisbatan kvant nuqtada energetik spektr rodikal o'zgaradi. Holat zichligi δ -funksiya bilan ifodalanadi. Shunday qilib, kvant nuqtada holatlar mavjud. Ular optik nurlanishni kuchaytirmaydi. Biroq, ular elektronlardan tashkil topgan. Bu energiyani kamaytiradi, shuningdek, lazerlarning muhim parametri bo'lgan to'yinish tokini kamaytiradi. Har qanday lazerlar sistemasida to'yinish tokini kichiklashtirish maqsadga muvoffiq. Xona temperaturasida to'yinish toki 15 A/sm² gacha kamayishi mumkin. Bunday holatda, kvant o'rali lazerlarda 30 A/sm² ni tashkil qiladi.

Vertikal rezonatorli nanoelektron lazerlar

Vertikal rezonatorli lazerlar ishlashi oddiy yarimo'tkazgichli lazerlarga o'xshashdi. Ularda Fabri-Pero rezonatorlar hamda elektron va kovaklar rekombinasiyasi va injeksiya xisobiga kvant kuchaytirgich qo'llaniladi. Vertikal rezonatorli lazerlarning boshqa yarimo'tkazgichli lazerlardan farqi lazer rezonatorlarini hosil qilinishidir. Yarimo'tkazgichli lazerlar ikki oynadan iborat Fabri-Pero rezonatoridan tashkil topgan. Ular yarimo'tkazgich plastinasi kristalografik yo'nalishiga mos hosil qilinadi. Demak, rezonator yarimo'tkazgich plastina o'qi bo'ylab joylashgandir. Yarimo'tkazgich vertikal rezonatorli lazerlarda Fabri-Pero rezonator lazerlar olish jarayonida bregg oyna hosil qilinadi. Bregg oyna asosga parallel bo'lib, rezonator o'qi va nurlanish yo'nalishi yarimo'tkazgich plastinaga perpendikulyar bo'ladi.

Vertikal rezonatorli lazerlarning tuzilish sxemasi 1.2-rasmda keltirilgan. Ikki bregg oyna rezonatorli lazerni tashkil qiladi. Bu oynalar yarimo'tkazgichning $\lambda/4$ to'lqin uzunligiga teng. Masalan, $\lambda/4$ qismi GaAs va $\lambda/4$ AlGaAs. Breg oyna o'rtasiga yarimo'tkazgich qatlam joylashgan bo'lib, lazerning faol ishchi sohasini tashkil qiladi.



1.2-rasm. Vertikal rezonatorli nanoelektron lazerning tuzilish sxemasi.

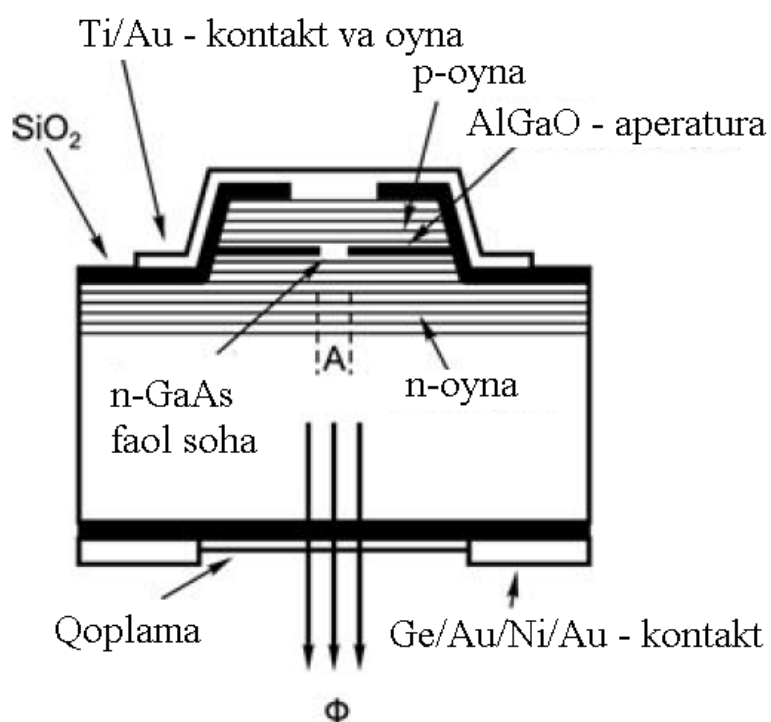
Vertikal rezonatorli lazerlarning faol ish sohasi bir yoki bir nechta kvant o'ra yoki kvant nuqtalardan iborat bo'ladi. Lazer p-i-n tuzilishga ega bo'lib, yuqori qismi p-turli hamda pastki qismi n-turli bo'ladi.

Agar lazerlarda dielektrik bregg oyna qo'llanilsa zaryad tashuvchilar injeksiyasi uchun qo'shimcha kontakt qatlam hosil qilinadi. Zaryad tashuvchilarning buday injeksiyasi ichki rezonatorli injeksiya deb ataladi. Bunday ichki rezonatorli injeksiya lazerlarda oynalar o'rtasidagi masofa 2λ , 3λ , ... bo'ladi.

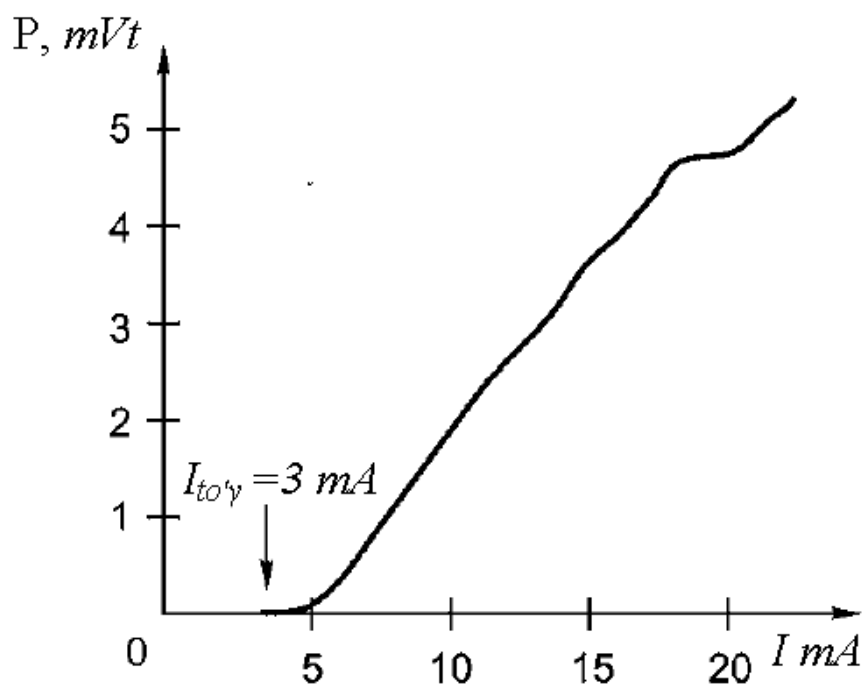
Aksariyat lazerlarda rezonator to'lqin uzunligi oynalar orasidagi masofa bilan aniqlanadi. Vertikal rezonatorli lazerlarda oynalar orasidagi masofa rezonator hosil qiluvchi bregg oynalar qalinligidan kichikdir. Bunday vertikal rezonatorli lazerlar uchun rezonatorning samarali uzunligi ishlatiladi. Rezonatorning samarali uzunligi rezonatorlarning ba'zi sohalari orqali aniqlanadi. Vertikal rezonatorli lazerlarning apperaturasi 10 mkmni tashkil qiladi. Odatda, Vertikal rezonatorli lazerlarning apperaturasi aylana yoki kvadrat shaklida bo'ladi. Vertikal rezonatorli lazerlarning nurlanishi yuqori hamda bir vaqtda har ikkala oyna orqali chiqadi. Nurlarning yo'nalishi yuqori va pastki oynalarning qaytarish koeffisientlari bilan qniqlanadi. Vertikal rezonatorli lazerlardagi bregg oynalarga yuqori talab qo'yiladi. Vertikal rezonatorli lazerlarning kuchaytirish sohasi juda kichik. Ya'ni kvant o'ralar qalinligi bir necha nanometrga teng, rezonatorning bir o'tishdagi kuchaytirishi 1 %. Lazer rezonatorida yuqori samarali oyna, uning qaytarish koeffisienti R 0,99 dan kam bo' masligi lozim.

Vertikal rezonatorli lazerlar oynalarining qaytarish koeffisienti 0,99 ... 0,995, o'ta zichlashtirilgan oynalarda 0,999 bo'ladi. GaAs va AlAs binar birikmalar qo'llanilishi yaxshi natija beradi. Aksincha, qattiq qorishma qo'llanilganda esa oynaning qaytarish koeffisienti kamayib ketadi. Bundan tashqari, lazer tuzilmalaridagi chegara soha qattiq qorishma gradien qatlam qo'llanilganda optik qarshilik kamayadi. Yarimo'tkazgichlarning legirlanishi ham optik qaytarish koeffisientining kamayishiga olib keladi. Bu erkin tashuvchilarda yorug'likning yutilishi bilan izohlanadi.

Kvant o'rali lazerlar konstruksiyasi 1.3-rasmda, uning vatt-amper xarakteristikasi 1.4-rasmda keltirilgan. Lazerning 25 qatlamdan iborat chiqish oyna qaytarish ko'effisienti 0,99, lazerning ishchi to'lqin uzunligi 0,85 mkmga teng. Shuningdek, lazerning faol sohasidagi GaAs kvant o'ra kengligi 8 nmga teng. Yorug'lik to'lqinining oyna bilan ta'siri tufayli vertikal rezonatorli lazerlar rezonatorining samarali uzunligi bregg oyna o'rtasida bir necha marta ortadi. Vertikal rezonatorli lazerlar rezonatorining samarali ish uzunligi taxminan 1 nanometrni tashkil qiladi.



1.3-rasm. Kvant o'rali lazerlar konstruksiyasi.



1.4-rasm. Kvant o'rali lazerlarning vatt-amper xarakteristikasi

Hozirgi kunda Vertikal rezonatorli lazerlarning bir necha turi ishlab chiqilgan. Nanoelektron Vertikal rezonatorli lazerlarning asosiy avfzalliklari sifatida quyidagilarni keltirish mumkin:

- Rezonatorning ixchamligi, to'yinish va ishchi tokining kichikligi;
- Lezer manbalarining minaturalashganligi;
- Nurlanishning kam sarfligi;
- Optik tolada nurlanishining yuqori samaraligi;
- Tokning yuqori chastotaligi;
- Bir me'yorda ishlashi;
- To'lqin uzunligi generasiyasining yuqori temperaturada muvozanatda bo'lishi;
- Ko'p elementlar bilan chiziqli va matrisali Vertikal rezonatorli lazerlar hosil qilish mumkinligi;
- Yuqori quvvatli minaturalashtirilgan lazerlar yaratish imkoniyatlarining mavjudligi va boshqar.

Nanoelektron lazerlar avfzalliklari bilan bir qatorda kamchiliklardan holi emas. Ularning kamchiliklari sifatida quyidagilarni aytib o'tish mumkin:

- Nanoelektron lazerlar tayorlash uchun qo'llaniladigan texnologik qurilmalarning qimmatligi;
- Ularni tayorlash jarayonining murkkabligi;
- Lazerlarda ko'p qatlamli geterotuzilmalarning qo'llanilishi va boshqalar.

2. Optik tolalar va ularning, tuzilishi, fizik xususiyatlari

Optik tola – shaffof materialdan ya'ni, oyna, plastikda iborat bo'lib, yorug'likni uzatish uchun qo'llaniluvchi ip hisoblanadi (1.5-rasm). U fan va texnika taraqqiyotidagi muhim yutuqlardan biri hisoblanadi. U yorug'likni o'zining ichidagi atom yoki molekulalar yordamida uzatadi. Hozirgi kunda optik tolalar turli ma'lumotlarni uzatishda keng qo'llaniladi. Bunday usulda ma'lumotlarni uzatish o'tgan asrning 50 yillarida taklif etilgan. Lazerlarning kashf etilishi optik tolalar imkoniyatlarini yanada oshirdi. Oynali optik tolalar kvars oynalar asosida tayorlanadi. Infraqizil nurlarni uzatishda boshqa materiallar, ftorsirkon, ftoraluminium va xalkogen oynalardan foydalaniladi. Hozirgi kunda plastik turdagi optik tolalar ishlab chiqildi. Uning asos ichki qismi polimetilmetakrilat, sirto esa ftor polimer materiallardan iborat. Quyida optik tolalarning ishlash prinsipini ko'rib chiqaylik.



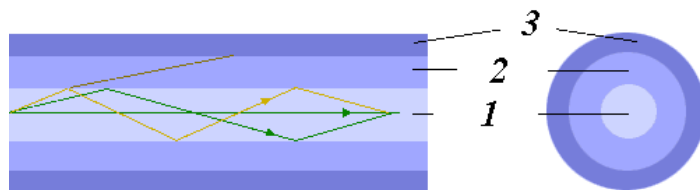
1.5-rasm.

Optik tolalarning ishlash prinsipi

Uzoq masofalarga yorug'likni uzatishda ularning quvvatini asrash muhimdir. Uzatish jarayonida isrofni kamaytirish uchun birinchidan, nurning sochilish jarayonida optik shaffoflikni oshirish zarur. Bunda yutilish minimum qiymatga ega bo'lishi kerak. Ikkinchidan, nur yo'nalishi troyektoriyasini to'g'ri tanlash lozim. Bularga bog'liq holda, birinchi vazifa yuqori tozalikdagi texnologiyani qo'llagan holda sof kvarts oynadan foydalanish maqsadga muvofiq. Ikkinchi vazifa optik qonunlarni to'g'ri qo'llash orqali amalga oshiriladi. Yorug'likning to'la qaytish effektiga asosan nurlanishni manbadan istemolchigacha erkin harakatlanadi. Biroq, buning uchun turli zichliklarga ega bo'lgan ikkita yopiq sistema kerak bo'ladi. Ko'p hollarda bunday yopiq ikki sistema sifatida turli zichliklarga ega bo'lgan kvarts oynalar qo'llaniladi. To'lqin nisbatan zichroq bo'lgan sistemada uzatiladi. Bu holatni batafsil tushunish uchun optik tola tizilishini ko'rib chiqaylik (1.6-rasm).

Uning o'zagi zichligi nisbatan yuqoriroq bo'lgan oyna (1) bo'lib, u yorug'lik uzatuvchidir. U nisbatan zichligi kichikroq bo'lgan oyna bilan (2) qoplangan. Unda

signallar to'la qaytadi. Mexanik ta'sirlardan saqlash uchun ularning sirti maxsus qoplama (3) bilan qoplanadi.



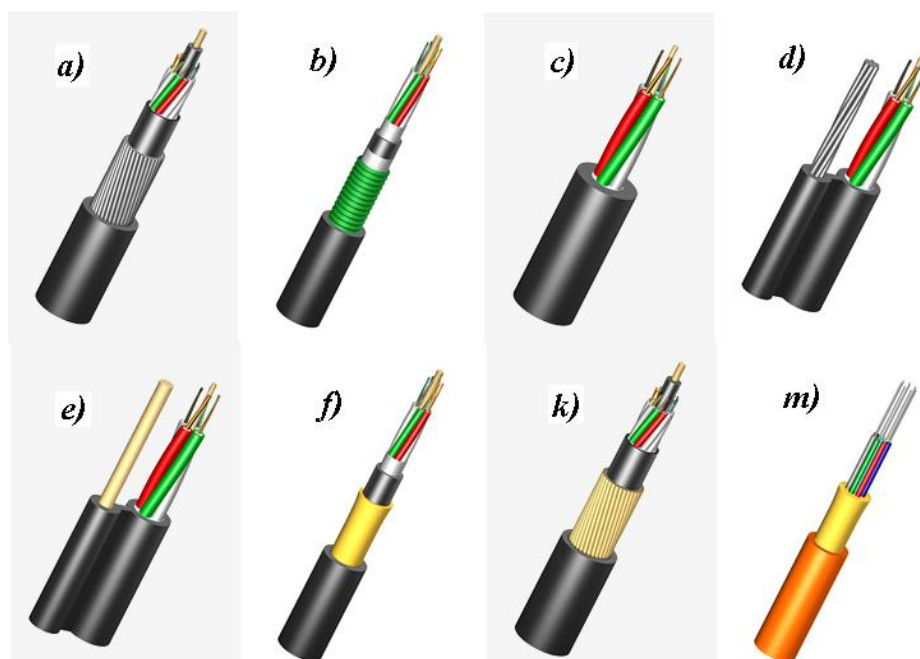
1.6-rasm.

Nurni istemolchiga yetib borishini ta'minlash uchun manbadan nur ma'lum burchakda yo'naltiriladi. Bunday holda to'liq qaytish effekti yuz berib nazariy jihatdan nur signallari to'liq iatemolchiga yetib boradi. Biroq, amalda nurning ma'lum foizi sinishi kuzatiladi. Bu birinchidan, manbadan yorug'likni bunday uzatishni amalga oshirish qiyin. Ikkinchidan, nazariy talabga javob beradigan optik tolani tayorlash murakkabligidir. Uchinchidan, optik kabelni bunday to'ri chiziqli joylashtirib bo'lmaydi.

Optik tolalar konstruksiyasi

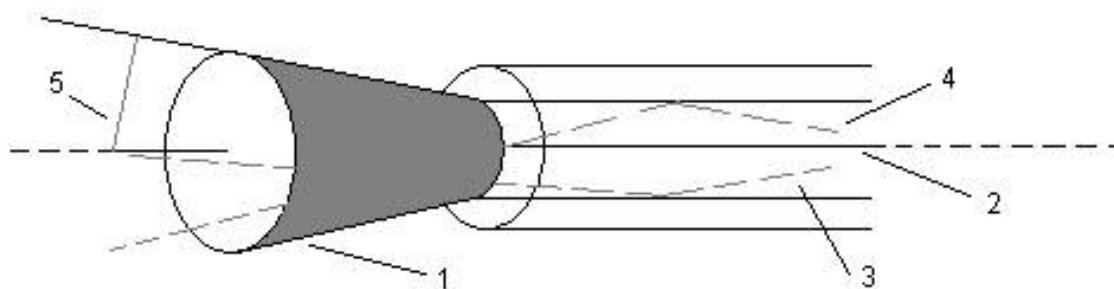
Optik tola konstruksiyasi jihatidan ko'ndalang kesim yuzasi aylana shaklida bo'lib, ikki qism o'zak hamda sirt qoplamadan iborat. Ichki to'la qaytishni oshirish uchun o'zakning sindirish ko'rsatkichi qoplamaniqidan katta bo'ladi. Masalan, sirt qoplama sindirish ko'rsatkichi 1,474 bo'lsa o'zakniki 1,479 ga teng. Nur yo'nalishi o'zakka yo'naltirilgan bo'lib, unda nur sochiladi. Bularga bog'liq holda, optik tolalarning konstruksiyasi bir muncha murakkabroqdir. O'zak va sirt qoplama sifatida ikkilamchi foton kristallar qo'llaniladi. Sindirish ko'rsatkichini pog'anali o'zgartirish maqsadida o'zak slindr shaklida tayyorlanadi. Bunday konstruksiya tolaning xususiy xossalarini ta'minlaydi. Ya'ni sochilayotgan yorug'likni tarqalishi, isrofni kamayishi, to'la dispersiya o'zgarishi va bishqa xossalari.

Telekommunikasiyada qo'llaniladigan optik tola diametri 125 ± 1 mikrometрни tashkil qiladi. O'zakning o'lchami tola turiga bog'liq holda farq qilishi mumkin. Aloqa visitasida qo'llaniladigan optik tolali kabellar turli ko'rinishlarda bo'ladi. 1.7-rasmda optik tolali kabellarning turlari keltirilgan.

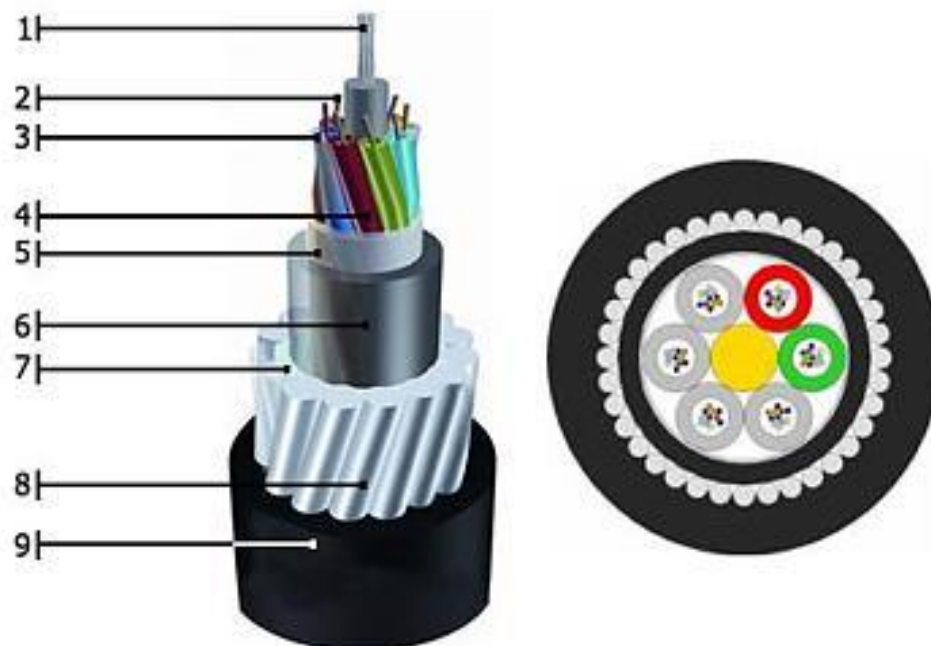


1.7-rasm. Optik tolalar konstruksiyalari.

1.8-rasmida tolada yorug'likning sochilishi keltirilgan. Nurni uzatkich bo'ylab sochilishi uchun tola o'qiga nisbatan ma'lum bir kritik burchak ostida tushish kerak. Ya'ni shaklday tasvirlanganday konus ko'rinishida yuboriladi. Burchak sinusi yorug'lik uzatkichning aparatura soni deyiladi.



1.8-rasm. Optik tolada yorug'likning kirishi. 1-konusning kirish qismi, 2-moda o'qi, 3-modaning kichik qismi, 4-modaning yuqori qismi, kritik burchak.



1.9-rasm. Optik tolali kabelning ichki tuzilishi.

1-element o'qi, 2-optik tola, 3-ichki gidrofob to'ldirgich, 4-optik modul, 5-o'zak gidroizolyasiyasi, 6-oraliq qoplama, 7-o'zakning gidroizolyasiyasi, 8-metall zirh, 9-ximoya qoplama.

Ko'p tolali o'zak sindirish ko'rsatkichi sirt qoplamanikidan 1-1,5 % ga farq qiladi. Masalan, o'zakniki $n=1,515$ bo'lsa, sirt qoplamaniki $n=1,50$ bo'lishi mumkin. Bunday holda, aperatura soni 0,2-0,3, yorug'likning tushish burchagi $12-18^\circ$ ni tashkil qiladi. Bir tolalining sindirish ko'rsatkichi $n=1,505$ bo'lsa, uning sirt qoplama sindirish ko'rsatkichi $n=1,50$ bo'ladi. Aperatur soni esa 0,122 va yorug'likning tushish burchagi 7° ga teng. Aperatura soni qancha katta bo'lsa, tolaga nrni yuborish shuncha oson bo'ladi. Biroq, bunda dispersiya oortadi, nurni o'tish polosasi qisqaradi. Yorug'lik uzatuvchi, manba, nurlanish qabul qilgichlarning optik kanallari komponentlari aperatura soni bilan xarakterlanadi. Optik tolali kabelning ichki tuzilishi 1.9-rasmda tasvirlangan.

1.3. Yarimo'tkazgichli nanotizimlarning optik xususiyatlari

Nanotuzilmalar va nanoklasterlar muhim optik va elektro'tkazuvchanlik xususiyatiga ega. Nanometrik o'lchamli bilan kata o'lchamli qattiq jismlar holatlari oralig'ida zaryad ko'chish jarayonlari bir-biridan farq qiladi. Nanometrik o'lchamda alohida sathda elektron holati kata o'lchamli qattiq jismlarda uning erkin yugirish yo'li e'tiborga olinadi. Bashqacha aytganda, nanotuzilmaning xossasi matrisadagi klasterlar bilan izohlanadi. Ularda zarrachaning holati ma'lum bir spektrga ega. Bu ular asosida ma'lum bir yorug'lik diapazonidagi diodlar, ularning to'liq uzunligini boshqarish orqali turli lazerlar olish imkonini beradi. Bundan tashqari, optik aylantirgichlar uchun nohiziqli optik nanotuzilmalar olish mumkin.

Metal va yarimo'tkazgichlar optik xossalari bilan bir-biridan tubdan farq qiladi. Ularda Fermi sath, valentlik va o'tkazuvchanlik zonalarini turlicha joylashgan. Bularga bog'liq holda metal va yarimo'tkazgichli nanoklasterlarda yuz beradigan o'lchamli effektlar ham bir-biridan farq qiladi. Yarimo'tkazgichlarda asosan elektron xossalari ko'p o'rganilgan. Kremniy va germaniy nanozarrachasi yarimo'tkazgich hisoblanmaydi. Si_n nanozarrachasi geliy dastasi bilan lazerli bug'lantirilganda kremniy asosida hosil bo'ladi.

Foton energiyasi yarimo'tkazgich taqiqlangan zona kengligi energiyasiga tenglashishi yoki undan ortishi bilan elektron-kovak juftlik hosil bo'ladi. Elektron va kovak bir-biriga bog'liq bo'lmagan holda ko'chadi. Ba'zi hollarda Kulon o'zari ta'sir tufayli elektron va kovak birga saqlanib qolib, yangi elektrik jihatdan neytral yangi turdagi kvazizarra ekistonlarini hosil qiladi. Ekistonlar moddaning elektro'tkazuvchanligiga ta'sir qilmaydi. Chunki, ular elektr zaryadiga ega bo'lmaydi.

Yarimo'tkazgichlar fizikasining hozirgi zamon taraqqiyotiga nazar solsak, ayni paytda asosiy izlanishlar murakkab zonali yarimo'tkazgichlardan hosil qilingan ko'p qatlamli geteroo'tishlarga qaratilgan. Buhol, tabiiyki, yarimo'tkazgich texnologiyasiga qay daraja bog'liq bo'lsa, uning fizikasiga ham shu darajada

bog'liqdir. Bunday geteroo'tishlarda kechadigan elektronli fizik jarayonlari o'lchamli kvantlashgan o'rachalar yoki o'ta panjarali yarimo'tkazichlar fizikasi yordamida tushuntirish mumkin.

Ikki o'lchamli sistemalarda lyuminessensiya

Lyuminissensiya xodisasi, odatda, hajmiy kristallardagi kabi, ikki o'lchamli sistemalarda ham tok tashuvchilarning energetik spektrini va ular ishtirokida kechadigan kinetik hodisalarni tekshirish usuli sifatida qaraladi.

Lyuminessensiyaning intensivligi nafaqat tok tashuvchilarning holat zichligi va optik o'tishlarning kechish ehtimolliklari bilan, balki qaralayotgan holatlarda tok tashuvchilarning joylashish darajasi bilan ham aniqlanadi. Shuning uchun lyuminessensiya, ko'p hollarda, yutilish spektrning unda o'z ifodasini topmagan nozik tuzilmasini tekshirishda qo'l keladi va qaralayotgan holatlarning tok tashuvchilar bilan to'lish yoki ularda bo'sh holatlar hosil bo'lishining kinetikasini tekshirish imkonini beradi.

Lyuminessensiyani tekshirish elektronli holatlarning to'lish darajasiga bog'liq ravishda elektron-elektrnli o'zaro ta'sirning elektron spektriga ta'sirini aniqlash imkonini beradi.

Yorug'likning nurlanishi bilan kechadigan rekombinatsiyaning fizik tabiatiga qarab xususiy, aralashmali va eksitonli lyuminessensiyalarga bo'lib o'rganiladi.

Xususiy yoki zona-zona qabilidigi lyuminessensiya erkin elektron va kovaklarning rekombinatsiyasiga bog'liqdir.

Eksitonli lyuminessensiya erkin, lokallashgan yoki aralashmalarda bog'langan eksitonlarning rekombinatsiyasi bilan bog'liqdir.

Agar rekombinatsiyalanayotgan erkin elektron-kovaklar yoki eksitonlarning energiyasi issiqlikli energiyasidan katta bo'lsa bunday lyuminessensiya issiq lyuminessensiya deb ataladi.

Aralash tarkibliqajmiy yarimo'tkazichlar (masalan, GaAlAs)da eksitonlar tarkibining tahqiqlangan zonasi kengligini o'zgarishiga olib keluvchi o'zgarishi bilan kechadigan fluktuatsiya hisobiga lokallashadi. Eksitonlar (GaAlAs)ning galliyga boyitilgan sohasidagi eksitonlarning energiyasiga nisbatan kichik energiyali sohalarda lokallashgan bo'ladi. Eksitonlarning kvantlashgan o'rachalardagi yoki o'ta panjaralardagi lokalizatsiyasi tizilmalarning texnologik tayyorlanish jarayonida yuzaga keluvchi va eksitonlar energiyasining o'zgarishiga olib keluvchi o'racha va to'siqlar kengliklarining o'zgarishi hisobiga kengroq o'rachali tizimlarda sodir bo'ladi. Unday lokallashish kuchli (stoksli) siljishni yuzaga keltiradi, chunki eksitonli yutilish spektriga o'z ulushini qo'shmaydigan kichik energiyali holatlarni egallashadi.

Aralashmali lyuminessensiya akseptorlarda bog'langan kovaklar bilan erkin elektronlarning yoki bog'langan kovaklar bilan erkin elektronlarning yoki bog'langan elektronlar bilan erkin kovaklarning, shuningdek tahqiqlangan zonada joylashgan bir necha aralashmali zonalar o'rtasida kechadigan rekombinatsiya bilan ifodalanadi. Oxirgi ko'rinishdagi rekombinatsiyaga donor-akseptorli rekombinatsiya misol bo'la oladi.

Ushbu bobda optik orientatsiya (qutblanish) yoki tashqi magnit maydonning ta'sirida spinli orientatsiyalar natijasida hosil bo'luvchi qutblangan lyuminessensiyagagina diqqatimizni qaratamiz. Buholni batafsil hal etishdan avval paytda ham nazariy, ham eksperimental ahamiyatiga molik bo'lgan ayrim lyuminessensiyaning naqadarligini ko'rsatuvchi tekshirish usullariqaqida to'xtalib o'tamiz.

Kvantlashgan Xoll samarasi sharoitida kechadigan elektron-elektronli o'zaro ta'sir. Kvantlashgan Xoll effekti 1980 yil nemis olimi fon Klitsing (vg'n Klitzing) tomonidan ochilgan. Bu xodisa ikki o'lchamli sistemalar: metall-oksid-dielektrik (MOD), geterotuzilmalar va kvantlashgan o'rachalarda tok tashuvchilarning energetik spektri diskret (uzlukli) tus oluvchi kuchli ko'ndalang magnit maydoni ta'siriga sodir bo'ladi. Toza (ideal). tizimlarda tok

tashuvchilarning magnit maydonidagi tok tashuvchilar energetik spektri Landau sathlari tizimidan iborat bo'lib, ularningqar biriga tok tashuvchilarning yuza birligidagi konsentratsiyasi $n_h = eB/(2\pi\hbar)$ (B-magnit maydon induksiyasi) ifoda yordamida topiladi (bu yerda opinli yoki zonali aynish imkoniga eg'tibor berilmagan).

Haqiqiy(real) tizimlarda esa aralashmalar yoki nuqsonlarning maydonlari bu sathlarning kengayishiga, bu esa, o'z navbatida, sathlarning suvashib ketishi hisobiga ularning tizimi (polosasi)ga olib keladi. Bundaqar bir tizim markaziga yaqin qiymatga ega bo'lgan energiyali tok tashuvchilarginaharakatchan bo'lib, kinetik (tashish)qodisalarida ishtirok etadi. Buning natijasidi yuqorida joylashganqar bir sath yarmining to'lishida, yag'niqar bir sath to'lish darajasi ($\nu = n/n_H$)ning yarimga karrali qiymatlarida o'tkazuvchanlik tenzorining nodiagonal (b_{xu}) tashkil etuvchisining qiymati tepkili (sakrash) o'zgaradi; bunda n-tok tashuvchilarning sirt konsentratsiyasi, so'ngra $b_{xu}(e^2\nu/(2\pi\hbar))$ qiymatli «yassilik»ka chiqadi (n_H - Xoll konsentratsiyasi). b_{xu} ning bunday qiymatlar sohasida o'tkazuvchanlikning b_{xu} nodiagonal tashkil etuvchisi aktivizatsion (termaemission) iabiatli bo'lib, ν ning yarimga karrali sohalarida esa maksimumga erishadi. 1983 yil rus olimlari Altuxov, Ivanov, Lamasov va Rogachevlar o'zlarining kremniyli (MOD) tizimlardagi lyuminessensiya spektrida S chiziq deb nomlangan nurlanishning yangi chiziqlarini tajribada kuzatishgan. Bu chiziqni elektronlarning kvantlashgan o'rachaning oksid tomonidagi devori yaqinida joylashgan nomuvozanatdagi kovaklar bilan rekombinatsiyalanish natijasi sifatida qarash mumkin (bunda kovaklar sirtdan uzoqda joylashgan va teskari ishoraliqajmiy zaryadlar qatlaminihosil qiladi). Bu va bunga o'xshash boshqa tajribaviy dastaklar qaralgan tajriba sharoitlarida kovaklar erkin bo'lib erkin elektronlar bilan birgalikda ikki o'lchamli elektron-kovakli (e-h) plazmanihosil qilishidan dalolat beradi.

1984 yil Kukushkin va Timofeevlar tomonidan elektronlarning kvantlashgan o'racha yaqinida joylashgan akseptorlarga bog'langan kovaklar

bilan rekombinatsiyalanishi hisobiga ruyobga keluvchi nurlanishning 2D – chiziqni ochishdi. Tajriba faktlaridan shu ma'lum bo'ldiki, nurlanish chizig'ini shaklan tekshirish bir elektronli holatlar zachoigini bevosita o'lchash mumkin ekan. Shuningdek Landau sathlarining kengligi ($\hbar\Gamma$)ning to'layotgan sathlar eng yuqorisining to'lish darajasiga bog'liqligi kelib chiqadi. Elektronlar sathdagi eng pastki holatlarni qisman to'ldira borib aralashmalarning maydonini qisman ekranlashtiradi va sathlarning kengligi $\hbar\Gamma$ kamayadi; sath to'lasicha egallanganida ekranlashish yo'qolib boradi.

Holatlarning spinli yoki orbital – vohali energetik ajralishi (tizimlashishi) tanlangan holatlarning to'lish darajasiga bog'liqdir. Buning sababi bir xil holatlarni to'ldiruvchi elektronlar energiyasini kamaytiruvchi almashinuv o'zaro ta'siri hisoblanadi. Tekshirilgan namunalarda orbital – vohali kengayish kattaligi Y_{ev} to'lasicha egallangan yoki bo'sh holatlar ($\psi_+ va \psi_-$) uchun, ν ning juft qiymatlar sohasida ν ga mutanosib o'zgargan va uning qiymati 0,04 meV ga tengdir; ν ning toq qiymatlarida esa bu ajralish ortadi, masalan, $\nu=3$ uchun uning qiymati 1,4 meVga teng bo'ladi.

Xuddi shuningdek spinli energiyaviy ajralishni ifodalovchi elektronning g – faktori berilgan N ga mos keluvchiqamma to'rtala holatlar to'lganida erkin elektronning g -faktoriga yaqin qiymatini qabul qiladi; bu holatlarning yarmi to'lganida qiymati keskin ortadi va, masalan, kremniy uchun $\nu=2$ holda bu qiymat to'qqizga tengdir. ν ning ortishi bilan elektronning spinli va orbital-vohali energiyaviy kengayishga ulushi kamayadi. $\nu=p/q$ kattalikning butun bo'lmagan qiymatlarida, odatdagidek, q kattalik toq qiymatlar qabul qilsa pastharoratlarda katta siljuvchanlikka ega bo'lgan namunalarda $b_{xu}(\nu)$ bog'lanish ham yassilikka, $b_{xu}(\nu)$ da esa minimumga ega bo'ladi. Karrali Xoll effekti deb nom olgan bu xodisa $\nu=p/q$ munosabat o'rinli bo'lganda siqilmovchi kvantlashgan suyuqliklardagi elektron-elektronli o'zaro ta'siri natijasi deb tushuntiriladi. Bunday suyuqlikning elementar (oddiy) o'yg'onishlari zaryadi $\pm e^* = e/q$ bo'lgan «kovaklar» yoki «elektronlar» hisoblanadi. «Elektron-kovak» juftihosil bo'luvchi energiya ν ni

tirqishning kengligi deyilib $b_{xx} \propto e^{-\Delta/k_B T}$ aktivatsion munosabat yordamida o'lganishi mumkin. Shuni ta'kidlash joizki, kremniyli MDP-tuzilmalarda ν ning aynan bir qiymati uchun b_{xx} kamayishi bilan bir vaqtda lyuminessensiyaning 2D-chizig'i maksimumning chastotaviy bog'lanishida nomoton siljish $\delta\omega$ aniqlangan. Tajribani xatolik chegarasida bu siljish $\nu=7/3$ va $\nu=8/3$ qiymatlarda 3ν kattalikka mos keladi. Bu $\nu < \nu_0 = p/q$ shartda- q ta elektronlarning «yo'qolishi»dir deb tushuntiriladi va $\nu < \nu_0$ va $\nu > \nu_0$ shartlarda rekombinatsiyalashayotgan elektronlar energiyalarining farqi $q\Delta$ ga teng bo'ladi.

Biroq keyingi, GaAs/AlGaAs geterotizimlari ustida olib borilgan tajribalaridan $\delta\omega$ va Δ o'rtasidagi yuqorida qayd etilgan to'g'ridan-to'g'ri bog'lanish doimo o'rinli emas ekani ko'rsatildi. Apalkov va Rashbalarning nazariy ishlarida $\delta\omega$ kattalik rekombinatsiyalanuvchi kovaklar joylashgan markaz va 2d – qatlam elektronlarning o'zaro ta'siriga bog'liqligi ko'rsatilgan. Agar dastlabki holati (akseptor neytral holatida) va oxirgi holati (akseptor zaryadlangan holati)da bu markaz 2d-qatlamdan yetarlicha uzoqlikda joylashgan bo'lsa, uning elektronlar bilan o'zaro ta'siri eg'tiborga olmaydigan darajada kam bo'ladi.

Uholda $\nu = \nu_0$ nuqtada ϖ kattalik emas, balki uninghosilasi tepkili o'zgaradi $\delta\left(\frac{\ell\varpi}{\ell\gamma}\right)_{\nu=\nu_0} = \frac{2q}{\nu_0}\Delta = \frac{2q^2}{P}\Delta$. Bu formula yordamida aniqlangan Δ kattalik

δ - legirlangan GaAs/AlGaAs geterotizilmada tirqishning b_{xx} ning aktivatsion bog'lanishdan topilgan kattalikdan uch marta katta ekani topilgan va qiymat jihatdan nazariy hisoblangan qiymatiga yaqindir.

Kvantlashgan ikki o'lchamli tizimlarda yorug'likning yutilishi

Mahlumki optik yutilishi ko'effitsienti mos optik o'tishning vaqt birligi ichida kechish ehtimolliga, oxirgi kattalik $\hat{F}$ impuls operatori $\hat{F}$ ning oxirgi $|n\vec{k}\rangle$ va dastlabki $|n\vec{k}\rangle$ holat to'liqin funksiyalariga nisbatan hisoblangan matritsa elementi bilan aniqlanadi. Biroq to'g'ridan-to'g'ri hisobga kirishmasdan ishonch hosil qilish mumkinki $\langle n\vec{k}_x | \hat{F} | n\vec{k} \rangle$ matritsa elementining $\langle n\vec{k}_x | \hat{F} | n\vec{k} \rangle, \langle n\vec{k}_y | \hat{F} | n\vec{k}_y \rangle$

tashkil etuvchilari uchun odatdagi tanlanish qoidasidan tanlangan model uchun mos keluvchi $|n\vec{k}\rangle = \psi_{n\vec{k}}(\vec{r}) = (L_x L_y M)^{-1/2} e^{i\vec{k}_y \vec{r}} \sum_m \psi_n(\vec{r} - m\vec{d}) e^{i\vec{k}_z m d}$ to'g'ri funksiyasiga nisbatan matritsa elementini hisoblash maqsalga muvofiqdir. (P.9)da L_x, L_y – normirovkalovchi chiziqli o'lchamlar, m – o'ta panjara davrlar soni, $\psi_n(\vec{r})$ – to'g'ri burchakli yakka potensial o'rachadagi n -chi sathning holat funksiyasi.

Kelgusi hisoblarda oxirgi holat funksiyasini erkin elektronning funksiyasi bilan almashtiramiz. Shunday qilib yengil va og'ir elektronlar (elektron kovakdan zaryad va samaraviy massa ishorasi bilan farqlanadi) tomonidan yorug'lik yutilishini hisoblaylik. Uholda yengil elektronlar ishtirokida yorug'likning yutilish koeffitsienti.

$$K(\omega) = 4m^* e^2 \omega (n_\omega c \hbar^2)^{-1} \sum_{nn'} \left| \langle n\vec{k} | Z | n'\vec{k} \rangle \right|^2 \left[\left(\frac{d(E_{n\vec{k}_z} - E_{n'\vec{k}_z})}{dk_z} \right)_{k_z=k_0} \right] \times \int dE_\perp f(E_\perp + \hbar\tilde{\omega}) [1 - f(E_\perp + \hbar\tilde{\omega} + \hbar\omega)] \quad (1.1)$$

Bu yerda n_ω ω -chastotaga mos keluvchi sindirish ko'rsatkichi, $E_n^* = \hbar\tilde{\omega} = E_{n\vec{k}_z}|_{k_z=k_0}$, $E_{n\vec{k}_z} - \hbar\omega = 0$ tenglamani k_z ga nisbatan olingan ildizi. Umuman olganda n_ω va $K(\omega)$ o'zaro bog'liq kattaliklardir, biroq yarimo'tkazgich dielektrik kirituvchanligining haqiqiy qiymati mavhum qiymatidan sezilarli katta bo'lsa bu bog'liqlikka eg'tibor bermasak ham bo'ladi. Masalan A_3 V_5 yarimo'tkazgichlar uchun yorug'likning infraqizil sohasida $\text{Re } E(\omega) \approx 10$ va yuqoridagi mulohaza o'rinlidir.

Shunday qilib U_0 ning yetarlicha katta qiymati uchun

$$K(\omega) = \begin{cases} \frac{4\pi e^2 \omega}{n_\omega c} \sum_{nn'} N_n \frac{|\langle n\vec{k} | Z | n'\vec{k} \rangle|^2}{\Delta_{nn'}^2 - (\hbar\omega - E_{nn'})^2} & \text{agar } |\hbar\omega - E_{nn'}| < |\Delta_{nn'}| \\ 0 & \text{agar } |\hbar\omega - E_{nn'}| > |\Delta_{nn'}| \end{cases} \quad (1.2)$$

Bunda kvantlashgan sathlarning diskretligini va $k_B T > E_g$ munosabatni egʻtiborga oldik, $\Delta_{nn'} = \Delta_n - \Delta_{n'} E_{nn'} = E_n - E_{n'}$, N_n n- chi zonadagi elektronlarning konsentratsiyasi.

Oxirgi munosabatdan koʻrinayaptiki, past chastotali optik oʻtishlarda noldan farqli yutilish sohasi juda ingichka chastotalar sohasini oʻz ichiga oladi xolos.

Ayni paytda nazariy jihatdan tok tashuvchilar energetik spektrining nomahlum parametrlarini aniqlashda, amaliy jihatdan esa nurlanishning modulyatorlari va oʻta tez taʼsirli infraqizil (IQ) fotoqabul qilgichlarni qurish uchun potensial oʻrachali yarimoʻtkazgichli tizimlarda tok tashuvchilarning oʻlchamli kvantlashgan sathlari oʻrtasidagi optik oʻtishlarni oʻrganish talab etiladi. Koʻpgina nazariy va eksperimental ishlarda buqol toʻgʻri zonali yarimoʻtkazgichlarga nisbatan qarab, oʻtkazuvchalik zonasidagi elektronlar ulushi bilan chegaralangan xolos. Bu esa oʻz navbatida bir fotonli (chiziqli) yutilishda yorugʻlik qutblanish vektori $\vec{e}$ ning oʻracha devoriga tik yoʻnalgan boʻlishini talab etadi, yagʻni eksperimentatorlar oldiga murakkab vazifani qoʻyadi. Shuning uchun nazariy jihatidan murakkab, biroq eksperimental nuqtai nazardan qulay xol- oʻlchamli kvantlashgan oʻracha (oʻlchamli kvantlashgan oʻra)dagi kovaklarda yorugʻlikning yutilishini tekshiraylik, chunki bunday paytda yorugʻlikning yutilishida qutblanish vektorigaqech qanday chegara (shart) qoʻyilmaydi, chunki valent zonasidagi tarmoqlaridagi optik oʻtishlar yorugʻlik kutblanishining ixtiyoriy orientatsiyasiga nisbatan ruxsat etilgandir. Bundan tashqari oʻlchamli kvantlashgan oʻra kovaklar energetik spektrining murakkabligi elektronli optik oʻtishlardan farqli oʻlaroq yutilish chiziqlarida nolorens shakllarning, shuningdek boshqa tabiatli dipol oʻtishlarning sodir boʻlishiga olib keladi.

Kelgusida yetarlicha ingichka oʻlchamli kvantlashgan oʻralarda yorugʻlikning yutilishini tekshiramiz, chunki bunday oʻlchamli kvantlashgan oʻralarda yengil va ogʻir kovaklarning oʻlchamli kvantlashgan tarmoqlarining

o‘zaro kesishishi (gibridli holati) kovaklarning katta energiya holatlarida oodir bo‘lishi mumkin xolos.

Misol tariqasida (001), (111) va (110) tekisliklari bo‘ylab o‘stirilgan o‘lchamli kvantlashgan o‘ralar uchun Brillyuen zonasining markazida joylashgan holatlar o‘rtasidagi dipol o‘tishlari uchun tanlov qoidalarini 1.1 va 1.2- jadvallar tariqasida keltiramiz. Bunda kovaklarning to‘lqin funksiyalari simmetriyaviy shakl almashtirilishiga nisbatan o‘zlarini koordinatalar (x,u,z) kabi tutadi deb tasavvur etib ψ_h, ψ_e, ψ_c (S va a)- valent zonasidagi og‘ir, yengil spinli orbital ajralgan zonalaridagi) kovaklarning va o‘tkazuvchanlik zonasidagi elektronlarning (juft va toq holatlar) to‘liq funksiyalari deb belgilashlar kiritganmiz.

1.1-jadval. (001) va (111) turli simmetrik o‘lchamli kvantlashgan o‘ralar (qavs ichida (110) turli o‘lchamli kvantlashgan o‘ra) uchun tanlov qoidasi

To‘lqin funksiyasi turi	ψ_{ha}	ψ_{za}, ψ_{cs}	ψ_{hs}	ψ_{ls}, ψ_{ca}
ω_{hs}	Z (X,Y,Z)	X,Y (X,Y,Z)	-	-
ω_{ls}, ω_{ca}	X,Y (X,Y,Z)	X,Y,Z (X,Y,Z)	-	-

1.2-jadval. (001) va (111) turli asimmetrik o‘lchamli kvantlashgan o‘ralar uchun tanlov qoidasi.

To‘lqin funksiyasi turi	ω_h	ω_l, ω_c
ω_h	Z	X,Y,
ω_l, ω_c	X,Y	X,Y,Z

Bu yerda ikki holga izoh berib o‘tish joiz:

1. Namunada simmetriya markazining yo‘qligini hisobga olingan holdagi optik o‘tishning ulushi eg‘tiborga olmaydigan darajada kichik qiymatlidir.
2. Nosimmetrik o‘lchamli kvantlashgan o‘ralarda holatlarning tartibiga nisbatan juft va toq to‘lqin funksiyalari bitta, faqat bitta tasavvur orqali shakl almashadi.

Endi yorug'likning (001), (111) tekisliklar bo'yicha o'stirilgan simmetrik o'lchamli kvantlashgan o'rakovklarning valent zonasidagi n va m o'lchamli kvantlashgan tarmoqlari o'rtasidagi dipol o'tishlar bilan bog'liq bo'lgan yutilishini ko'raylik.

Ayni paytda ham eksperimental, ham nazariy jihatdan kam o'rganilgan soha – qutblangan yorug'likning murakkab valent zonali yarimo'tkazichlardan o'stirilgan (masalan (001)) tekislik bo'ylab) o'lchamli kvantlashgan o'ralarning og'ir va yengil kovaklarning o'lchamli kvantlashgan sathlari o'rtasidagi optik o'tishlar bilan bog'liq bo'lgan yutilishini ko'raylik. Kelgusida zonaviy tuzilishning sodda modelini tanlaymiz. Bunga asosan yarimo'tkazgich kub simmetriyali va zona m_{hh} n_{lh} samaraviy massali og'ir (engil) kovaklar energiyaviy tarmoqlarining ekstremumlari Brillyuen zonasining markazida yotadi deb hisoblaymiz.

Ikki o'lchamli sistemaning tanlangan kattaligini hisoblashqajmiy kristallarga nisbatan olib borilgan hisoblashlar kabi bo'ladi, farqi normirovkalovchi (V)qajm o'rniga (S) yuza tanlanadi. Shuningdek uch o'lchamli $\vec{k} = k_x, k_y, k_z$ to'lqin vektori bo'yicha yig'indi ikki o'lchamli $\vec{k}_\perp = \{k_x, k_y\}$ to'lqin vektori va o'lchamli kvantlashgan sathlarning tartibi (n) bo'ycha yig'indi bilan almashtiriladi. Xususan yorug'likning yutilish koefitsienti

$$K = \frac{\omega}{cn_\omega} J_m(X_{\alpha\beta}) \quad (1.3)$$

ifoda yordamida hisoblanadi. Bunda

$$\chi_{\alpha\beta} = \chi_{\alpha\beta}^{(0)} + 4\pi e^2 (\omega^2 (L + L_e) S)^{-1} \sum_{ln, l'n', \vec{k}} e_\alpha V_{ln, l'n'}^\alpha(\vec{k}_\perp) e_\beta V_{n, l'n'}^\beta(\vec{k}_\perp) [E_{l'n', \vec{k}_\perp} - E_{ln, \vec{k}_\perp} - \hbar\omega - i\Gamma_{ll'}]^{-1} (f_{ln} - f_{l'n'}) \quad (1.4)$$

$\chi_{\alpha\beta}(\omega)$ -dielektrik kirituvchanlik, $\chi_{\alpha\beta}^{(0)} - \chi_{\alpha\beta}(\omega)$ ning yorug'lik chastotasi (ω)ga bog'liq bo'lmagan qismi, $\vec{V}_{ln, l'n'}$ -tezlik operatorining ikki o'lchamli Blox holatlariga nisbatan hisoblangan matritsa elementi ($l, l' = lh, hh$), L, L_v - o'racha va to'siqning qalinligi, $G_{ll'}$ «yutilish» koefitsienti ($G_{ll'} \rightarrow +0$).

Lattinjer-Kon tasavvurida

$$e_{\alpha} v_{\alpha} = e_{\alpha} k_{\beta} Q_{\alpha\beta} \quad (1.5)$$

munosabatini yozish qulaydir; bu yerda

$$Q_{\alpha\beta} = \frac{2}{\hbar} \left\{ \left[\left(A - \frac{5}{4} B \right) - B J_{\alpha}^2 \right] \delta_{\alpha\beta} - (1 - \delta_{\alpha\beta}) B [J_{\alpha} J_{\beta}] \right\}, k_z = -i \frac{g}{g_z} \quad (1.6)$$

Xususan (001) turdagi cheksiz chuqurlikni o'lchamli kvantlashgan o'rauchun ($Z||[001]$) $\vec{k}_{\perp} = 0$ holda tezlik operatorining og'ir va yengil kovaklarining o'lchamli kvantlashgan sathlariga nisbatan hisoblangan matritsa elementi

$$ev_{lm, l'n'm'}^{(c)} = \frac{2}{\hbar} k_z^{(n,n')} * \left\{ A + B \vec{e}_z \delta_{mm'} + B [J_z \vec{J}_{\perp} \vec{e}_{\perp}]_{mm'} \right\},$$

$$k_z^{(nn')} = \frac{i}{L} \frac{2nn'}{n'^2 - n^2} [1 - (-1)^{n+n'}] (m, m' = \pm 3/2, \pm 1/2) \quad (1.7)$$

Oxirgi ifodalardan ko'rinayaptiki, cheksiz baland to'siqli o'lchamli kvantlashgan o'ramodeli bo'yicha $\vec{k}_{\perp} = 0$ qol uchun quyidagi tanlov qoidasi o'rinli: $\vec{e} \parallel z$ qutblanishda $(hhn) \rightarrow (hhn') \leftrightarrow (lhn) \rightarrow (lhn')$ $\vec{e}_{\perp} z$ qutblanishi esa $(hhn) \leftrightarrow (lhn')$ optik o'tishlari ruxsat etilgan (n va n' qar xil juftlikka ega). Masalan n -GaAs-AlGaAs tizilma uchun $\vec{e}_{\perp} z$ qutblanishda bir fotonli zonachalararo optik o'tish tahqiqlangan.

$\vec{k}_{\perp} \neq 0$ holda tekshirilgan to'rttala ($m = \pm 3/2, \pm 1/2$) holatlariga mos keluvchi holat funksiyalari aralashib ketishi hisobiga yuqorida qayd etilgan oddiy - o'tish qoidasi buziladi.

Mahlumki past haroratlarda tok tashuvchilarning taqsimoti funksiyasi pog'onasimon, yag'ni $\Theta(E - E_F)$ (E_F - Fermi energiyasi) ko'rinishda bo'ladi. Uholda yutilish koeffitsientining chastotaviy bog'lanishi juda ingichka chuqqilar tizimi ko'rinishda bo'ladi. qar chuqqilarning $\hbar\omega$ energetik kengligi $(E_{hnn} - E_{hnl})$ bilan $(E_{hnn}(k_F) - E_F)$ oraligida yotadi, $\hbar k_F$ - Fermi kvaziimpulsi.

Endi elektronlar ishtirokida kechadigan yorug'lik yutilishni ko'raylik. Bunda yarimo'tkazgichni ko'p energetik vohali deb faraz qilib, tanlagan izoenergetik ellipsoidning bosh o'qi bilan ma'lum burchak hosil qilishi mumkinligiga e'tibor beramiz. Tabiiyki, bunda elektron kvaziimpulsini o'zgartirmaydi deb faraz qilsak, uholda ular samaraviy massalarning o'zgarishi turgan gap. Buholda og'ir elektron to'liq funksiyalarini

$$\psi(E, k_z) = \begin{cases} e^{ik_z z} + (k_z - k_1)(k_z + k_1)^{-1} e^{-ik_z z} & z \leq 0, \\ \frac{2k_z}{k_z + k_1} e^{ik_z z} & z > 0 \end{cases} \quad (1.8)$$

ko'rinishida tanlash mumkin. Bu yerda E, k_z yuqorida qayd qilingan formuladan uncha $m^{*-1} \rightarrow m_z^{-1} = m_{\perp}^{-1} \sin^2 \theta + m_{||}^{-1} \cos^2 \theta$ almashtirish bilan topiladi, $m_{\perp}$ va $m_{||}$ - tok tashuvchilarning ko'ndalang va bo'ylama samaraviy massalari, $k_z = (2m_z E_{kz} \hbar^{-2})^{1/2}$, $k_1 = [2m_z \hbar^{-2} (E_{kz} - U_0^1)]^{1/2}$, U_0^1 - og'ir elektronlar uchun bo'lgan potensial to'siqning balandligi (tabiiyki, potensial to'siqning yengil va og'ir elektronlarga nisbatan balandligi bir xil emas).

i- tartibli energetik vohadagi og'ir kovaklar ishtirokidagi yorug'likning yutilishi koeffitsientini

$$K_0(\omega) = 8\sqrt{2}\pi^2 e l T (n_{\omega} c \hbar^{1/2} d a \omega^{5/2})^{-1} \sum_i N^{(i)} (m_z^{(i)})^{-3/2} \quad (1.9)$$

ko'rinishda qayd etish mumkin. Bu ifodada

$$N^{(i)} = \frac{(m_x^{(i)} m_y^{(i)} m_z^{(i)})^{1/2}}{\sqrt{2}\pi^2 \hbar^3} \iint dE_{\perp} dE_z E_z^{-1/2} f(E_{\perp} + E_z) (E_z = E_{kz}) \quad (1.10)$$

i-nchi energetik vohadagi elektronlarning konsentratsiyasi, $m_x = m_1, m_y^{-1} = m_y^{-1} \cos^2 \theta + m_{||}^{-1} \sin^2 \theta$. Biz yuqorida og'ir elektronlarning energetik holatlari aynimagan deb faraz qildik.

Shunday qilib, erkin elektronlar ishtirokida yorug'lik yutilish harakatlanuvchanligi katta elektronlar uchungina sezilarli bo'lsa,

harakatlanuvchanligi past elektronlar asosan, yorug'likning to'siq oldi yutilishida ishtirok etadi.

O'lchamli kvantlashgan tuzilmada yorug'likning anizotropik yutilishi

Qo'rg'oshinning xalkogenidli birikmasi (QXB) osh tuzi kabi (kub panjarali) kristallanadi. Bunday kub panjaraning fazoviy simmetriyasi O_h^5 . QXB o'tkazuvchanlik va valet zonalarining ekstremumi keltirilgan Brilliyen zonasining L nuqtasida joylashgan. Tok tashuvchilar energiyasining ellipmsoidining bosh o'qi $\langle 111 \rangle$ yo'nalishida joylashgan.

Kelgusida texnologik inijliklarni (masalan deformatsiya ta'sirini) ehtiborga olmasdan o'ta panjara QXBda ifdeal hosil qilingan deb tasavvur etamiz. Kelgusi hisoblarda o'ta panjarali yarimo'tkazgich elektronning to'liq funksiyasini egiluvchi to'liq funksiyasi sifatida.

$$\psi_i(\mathbf{r}, y, z) = \sum_j F_i^{(j)}(\mathbf{r}, y, z) U_{il}^{(j)}(\mathbf{r}, y, z) \quad (1.11)$$

qaraymiz i – qatlamning tartibi, $F_i^{(j)}$ - o'ta panjara davri oraligida sekin o'zgaruvchi egiluvchi to'liq funksiya. U_L - Brilliyen zonasining L nuqtasidagi Blox funksiyasi.

$\langle 111 \rangle$ vohasi o'ta panjara o'qiga nisbatan $\Theta = 70,52^\circ$ qiyalikda joylashgan. o'ta panjara o'qi bilan, bog'langan koordinatalar sistemasiga nisbatan effektiv gamiltonianning ko'rinishi quyidagicha bo'ladi.

$$\hat{H} = \begin{bmatrix} \epsilon_c & \sigma_x P_x k_x + \sigma_y P_y k_y + P_{yz} k_z & \sigma_z P_z k_z + P_z k_z \\ \sigma_y P_y k_y + P_{yz} k_z & \epsilon_v & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_v \end{bmatrix} \quad (1.12)$$

Bunda $P_\alpha(\mathbf{r} = x, y, z)$ - impuls operatorining matritsa elementi $\langle 111 \rangle$ voha uchun $P_x = P_y = P_\perp$, $P_z = P_{11}$, $P_{yz} = P_{yz} = 0$, $P_{\perp,11} = \epsilon_g / 2m_{\perp,11}$, $\langle 111 \rangle$ - voha uchun esa

$$P_x = P_\perp, P_y = P_{yz} \cos^2 \Theta + P_\perp \sin^2 \Theta, P_{yz} = P_{yz} = P_{11} - P_\perp \sin 2\Theta / 2, m_{11} = 10m_\perp$$

$$V_{c,v} = \begin{cases} \varepsilon_{c,v}^{(1)} & nd \leq z \leq a \\ \varepsilon_{c,v}^{(2)} & a + nd \leq z \leq (n+1)d \end{cases} \quad \begin{matrix} \text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te} \\ \text{PbTe} \end{matrix} \quad (1.13)$$

- o'tkazuvchanlik (S) va valet (v) zonasining modullashuvchi potentsiali d – o'ta panjaraning davri, a va b – yarimo'tkazgich qatlamlarining qalinligi, E_g – taqiqlangan zonasining kengligi, e.b. – ermitli bog'lanish.

Bastardning chegaraviy shaftlarini ehtiborga olib, yuqorida qayd etilgandek.

$$\cos Kd = \cos \kappa a \cos kb - \frac{1}{2} (\gamma + \gamma^{-1}) \sin \kappa a \sin kb \quad (1.14)$$

$\gamma = k m_1^j / m_2^j <111>$ voha uchun

$$k, \kappa = \frac{1}{P_{11}} \left[\kappa_c^{1,2} - \varepsilon \right] \kappa_v^{1,2} - \varepsilon \left[P_1^2 \kappa_x^2 + k_y^2 \right]^{1/2} \quad (1.15)$$

Yoki
$$k, \kappa = \frac{\tilde{P}_{zy}^2 k_y}{P_z^2} \pm \tilde{P}_z^{-1} \left[\frac{\tilde{P}_{zy}^4 k_y^2}{P_z^2} + \left(\kappa_c^2 - \varepsilon \right) \left(\kappa_v^2 - \varepsilon \right) - \tilde{P}_x^2 k_x^2 - \tilde{P}_y^2 k_y^2 \right]^{1/2}$$

Bunda $\tilde{P}_x = p_\perp$, $\tilde{P}_y = \left(p_\perp^2 \cos^2 \vartheta + p_{11}^2 \sin^2 \vartheta \right)^{1/2}$, $\tilde{P}_z = \left(p_\perp^2 \sin^2 \vartheta + p_{11}^2 \cos^2 \vartheta \right)^{1/2}$,

$$\tilde{P}_{zy} = \left(p_{11}^2 - P_\perp^2 \right) \sin 2\vartheta / 2^{1/2}, \quad \tilde{m}_{1,2}^{-1} = 8 m_{\perp 1,2}^{-1} + m_{11,2}^{-1} \quad (1.16)$$

$$K = \frac{4\pi}{S_0} \int_{d/2}^{d/2} \sum_m \left| \beta_{nm}(\vec{k}_z, \vec{k}_\perp) \right|^2 \delta(\kappa_{cn}) \varepsilon_{vm} \hbar \omega \frac{d\vec{k}}{4\pi} \quad (1.17)$$

S_0 -fotonlar oqimining zichligi,

$$\beta_{nm} = P_{cv} C_{cnk_z, \vec{k}_\perp}^+ C_{vmk_z, \vec{k}_\perp} \int_{-D/2}^{D/2} F_{cnk_z, \vec{k}_\perp}^{l+} F_{vmk_z, \vec{k}_\perp}^h dz \quad (1.18)$$

n va m - o'tkazuvchanlik va valent zonalaridagi minizonalarning tartibi, D – o'q bo'ylab o'ta panjaraning o'lchami, P_{cv} - dipol matritsa elementi.

O'lchamli kvantlashgan cheksiz chuqur potentsial o'racha uchun o'zaro qamrash integrali s va v zonadagi bir xil tartibli ($n=m$) minizonalar uchungina

noldan farqli va $(\pi/2)$ ga teng, chekli chuqurlikli kvantlashgan o'ra uchun $\beta_{mn} < \pi\delta_{mn}/2$. Biz bu yerda tashuvchilarning tunel o'tishlarini ehtiborga olmayapmiz, chunki bu xolni texnologik jarayon tabiatiga bog'liq holda boshqarilishi mumkin. U holda $\langle 111 \rangle$ energetik voha uchun (1.17) dan

$$K \psi \sim \sum_n \Theta(\psi - \omega_n) (-\Delta n) \psi_1 \quad (1.19)$$

munosabatni olamiz. Bu ifodada Θ -teta funksiya,

$$\Delta_n = (\epsilon_{cn}^2 - \epsilon_{vn}^2) \hbar^{-4} \omega^{-4} \ll 1, \quad \epsilon_{cn}, \epsilon_{vn} \text{ -s va } v \text{ zonadagi } n - \text{nchi tartibli mini zonalar}$$

$$\hbar\omega_n = \epsilon_g + \epsilon_{cn} + \epsilon_{vn}$$

Oxirgi ifodadan ko'rinayaptiki, agar noekvivalent energetik vohalar bo'yicha yutilish protsesslarni to'la jamlasak va o'ta panjaraning o'qiga nisbatan optik yutilishni hisoblasak, u holda yutilish anizotropik bo'lishi kelib chiqadi. Energetik vohalarning qiyaligi va noekvivalentligi umumiy yutilish ko'effitsienti yorug'likning qutblanish vektorining orientatsiyasiga bog'liqligi kelib chiqadi.

I bob Bo'yicha umumiy mulohaza va xulosalar

Adabiyot tahlillaridan ko‘rinadiki, yorulikni kuchaytiradigan muxit hosil qilish mumkinligini va shu muxitda nur majburiy nurlanish xisobiga kuchaytirilishi, jumladan, santimetr to‘lqin uzunligidagi elektromagnit to‘lqinlarni kuchaytiradigan molekulyar generatorlar mazerlar deb atalsa, qattiq jismlı, optik diapazonida ($\lambda = 6943 \text{ \AA}$) ishlaydigan optik generator esa lazerlar deb ataladi. Nurni kuchaytiradigan aktiv muxitning tipiga qarab lazerlar - qattiq jismlı, gazlı, yarimo‘tkazgıchlı va suyuqliklı lazerlarga bo‘linadi. Yanada aniqroq aytganda lazerlarning turlarını sinflashda majburiy yig‘ish usuli ham muxim rol o‘ynaydi. Majburiy yig‘ish usullari - optik, issıqlık, kimyoviy, elektroionizasion va boshqa usullardan iborat bo‘ladi. Lazer nurlari yuqori darajada kogerent va dastasi esa nihoyatda ingichka, o‘ta monoxromatik ($\Delta\lambda < 10^{-16} \text{ mkm}$), katta quvvatlı: masalan, $W=20 \text{ J}$ energiya bilan majburiy yig‘ish (optik nakachka) va 10^{-3} s nurlantirilsa, nurlanish oqimi $\Phi=2 \cdot 10^{-4} \text{ J/s}$, $R=2 \cdot 10^{16} \text{ Vt/m}^2$, tarqalish burchagi (ingichka) juda kichik xossalarga. Hhozirgi paytda f.i.k. 0,01 % — 75 % bo‘lgan lazerlar mavjud. Lekin ko‘pchilik lazerlarning f.i.k. i 0,1 - 1% oraliqda bo‘ladi. Uy temperaturasida uzluksiz ishlaydigan quvvatlı SO_2 lazer yaratildi. Bu lazer to‘lqin uzunligi $\lambda=16,6 \text{ mkm}$ bo‘lgan infraqizil elektromagnit to‘lqinlarni ishlab chiqaradi. Uning f.i.k. 30% dan yuqoridir. Lazer nurlardan metallarni kesishda, payvandlashda, buyumlardagi nuqsonlarni aniqlashda, medisinada nozik operatsiyalarni bajarishda, nihoyatda toza materiallar olishda, o‘lchash texnikasida, aloqada ham keng foydalaniladi.

Intensiv lazer nuri suyuqlik va kristallarda sochilganda spektrning yo‘ldosh komponentlari bilan birgalikda tushuvchi yorug‘lik chastotasi ω ga karralı bo‘lgan 2ω , 3ω , ... - optik garmonikalar ham generatsiyalanishi aniqlangan. Ba‘zi kristallarda optik garmonikalarning intensivligi shu darajada katta bo‘ladiki, ularga nurlanishning 30-50% quvvati to‘g‘ri keladi. Optik tola – shaffof materialdan ya‘ni, oyna, plastikda iborat bo‘lib, yorug‘likni uzatish uchun qo‘llaniluvchi ip hisoblanadi (1.5-rasm). U fan va texnika taraqqiyotidagi muhim yutuqlardan biri hisoblanadi. U yorug‘likni o‘zining ichidagi atom yoki molekulalar yordamida

uzatadi. Hozirgi kunda optik tolalar turli ma'lumotlarni uzatishda keng qo'llaniladi. Bunday usulda ma'lumotlarni uzatish o'tgan asrning 50 yillarida taklif etilgan. Lazerlarning kashf etilishi optik tolalar imkoniyatlarini yanada oshirdi. Oynali optik tolalar kvars oynalar asosida tayorlanadi. Infraqizil nurlarni uzatishda boshqa materiallar, ftorsirkon, ftoraluminiy va xalkogen oynalardan foydalaniladi. Hozirgi kunda plastik turdagi optik tolalar ishlab chiqildi.

Hozirgi kunda optic tolali lazerlar yig'ish va undan foydalanish muammolari to'la hal qilinmagan. Shuningdek, ular yordamida mikro- yoki nanotuzilmalarning xossalarini o'rganish hal qilinmagan muammolardan hisoblanadi. Dissertatsiya ishida hal qilingan muammolar lazerlar texnologiyasi, ularda optik tolalardan foydalanish muammolar, olingan natijalar mikro- va nanotuzilmali yarimo'tkazgichlarning xossalarini, ularda yuz beruvchi jarayonlarni tushuntirishda muhim ahamiyatga ega.

Tadqiqotlar olib borish uchun ishda oldinga qo'yilgan maqsad va vazifalar

Mazkur dissertatsiya ishida, optik tolali lazerlarning ishlash va qoʻllanilish sohalari, ular yordamida mikro- va nanotuzilmali yarimoʻtkazgichlarning xossalarini oʻrganish.

Ishda oldinga qoʻyilgan maqsadga erishish uchun quyidagi vazifalarni hal qilish zarur deb topildi:

- lazerlar, ularning tuzilishi va ishlash prinsipini oʻrganish;
- optik tolali lazerlar tayyorlash hamda uni mikro- va nanotuzilmali yarimoʻtkazgichlarning xossalariga taʼsirini oʻrganish. Olingan natijalar asosida takliflar kiritish.

Dissertatsiya ishining tadqiqot obʼekti sifatida optik tolali lazerlar va ular yordamida mikro- va nanotuzilmali yarimoʻtkazgichlarni tadqiq etish tanlab olindi.

Dissertatsiya ishining metod va gipotezasi esa optik tolali lazerlar tayyorlash, mikro- va nanotuzilmali yarimoʻtkazgichlarning optik xossalarini hamda ularda namoyon boʻluvchi jarayonlarni oʻrganishdan iborat

II bob. TADQIQOT METODLARI

Bu bob tadqiqot metodlari, ularning tavsifi hamda mohiyatini yoritib berishga bag'ishlangan. Oldinga qo'yilgan maqsadga erishish uchun quyidagi vazifalarni bajarish lozim deb topildi;

- moddalarni o'rganishning optik metodlarini tanlash va ular yordamida mikro- va nanotuzilmali yarimo'tkazgichlarning tuzilishi va morfologiyasini aniqlash;
- mikro- va nanotuzilmali yarimo'tkazgichlar xossalarini o'rganish metodlarini tanlash, ularda lazer nurlaridan foydalanish imkoniyatlarini o'rganish;
- tadqiqotlarni samarali olib borish uchun tajriba usullarining yangi "modifikatsiya"larini ishlab chiqish va amalda qo'llash;
- lazerlarning mikro- va nanotuzilmali yarimo'tkazgichlar xossalariga ta'sirini o'rganish.

Barcha usullar yordamida materiallarning xossalarini o'rganish uchun dastlab namunalar tadqiqot usuli talablariga mos holda tayyorlanadi.

2.1. Mikro- va nanotuzilmalarni tadqiq qilishning optik metodlari

Mikro- yoki nanoo'lchamli tuzilmalar olish murakkab, o'ta aniqlikda ishlaydigan qurilma va metodlar yordamida amalga oshiriladi. Bunday tuzilmalar haqida fikr yuritilganda insonning ko'rish chegarasidan tortib, turli murakkab tuzilmali mikroskoplarning sezgirlik qobiliyatlarini e'tiborga olish lozim. Jumladan, insonning ko'rish chegarasi 10^{-4} metrga teng. Inson ko'zi bilan 1millimetрни yoki ignaning ip o'tkaziladigan teshigigacha bo'lgan kattalikni ko'rishi mumkin (2.1-rasm). Lupaning sezgirlik darajasi esa 10^{-5} metr ya'ni, millimetrning o'ndan bir ulushini tashkil qiladi. Biroq, mikrometr 10^{-6} metrga, nanometr esa 10^{-9} metrga teng. Ko'rinadiki, oddiy ko'z yoki lupa yordamida mikro- yoki nanotuzilmalarni o'rganib bo'lmaydi. Bunday mayda zarrachalarni ko'rish uchun maxsus metod va yuqori aniqlikdagi mikroskoplardan foydalaniladi.

Oddiy optik mikroskopning sezgirlik darajasi 10^{-7} metr, maxsus skaner qiluvchi mikroskopniki 10^{-8} – 10^{-9} metrni tashkil qiladi. Demak, mikro- yoki nanotuzilmalarni o‘rganishda, diagnostika va tadqiq qilishning optik metodlarni bilish talab etiladi.



2.1-rasm. Inson va mikroskoplarning ko‘rish chegarasi [15].

Hozirgi kunda mikro- va nanotuzilmalar tuzilishi va morfologiyasini o‘rganishning bir necha optik metodlari ishlab chiqilgan. Bu metodlarni qo‘llanilish sohasi hamda metodiga bog‘liq holda quyidagi turlarga bo‘lishimiz mumkin:

- moddalar diagnostikasi va tadqiq qilishning optik metodlari;
- elektron va ion nurlar dastasi yordamida diagnostika va lokal taxlil qilish;
- skaner qiluvchi zondli mikroskop, spektroskop va boshqalar.

Bu metodlar yuqori vakuum sharoitida, maxsus mikroskoplarda amalga oshirilib, namunaning geometrik hamda atomar tuzilishi haqida to‘la ma’lumot olish imkonini beradi.

Hozirda, bu soha bo'yicha asosan ilmiy tadqiqot institutlarigina shug'ullanadi. Oliygozlarda esa bu sohaning rivojlanishiga kam e'tibor berilgan. Biroq, bunday qurilma va metodlarni fizik mohiyatini o'rganish, ularni o'quv jarayoniga tadbiiq etish magistr hamda bakalavrlarni jahon standarti talablari doirasida ta'lim olishlaridagi asosiy omillardan biri hisoblanadi. Bu muammolarning hal etilishi magistrant, bakalavr hamda ilmiy tadqiqotchilarning ilmiy salohiyatini rivojlanishida muhim ahamiyatga ega. Bularga bog'liq holda, mazkur bo'limda, mikro- va nanotuzilmali yarimo'tkazgichlar diagnostikasi va ularni tadqiq qilishnig optik metodlari, ularning fizik mohiyati bayon qilinadi.

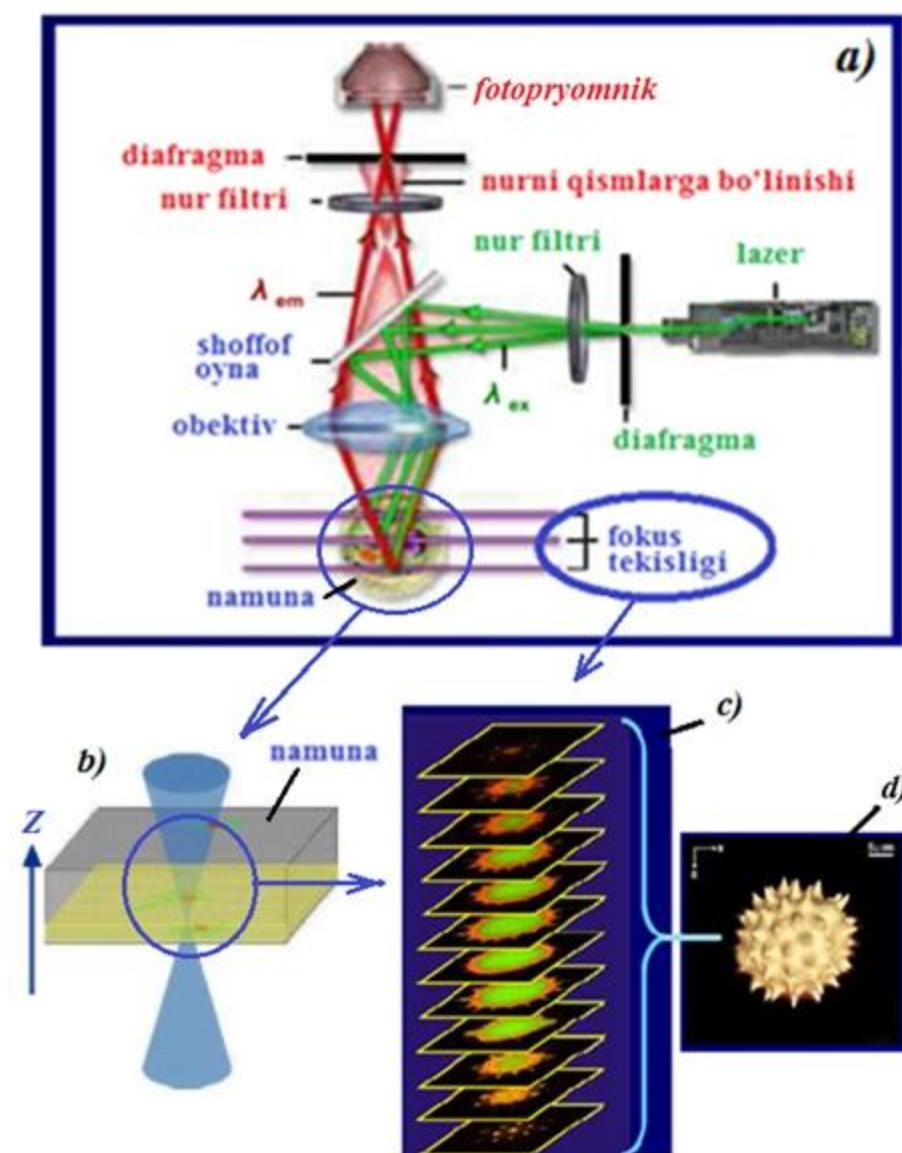
Konfokal mikroskop yordamida yarimo'tkazgichlarni tadqiq qilish

Konfokal mikroskop — optik mikroskoplardan biri bo'lib, boshqa oddiy mikroskoplar bilan taqqoslaganda tasvirni sezilarli, yuqori darajada ko'zga tashlanadigan holatda ko'rsatish imkonini beradi [15÷17]. Bu mikroskop yarimo'tkazgichlar fizikasi, biologiya, meditsina, spintronika va boshqalarni ilmiy tadqiq qilishda keng qo'llaniladi. Konfokal mikroskopning ishlashi o'rganilayotgan modda hajmidan qaytgan nurlarni taxlil qilishga asoslangan.

Tadqiqot olib borish uchun o'rganilayotgan namuna tutqichga o'rnatiladi (2.2a – rasm). Nurlar dastasi diafragma hamda nur filtridan o'tib, shaffof oynaga so'ngra, undan obektiv orqali namunaga tushadi. Nur namuna hajmida yutiladi (2.2a – rasm) va ma'lum qalinliklarda fokuslanadi. Nurlar oqimining har bir qatlamda yutilishi, fokuslanishi, ulardan qaytish jarayonlari yuz beradi. Natijada, har bir qatlamga tegishli fokus tekisliklari hosil bo'ladi (2.2c – rasm). Namuna hajmidan qaytgan nurlar dastasi qayta obektiv so'ngra, yuqorida joylashgan nur filtrlaridan o'tib, nurlar qismlarga bo'linadi.

Nurlarning qismlarga bo'linishini quyidagicha tushuntirish mumkin. Ta'kidlanganday namuna hajmida yutilgan nurlar har bir qatlamda atom yoki molekulalar bilan to'qnashib, nurlarning to'lqin uzunliklari o'zgaradi. Nur filtridan o'tgan turli to'lqin uzunlikdagi nurlar o'ziga xos signallarni beradi. Bu signallar namuna hajmidagi har bir qatlamning tuzilishiga xos bo'lib,

qatlamlarning atomar yoki molekulyar holatlarini ifodalaydi. Konfokal diafragma diametrini o'zgartirish orqali esa Z o'qi bo'ylab (2.2b – rasm) ma'lum qalinlikdagi qatlamlarga tegishli tasvirlar olinadi (2.2c – rasm). Bu fokus tekisligi nurning qanday qalinlikda namuna hajmida yutilishi hamda undan qaytishiga bog'liq. Ularni umumlashtirib, namunaning o'rganilayotgan sohasi haqida uch o'lchamli tasvir hosil qilinadi (2.2d – rasm).

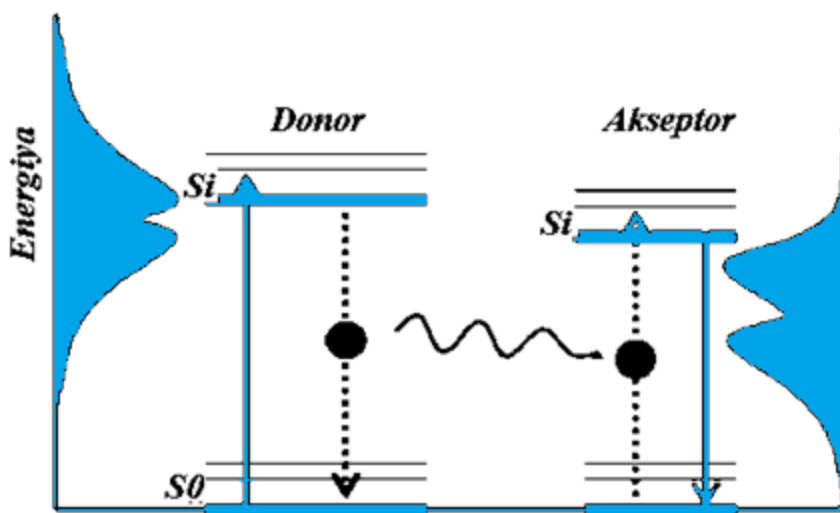


2.2 – rasm. Zamonaviy skaner qiluvchi konfokal mikroskopning soddalashtirilgan sxemasi.

Konfokal mikroskopning imkoniyatlaridan yana biri energiya uzatish orqali yarimo'tkazgichlardagi donor yoki akseptor sathlarni aniqlashdir (2.3 – rasm). Bu

metodga asosan, donor sathdan chiqqan energiya spektri va akseptorning nurlanish spektri bilan tebranadi. Bu jarayonni quyidagicha tushuntirish mumkin. Nurlar ta'sirida molekula yoki atom elektroni bir turg'un orbitadan boshqa turg'un orbitaga o'tganda yorug'lik kvanti nurlatadi yoki yutadi. Bunda chiqarilgan yoki yutilgan kvant energiyasi elektronning orbitadagi energiyalari farqiga teng ya'ni:

$$h\nu = E_n - E_m \quad (2.1)$$



2.3 – rasm. Donor va akseptorlarning energetik sathlari sxemasi.

Boshqacha aytganda, nurlar ta'sirida donor sath bilan akseptor sathlar o'rtasida o'zaro energiya almashunuvi vujudga keladi. Bu orbitalar energiyalari farqi yoki shu energiyaga teng bo'lgan donor sath bilan akseptor sathlar o'rtasidagi r masofaga bog'liq:

$$E \sim 1 / (1 + (r/R)^6) \quad (2.2)$$

R – doimiy (~ 3 nm).

Bu jarayonda energiya donor sathdan akseptor sathga uzatiladi. Natijada energetik sathlar o'rtasida tebranish vujudga keladi. Nurlanish intensivligi ular o'rtasidagi masofaga bog'liq. Energiya uzatilganda akseptorning nurlanish energiyasi ko'rish soha spektriga to'g'ri kelib, konfokal mikroskopda qayd etiladi. Olingan signallar yordamida donor va akseptor sathlar aniqlanadi.

Konfokal mikroskop oddiy mikroskoplar singari ma'lum bir aniqlikka ega:

$$\delta = \lambda / \pi(NA) \quad (2.3)$$

Bu erda, λ – nurlanishning to'liq uzunligi, $(NA) = n \sin \alpha$ – obektivning aperatura soni, n – namuna bilan obektiv o'rtasidagi sindirish ko'rsatgichi, α - obektiv qabul qilgan burchak yarimi.

Ruhsat etilgan sezgirlik darajasi ~ 250 nm ($NA=1,45$, $n=1,51$) tashkil qiladi. Hozirgi kunda mikroskoplarning sxemasida namunalarning fluoresensiya xossasi rivojlanishi tufayli, ularning ruhsat etilgan chegarasi $\sim 3\text{—}10$ nmni tashkil qiladi [18].

Mikroskoplarda manba sifatida lazer nurlarining qo'llanilishi konfokal mikroskopning ishlash samaradorligini yanada oshirdi. Lazerlarning boshqa yorug'lik manbalariga nisbatan avfzalligi ularning monoxromatikligi va diametri juda kichik parallel nurlar dastasidan iboratligidir. Lazer nurlarining bu avfzalligi optik sistemali mikroskoplarning ishlash samaradorligini hamda nurlar dastasining fokuslanishini oshiradi, tasvir hiraligini kamaytiradi. Lazer nurlari yordamida o'rganilayotgan namuna sirti to'la yoritilmaydi balki, kerakli sohaning o'zi yoritiladi. Konfokal mikroskop diafragmasi diametrini o'zgartirish orqali har bir qatlamga tegishli ma'lumotlarni olish mumkin.

O'rganilayotgan obekt va maqsadga mos holda konfokal mikroskoplarda turli lazerlardan foydalaniladi. 2.1 – jadvalda konfokal mikroskoplar uchun mo'ljallangan lazerlarning turlari keltirilgan.

2.1-jadval

Konfokal mikroskoplar uchun mo'ljallangan lazerlarning turlari

Lazer turlari	Nurlanish to'liq uzunligi, nm	Maksimal quvvati, MVt
Ar – UV	351, 364	80
Yarimo'tkazgichli	405	50

He – Cd	442	30
Ar – Kr	488, 568, 647	125
Ar	458, 477, 488, 496, 514	200
He – Ne	543	1,5
Kr	568	40
He – Ne	594	4
He – Ne	633	15
Ti – Sapphire, impulsli	720 – 1000	1 (oʻrtacha quvvat)

Xulosa qilib aytganda, bu metod nafaqat moddaning tuzilishi, morfologiyasini oʻrganishda balki, turli modda yoki tuzilmalar yaratishda ham keng qoʻllaniladi. Bu mikro- yoki nanoelektronikaning rivojlanishida muhim ahamiyat kasb etadi.

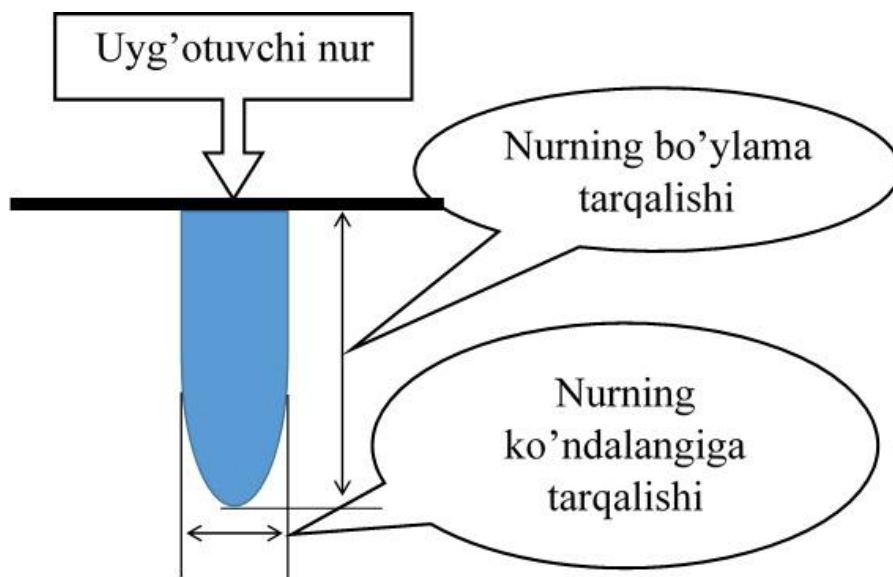
Nochiziqli optik metodlar va ularning fizik mohiyati

Optik metodlar yordamida mikro- va nanotuzilmalarni oʻrganishning samarali usullaridan biri nochiziqli optik metod hisoblanadi [15, 18]. Bu metod ham oʻrganilayotgan modda hajmidan qaytgan nurlar signallarini taxlil qilishga asoslangan. Nochiziqli optik metod yuqori vakuum sharoitida olib boriladi. Bu metod moddadan qaytgan nurlarining ikkilangan chastotada tarqalishiga asoslangan. Nurlar dastasi modda hajmida yutilganda turli yoʻnalishlarda tarqalishi mumkin. Nurlar dastasining kristal sirtiga tushishi va uning hajmida tarqalishi sxemasini 2.4 – rasmdagidek tasavvur qilish mumkin.

Nurning modda sirtiga tushgan hamda uning hajmida tarqalishini asosan uch qismga boʻlish mumkin. Sirtga tushayotgan nur uygʻotuvchi nur boʻlib, sirtagi namunaning atomar yoki molekulyar tuzilmalari bilan oʻzaro taʼsirlashadi. Modda hajmidagi yutilgan nurlar boʻylama hamda koʻndalang holatlarda tarqaladi. Nur dastasining modda hajmida turli yoʻnalishlarda tarqalishi va qaytishi moddaning

atomar yoki molekulyar tuzilishiga bog'liq. Bu jarayonda ularning to'liq uzunliklari va chastotalari o'zgaradi.

Nochiziqli optik metodda nurlar manbasi sifatida elektron va ion nurlar dastasida keng foydalaniladi. Bu nurlar moddalarning turli xossalarini o'rganishda qo'llaniladi. Dastlab, elektron nurlar dastasidan foydalanish va uning mexanizmlarini ko'rib chiqaylik.

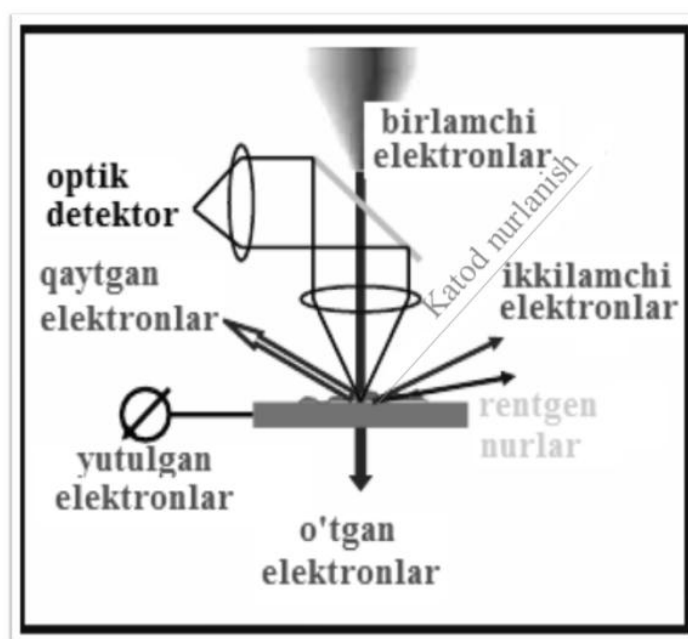


2.4 – rasm. Nurlar dastasining moddada tarqalish sxemasi.

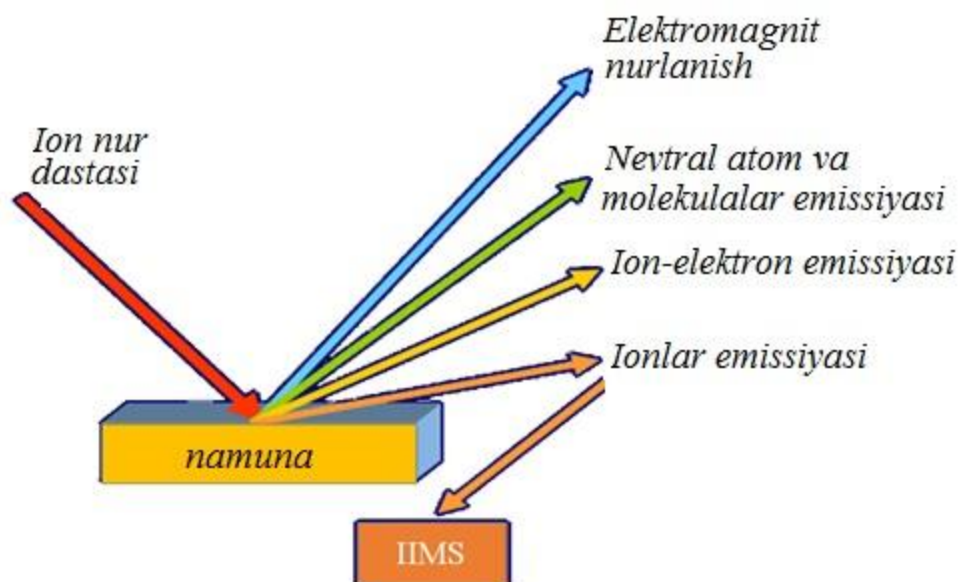
2.5 – rasmda moddaga yuborilgan elektron nurlarining sochilishini ifodalovchi sxema keltirilgan. Mikroskoplarda elektron nurlar dastasi qo'llanilganda asosan quyidagi fizik jarayonlar yuz beradi. Manbadan moddaga yo'naltirilgan nurlar birlamchi elektronlar hisoblanadi. Moddaga elektron nurlar dastasi tushishi hisobiga katod nurlanish vujudga keladi. Atom yoki molekular bilan o'zaro ta'sirlashgan birlamchi elektron nur dastalari turli ko'rinishda tarqaladi. Modda sirtidan qaytgan elektronlar ikkilamchi elektronlar hamda rentgen nurlarini hosil qiladi. Birlamchi elektronlarning ma'lum bir qismi modda hajmida yutilishi hotto uni teshib o'tishi ham mumkin.

Moddalarning tuzilishi va morfologiyasini o'rganishda ion nur dastalaridan foydalanish ham samarali usullardan biri hisoblanadi. 2.6 – rasmda moddadan qaytgan nurlarning sxemasi tasvirlangan Ion nurlar dastasi modda atom yoki

molekulalar bilan o‘zaro ta’sirlashganda emissiya jarayonlari yuz beradi. Bunda qaytgan nurlar bir – biridan emissiya hodisalariga mos holda farqlanadi. Emissiya hodisalari modda tarkibidagi atomar yoki molekulyar bog‘lanishlarga bog‘liq. Yuqorida, nurlar dastasining modda hajmidagi atom yoki molekulalar bilan o‘zaro ta’siri haqida aytib o‘tgan edik. Biroq, nurlar dastalarining atom yoki molekulalar bilan o‘zaro ta’siri mexanizmlari ochiq qolgan edi. Quyidagi bandeda bu mexanizmlarni ko‘rib chiqaylik.



2.5 – rasm. Skaner qiluvchi elektron nur mikroskopining sxemasi.



2.6 – rasm. Ion nur dastalaridan foydalanish sxemasi

2.2. Tadqiqot uchun olingan namunalarni tayyorlash

Tadqiqotlar olib borish uchun polikristal xususiyatga ega bo'lgan mikro- va nanotuzilmali kremniy namunalari tanlab olindi. Namunalar tadqiqot talablariga mos holda quyidagicha tayyorlandi.

- kremniy namunalarning tuzilishi va morfologiyasini o'rganish uchun namunalar olmos disk yordamida $\leq 10 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$ o'lchamlarda qirildi. Qirish jarayonida hosil bo'lgan nuqsonlarni kamaytirish maqsadida namuna sirti maxsus olmos pastasi bilan silliqlandi. So'ngra, qoldiq yog' va kirlar an'anaviy usullarda tozalandi.

- Namunalarning elektrofizik xossalariga lazer nurlari ta'sirini o'rganish uchun namunalar yuqoridagi singari olmos disk yordamida $300 \div 500 \text{ mkm}$ qalinlikda qirildi. Sirt yuzalarida hosil bo'lgan nuqsonlarni kamaytirish uchun mahsus olmos pastasi bilan silliqlandi, so'ngra kimyoviy standart yemiruvchilar SR-4 va uning turlari, 1-foiz NF, 5-foiz NNO va 1-foiz uksus kislota aralashmalari bilan yemirildi. Yemirilish tezligi kimyoviy yemiruvchilar miqdorini o'zgartirish

orqali nazorat qilib borildi. Soʻngra, namunalar mahsus olmos disklar yordamida $10 \times 10 \text{ mm}$ oʻlchamda qirqiladi.

2.3. Optik tolali lazer yordamida mikro- va nanotuzilmali yarimoʻtkazgichlarning xossalarini oʻrganish metodi

Lazer nurlarining mikro- va nanotuzilmali yarimoʻtkazgich xossalariga taʼsirini oʻrganish uchun TISL (yaʼni, toka, indutsirovannogo svetovim luchom) usuli asosida qurilma tayyorlandi (2.8 – rasm) [72]. Maʼlumki, $\lambda = 0,4 \div 1,4 \text{ mkm}$ toʻlqin uzunlikdagi spektral yorugʻlik nurining qoʻllanilishi kremniyning $\sim 100 \text{ mkm}$ chuqurlikkacha boʻlgan xossalarini, jumladan, uning hajmidagi rekombinatsiya faolligini oʻrganish imkonini beradi. Bizning holatda, toʻlqin uzunligi $\lambda = 0,88 \text{ mkm}$ boʻlgan lazerlardan foydalanildi. Lazer nurlari dastasi bilan mikro- va nanotuzilmalar sirtini yoritish uchun optik tolalardan foydalanildi. Optik tolalarning diametri $\sim 10 \div 400 \text{ mkm}$ oraliqlarni tashkil qiladi. Bu lazer nurlari dastasi diametrini $\sim 10 \div 400 \text{ mkm}$ oraliqlarda oʻzgartirish imkonini beradi. Shuningdek, qurilmada qizdirish pechi mavjud boʻlib, u namunalarning yorugʻlikka sezgirligini turli temperaturalarda oʻrganish imkonini beradi. Lazer nurlari manbai qoʻzgʻalmas tayanchga mahkamlangan. Namuna oʻrnatilgan oʻrindiqli namuna bilan birga gorizontal tekislikda x va y oʻqlari boʻylab ilgarilanma va qaytma

harakatlanadi. Bu lazer nurlari dastasining mikro- va nanotuzilmalar sirti bo'ylab erkin harakat qilish hamda uning xossalarini o'rganish imkonini beradi.

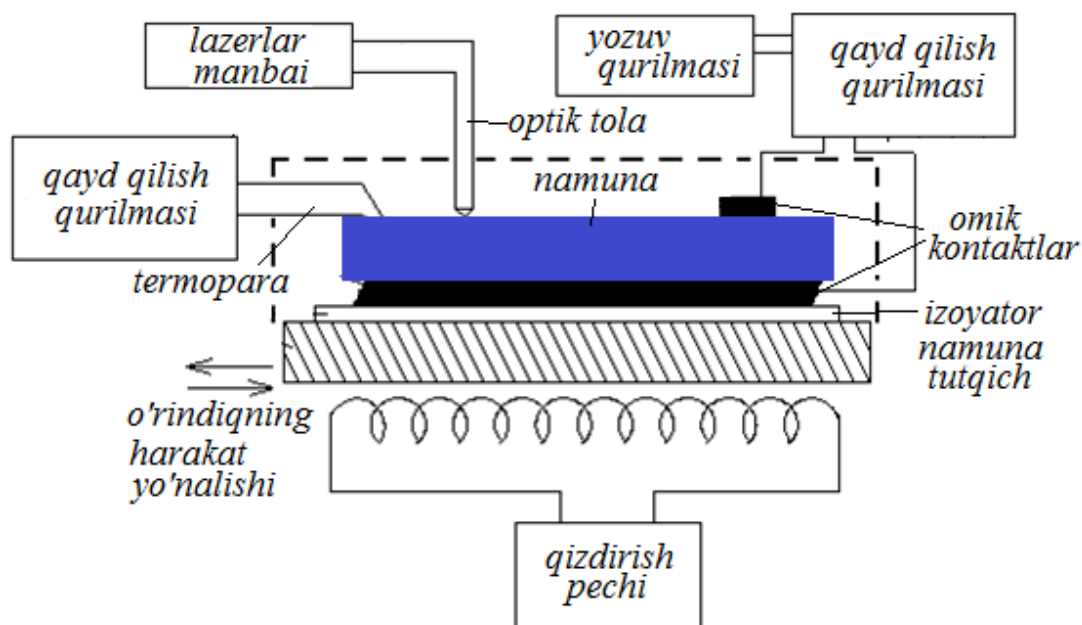
2.8 – rasmda mikro- va nanotuzilmalarning lazer nurlariga sezgirligini o'rganish qurilmaning sxemasi tasvirlangan. Qizdirish pechi kuchlanishi NOM-10 rusumli latr yordamida ta'minlanadi. Namuna temperaturasi xromel-alyumel termoparalar yordamida Sh-300 rusumli qayd qilish qurilmasi yordamida nazorat qilinadi. Shuningdek, namunalarning lazer nurlariga sezgirligi ham Sh-300 rusumli qayd qilish va unga paralel ulangan o'zi yozib boruvchi qurilma yordamida aniqlanadi. Tadqiqot ob'ekti termoizolyator (— — — —) bilan o'ralgan.

Yarimo'tkazgichli asboblarning elektrofizik xossalarini o'rganishda qatlam qarshiligini o'lchash vazifasi muhim ahamiyatga ega. Uni o'rganish uchun bir necha usullar ishlab chiqilgan, jumladan: a) to'rt zondli usul, (Valdes, Smits, Severin); b) sirt qarshiligini o'lchash usuli, (Xolm, Shumani, Mazur); v) Xoll effekti asosida qatlam qarshiligini o'lchash usuli, (Van-der-Pau); g) omik kontaktlar yordamida qatlam qarshiligini o'lchash va boshqalar [3÷10].

Namunalarining solishtirma qarshiligi 4 zondli hamda Van-der-Pau usullari yordamida o'rganildi. Zondlar diametri 0,5 mm bo'lgan volfram simdan tayyorlangan. Doimiy tok namunalarga IUS-1 qurilmada ta'minlanadi, kuchlanish Sh-300 rusumli o'lchash asbobi yordamida nazorat qilib boriladi. Uning o'lchash aniqligi va tezligi tok buyicha 3%, kuchlanish bo'yicha 5% tashkil qiladi. Solishtirma qarshilik (ρ) quyidagi formula orqali hisoblandi:

$$\rho = 4,53 \cdot \frac{U \cdot d}{I} \quad (2.4)$$

bu yerda; U - potentsiallar farqi, I - ishchi tok, d - namuna qalinligi.



2.8 – rasm. Mikro- va nanotuzilmalarning lazer nurlariga sezgirligini o‘rganish uchun mo‘ljallangan qurilmaning ishlash prinsipial sxemasi.

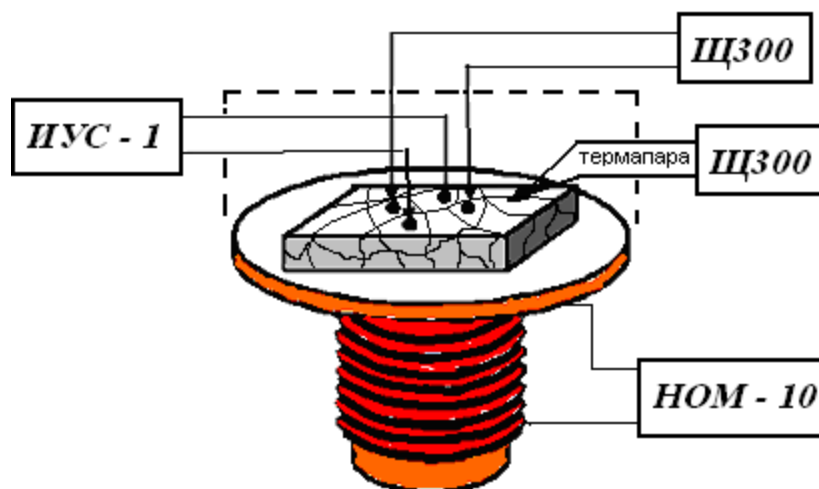
Namunalarning elektrofizik xarakteristikalarining temperaturaga bog‘liqligini o‘rganish uchun 300÷800 K oraliqlarda ishlovchi, Xoll effektiga asoslangan mahsus qurilma tayyorlandi va qo‘llanildi. Qurilmaning sxemasi 2.9-rasmda tasvirlangan. Bu qurilma tuzilishi jihatidan asosan uch qismdan iborat: birinchisi namunaga tok uzatuvchi IUS-1 qurilma; ikkinchisi, potentsiallar farqini qayd qilib boruvchi Sh-300 markali qurilma, o‘zi yozib boruvchi yozuv qurilmasi va nihoyat uchunchisi o‘rganilayotgan namunani 300÷800 K oraliqlarda qizdirish hamda namuna temperaturasi qayd qilib boruvchi Sh-300 markali qurilmaga ulangan xromel-alyumel termoparalardan iborat. Tadqiqot ob’ekti termoizolyator (— — — —) bilan o‘ralgan.

Bunda Xoll doimiysi quyidagicha aniqlandi:

$$R_x = 10^8 \frac{U \cdot d}{I \cdot H} \quad (2.5)$$

bu yerda; N - magnit maydon kuchlanganligi.

Magnit maydon kuchlanganligi qiymati kovak o'tkazuvchanli namunalar uchun 6000 *erst*ed, elektron o'tkazuvchanli uchun 3500 *erst*ed qilib olindi.



2.9-rasm. Xoll effektiga asoslangan mahsus qurilmaning sxemasi.

Namunalarning solishtirma qarshiliklari quyidagi formula yordamida aniqlandi:

$$\rho_x = 4,53 \cdot \frac{U \cdot d}{I} ff \quad (2.6)$$

bu yerda; ff - tuzatish koeffitsenti. Zaryad tashuvchilar harakatchanligi:

$$\mu_x = \frac{R_x}{\rho_x} \quad (2.7)$$

Zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi:

$$n = \frac{6,2 \cdot 10^{18}}{R_x} \quad (2.8)$$

Tadqiqotlar olib borish uchun namunalar 10x10 mm o'lchamlarda qirqildi. Namunalarning sirtiga 3-5 mm oralig'ida o'zaro simmetrik bo'lgan to'rta kontakt hosil qilindi. Solishtirma qarshilik hamda harakatchanlik (μ) ni aniqlash hamda hisoblash ishlarini yengillashtirish maqsadida, har ikkala hol uchun ishchi toki $I=4,53$ (mA) qilib olindi. Bunda yo'l quyilgan o'lchash xatoligi KDB-10 dan olingan namuna etaloni bilan 1÷5 % ni tashkil qiladi. Namunalarning elektrofizik parametrlari 300÷800 K oraliqlarida o'rganildi. Olingan natijalar termoelektron emissiya modeli yordamida taxlil qilindi.

Polikristal yarimo‘tkazgich elektr o‘tkazuvchanligining temperaturaga eksponensial bog‘liqligi Arrhenius qonuniga bo‘yinsunadi. O‘rtacha donadorlik o‘lchami $\langle a \rangle$, uzunligi L bo‘lgan plikristaldagi J_{th} tok quyidagicha ifodalanadi:

$$J_{th} = A^* \cdot T^2 \exp(-\beta(\zeta + \varphi))(1 - \exp(-\beta \cdot \langle a \rangle U / L)) \quad (2.9)$$

bu yerda, $U \langle a \rangle / L$ - bitta donadorlik chegaralariga tushuvchi kuchlanish. Odatda, bu kattalik kT/e ga nisbatan kichik. Bunday holatlarda o‘tkazuvchanlik (σ) ning (2.9) formuladagi kuchlanishga bog‘liqligi Teylor qatori yordamida aniqlanadi:

$$\sigma = \frac{J_{th} L}{U} = \frac{e}{k} A^* \cdot T \langle a \rangle \exp(-\beta(\zeta + \varphi)) \quad (2.10)$$

O‘tkazuvchanlikning faol bog‘liqligi eksperimental natijalar orqali topiladi.

$$\sigma = \sigma_{\infty} \exp(-E_{act}/kT) \quad (2.11)$$

Bu formuladagi E_{act} - o‘tkazuvchanlik uchun Arrhenius qonunidagi energiya faolligi, σ_{∞} - σ ning $1/T=0$ dagi qiymati. (2.11) va (2.12) formulalardan quyidagini hosil qilish mumkin:

$$E_{act} = e\zeta(T) + e\varphi(T) + kT \ln(eA^* \cdot T \langle a \rangle / k\sigma_{\infty}) \quad (2.13)$$

Termoelektron emissiya modeliga asosan donadorliklararo chegaralaridagi $e\zeta + e\varphi$ Fermi sath E_F ga teng:

$$E_F(T) = e\zeta(T) + e\varphi(T) \quad (2.14)$$

Polikristal yarimo‘tkazgich donadorligini monotuzilmadan iborat deb olsak, uning solishtirma qarshiligini quyidagicha ifodalash mumkin:

$$\rho_D = \langle a \rangle \exp(qE_g/kT) \quad (2.15)$$

Bu yerda, E_g - taqiqlangan zona kengligi. Taqiqlangan zona kengligini temperaturaga bog‘liqligini [8] asosida aniqlandi:

$$E_g(T) \approx E_g(0) - \frac{\alpha_1 T^2}{\alpha_2 + T} \quad (2.16)$$

Aynzinger [1] potensial to'siq balandligini vakansiya va tuzoqlar ionlanish energiyasining o'zgarishi bilan $\varphi = \mu_x + E$ bog'liqligini keltirgan. Bu yerda, μ_x - kimyoviy potensial, bu kattalik termoelektron emissiya modeliga asosan, Fermi energetik sathga ya'ni, legirlanish darajasiga bog'liq.

$$\mu_x = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{nh^3}{2\sqrt{2\pi m k T^2}}\right) \quad (2.17)$$

Bu yerda, n - zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi, zaryad tashuvchilar konsentratsiyasining temperaturaga bog'liqligi [6] ishdan olindi. h - Plank doimiysi, m – zaryad tashuvchilarning effektiv massasi. Potensial to'siq balandligi (φ) va μ_x (yoki E_f) ni bilgan holda, Ayzinger munasabatidan tuzoqlarning ionlanish energiyasi E_e ni aniqlash mumkin:

$$E = \varphi - E_f \quad (2.18)$$

Lokallashgan tuzoqlar asosan donadorliklararo chegara soha W kengligida joylashadi. Ikki tutashgan donadorlikning umumiy o'lchami har bir soha o'lchamlari yig'indisi orqali aniqlanadi: $L=2a+W$. φ va L ni bilgan holda tutashgan soha kengligini quyidagicha aniqlash mumkin [1, 2]:

$$W \approx \sqrt{\frac{2\varepsilon\varphi}{q^2 N_G}}, \quad (2.19)$$

bu yerda, $N_G \approx (\sqrt{n} + \frac{2}{L} \sqrt{\frac{2\varepsilon\varphi}{q^2}})^2$, $n \sim 2,46 \cdot 10^{17} \text{ sm}^{-3}$ – zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi, ε - yarimo'tkazgichning dielektrik singdiruvchanligi.

Donadoliklararo chegra sohalarining zaryad tashuvchilar harakatiga ta'sirini termoelektron emissiya usuli yordamida taxlil qilish aniq mulohaza yuritishga yordam beradi.

II bob Bo'yicha umumiy mulohaza va xulosalar

Bu boba tadqiqot metodlari, ularning tavsifi hamda mohiyatini yoritib berishga harakat qilindi. Bitiruv ishda oldinga qo'yilgan maqsadga erishish uchun quyidagi tadqiqot metodlari tanlandi va qayta ishlab chiqildi:

1. Moddalarni o'rganishning optik metodlari o'rganildi va ular yordamida mikro- va nanotuzilmali yarimo'tkazgichlarning tuzilishi va morfologiyasini aniqlash uchun rengen spectral mikrozonad analiz metodi tanlab olindi;

2. Mikro- va nanotuzilmali yarimo'tkazgichlar xossalarini o'rganish metodlari, xususan lazer nurlaridan foydalanish imkoniyatlari o'rganildi;
3. Tadqiqotlarni samarali olib borish uchun tajriba usullarining yangi "modifikatsiya"larini ishlab chiqildi. Yangi modifikasiyaga ko'ra, tadqiqot qurilmasi lazer nurlar manbai, mikro- yoki nanotuzilmali yarimo'tkazgich, ularni bog'lovchi optik tolalardan iborat;

Tanlangan metodlar va metodlarning yangi modifikasiyasi mikro- yoki nanotuzilmali yarimo'tkazgichlarning xossalarini o'rganishda, kutilayotgan natijalar bu bunday tuzilmalardagi yangi kinetic hodisalarni tushuntirishda muhim ahamiyatga ega bo'lishi mumkin.

Dissertatsiya ishida qo'llanilgan tadqiqot usullari o'quv jarayonida xususan fizik mutaxassislar tayyorlashda, ularga mikro- va nano- o'lchamli tuzilmalarning xossalari, ularda yuz beruvchi fizik jarayonlarni o'rgatishda orqali ularni ilmiy tadqiqot ishlariga jalb etishda samarali natijalar beradi.

III bob LAZER NURLARINING MIKRO- VA NANOO'LCHAMLI YARIMO'TKAZGICHLARGA TA'SIRI

XXI asr fan va texnika yutuqlaridan biri mikro- va nanoo'lchamli materiallar, ularni olish texnologiyalari, ular asosida yaratilayotgan turli elektron qurilmalar hisoblanadi. Bunday o'lchamdagi materiallar mikro- va nanoelektronika, fotoenergetika, sensorika, meditsina va boshqa sohalarning shiddat bilan rivojlanishiga olib kelmoqda. Mikro- yoki nanoo'lchamli tuzilmalar olish

murakkab, o'ta aniqlikda ishlaydigan qurilma va metodlar yordamida amalga oshiriladi.

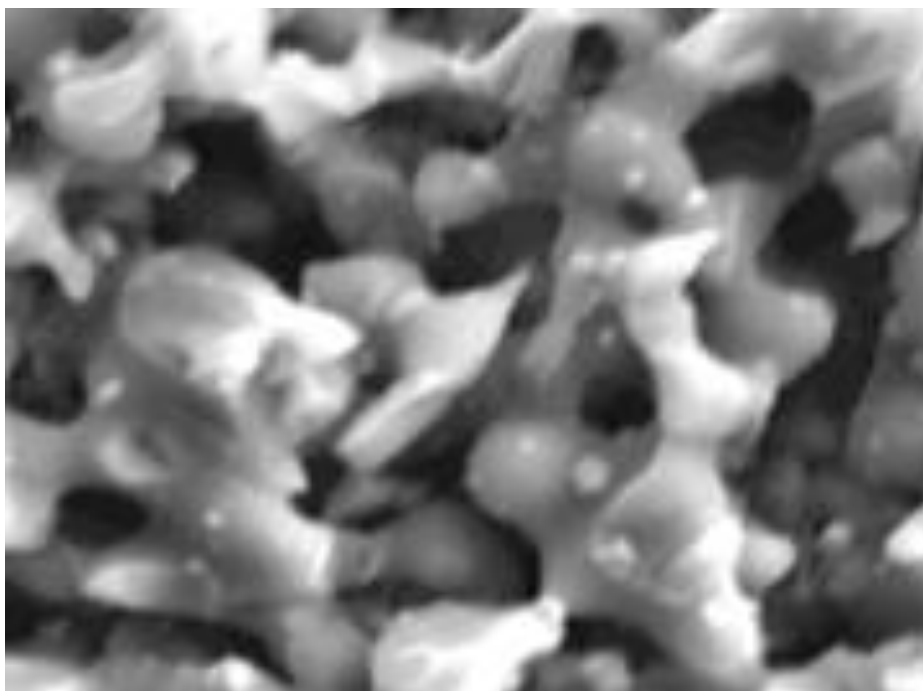
3.1. Mikro- va nanoo'lchamli yarimo'tkazgichlarning tuzilishi va morfologiyasi

Yarimo'tkazgichlarning tuzilishini o'rganish uchun optik metodlardan foydalanildi. Bu metodlar o'rganilayotgan modda hajmidan yutilgan hamda qaytgan nurlar signallarini taxlil qilishga asoslangan. Bu signallarning hosil bo'lish mexanizmlari modda hajmida yutilgan nurlar dastasining atom yoki molekulalar bilan o'zaro ta'siri tufayli yuz beruvchi fizik jarayonlarga bog'liq. Shuning uchun moddalarning tuzilishini tadqiq qilishning optik metodlari, nurlar dastasining atom yoki molekulalar o'zaro ta'siri tufayli yuz beruvchi fizik jarayonlarni o'rganish hozirgi kundagi dolzarb muammolardan biri hisoblanadi.

Mazkur ishda mikroo'lchamli kremniyning tuzilishi va morfologiyasini o'rganish uchun rentgen-spektral mikrozonddan taxlil metodidan foydalanildi. Hozirgi kunda bu metod asosida ishlaydigan ko'plab turdagi qurilmalar yaratilgan. Bizning tadqiqotlar "JEUL" qurilmasida olib borildi. U ($E=0.1\div 30$ kV bo'lib) o'lchami 1 nm gacha mikrotuzilmalarning mikrofotografiyasini 25 dan 650 000 martagacha kattalashgan holatda olish hamda kimyoviy tarkibini 10^{-3} % gacha aniqlash imkonini beradi. Bu moddaning hajmi va uning sirt sohalarini tadqiq qilishda samarali natijalar beradi. Lazer nurlar dastasi yordamida kristal sirtlarini o'rganishda to'liqlik yoki nuqtaviy tekshirish usullaridan foydalaniladi. Nuqtaviy tekshirish usulida namunaning belgilangan nuqtadagi xarakteristikalarini olinsa, to'liqlik usulda ikkilangan nurlari kristal sirti bo'ylab harakatlanib uning kimyoviy tarkibini taxlil qiladi.

3.1 – rasmda, mikroo'lchamli kremniy plastinaning mikrofotografiyasi keltirilgan. Tadqiqotlar olib borish uchun kukunli usulda olingan kremniy plastinasidan foydalanildi. Rasmdan ko'rinadiki, bu usulda olingan plastina tuzilishi jihatidan polikristal xususiyatga ega. Mikro kremniy tuzilishi jihatidan kristalchalar

va ularning tutashgan sohalaridagi chegaraviy sohalaridan iborat. Chegaraviy sohalarining hosil bo'lishi uning tarkibidagi krishmalarning notekis taqsimlanishi bog'liq bo'lishi mumkin. Olingan natijalarga oydinlik kiritish uchun namunaning rentgen-spektral xarakteristikasi o'rganildi.

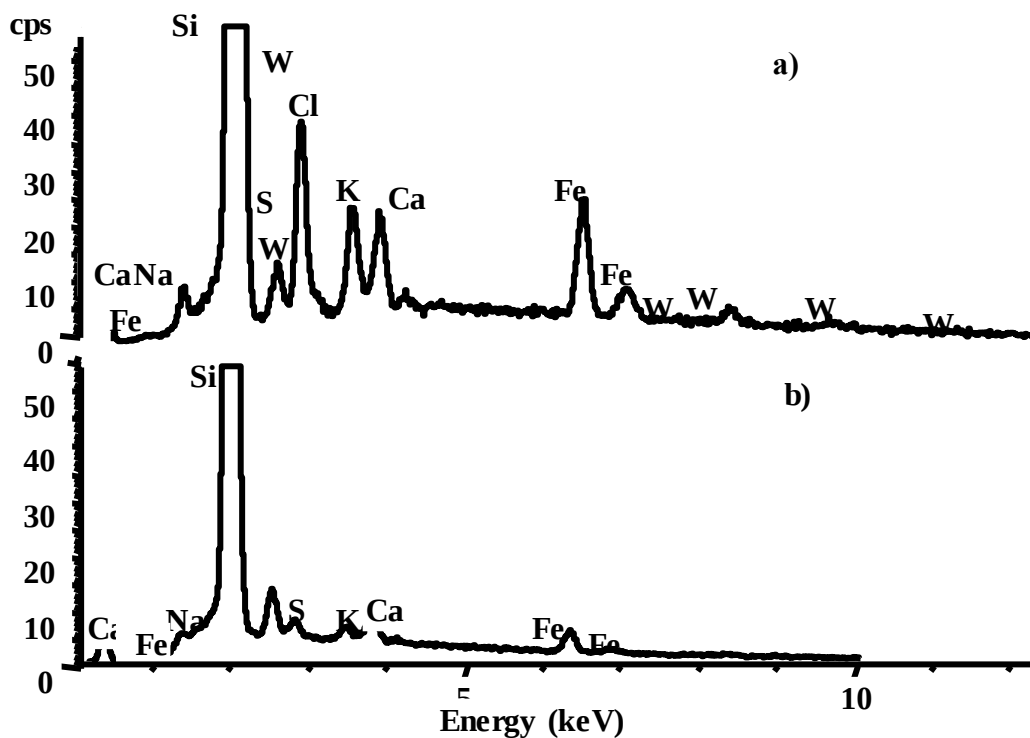


3.1 – rasm. Mikro- va nanotuzilmalarning mikrofotografiyasi.

a) – mikroo'lchamli kremniy, b) – zol-gel metodi yoedamida olingan nanotuzilma.

3.2 – rasmda, mikroo'lchamli kremniyning rentgen-spektral xarakteristikasini o'rganishda olingan natijalar tasvirlangan. Dastlabki xom ashyo sifatida, tarkibida ishqoriy metal atomlari mavjud bo'lgan polikristal tuzilmali kremniydan foydalanildi. Rentgen-spektral mikrozonnd taxlil metodiga asosan tadqiqotlar nuqtaviy hamda to'lqinli usullarda olib borildi. Nuqtaviy usulda olingan natijalardan ko'rinadiki, mikrokremniy kristalchasi kremniy atomlaridan iborat ekanligi aniqlandi. To'lqinli usul qollanilganda ya'ni zond kristalchadan uning sirt sohasi tomon harakatlantirilganda bu sohada turli kimyoviy elementlar mavjudligi kuzatildi. Begona kirishma atomlarining kristal hajmiga kirib qolishi kukunlash jarayoni bilan bog'liq bo'lishi mumkin. Odatda, kukunlash texnologiyasiga asosan

tashqi muhit tomonidan kirib qoluvchi begona kirishma atomlari kukunlarning ifloslanishiga olib keladi. Ulardan qutilish maqsadida kukunlarni tozalashning magnit usulidan foydalaniladi.



3.2 – rasm. Kirishmalarning rentgen spektral xarakteristikalar.
a) tozalanmagan b) magnit usulida tozalangan plastinalarga tegishli.

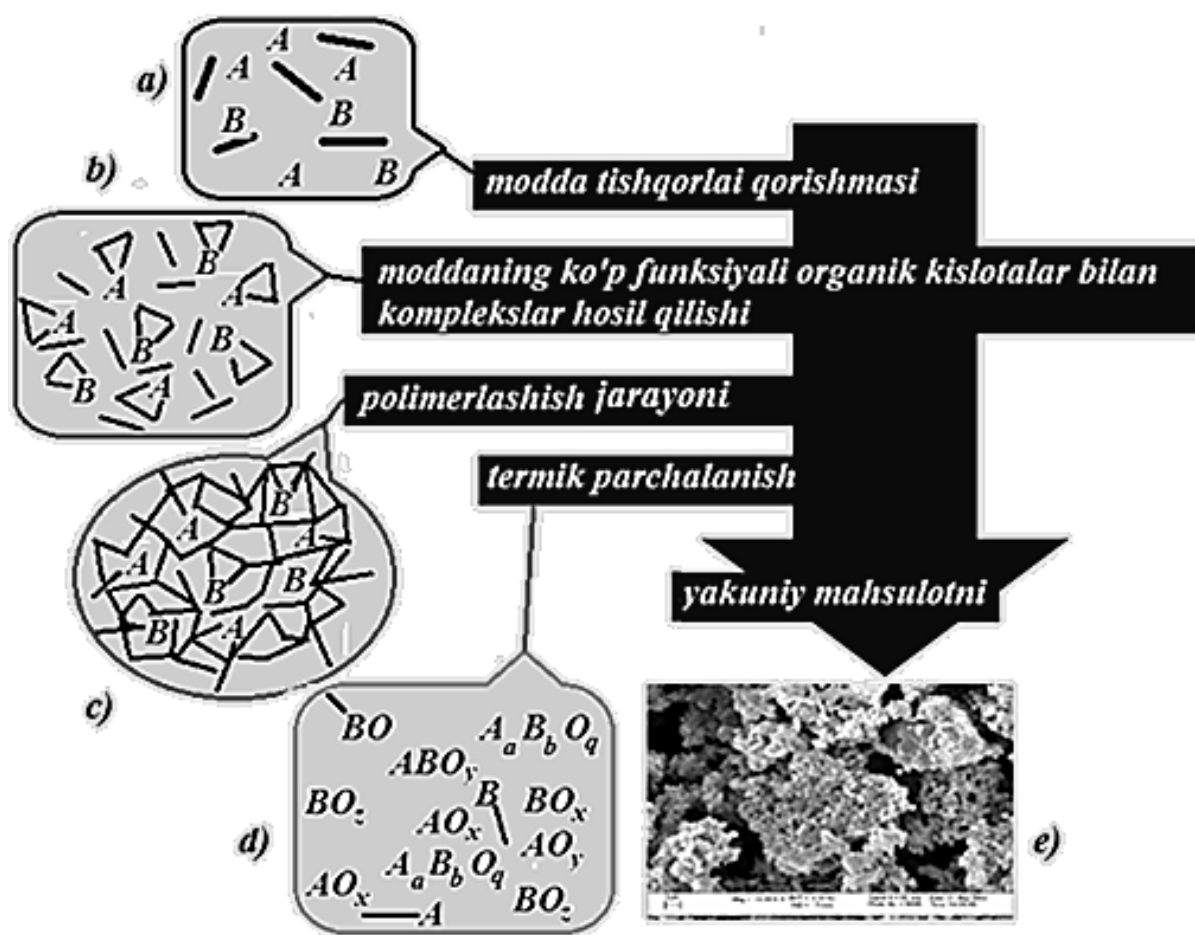
Mazkur ishda, tozalanmagan hamda magnit usulida tozalangan namunalarni birgalikda oʻrganildi. 3.2a – rasmdan koʻrinadiki, tozalash ishlari amalga oshirilmagan namunalarda turli metal moddalar masalan, Fe, Ca, S va boshqa kirishmalar mavjudligi aniqlandi. Bu kukunlash jarayonida bolgʻa yoki poʻlat sharchalarga tegishli zarrachalarning kukunlar tarkibiga kirib qolganidan dalolat beradi. Kukunlar magnit maydonidan oʻtkazilgandan soʻng yuqorida aniqlangan kirishmalar signallari sezilarli darajada kamayganligi aniqlandi (3.2b – rasm). Tadqiqot natijalaridan yaqqol koʻrsatadiki, magnitik usul kukunlarni turli chiqinda kirishma atomlaridan 90÷95% tozalash imkonini beradi.

Mikrokremniy kristalchasi chegara sohalarida turli kimyoviy birikmalar mavjud boʻlib, ularning miqdori kristalcha markazidan sirt tomonga ortib borgan,

lekin, kremniy atomlarining miqdori kamaygan holatda taqsimlanganligi aniqlandi. Keltirilgan natijalar kristalcha va uning sirtidagi g'adir-budirliklarning eng chetki sohasiga to'g'ri keladi. Bu o'rganilayotgan ob'ekt umumiy hajmining $0,03 \div 0,1$ % ni tashkil qiladi. Olingan natijalarni adabiyotlarda keltirilgan natijalar bilan taqqoslab ko'raylik.

Mazkur ishda olingan natijalarni taqqoslash uchun nanotuzilmalarning hosil bo'lishiga oid tadqiqot natijalari taxlil qilib chiqildi. 3.3 – rasmda, zol-gel metodi yordamida nanotuzilmalar olish va ularning polikristal xususiyatga ega bo'lishi tasvirlangan. Dastlab A va B moddalarning ishqoriy qorishmasi hosil bo'ladi (a-rasm). Zol olish jarayonida A va B moddalar kislotalar bilan reaksiyaga kirishib turli komplekslar hosil qiladi (b-rasm). So'ngra, undan gel ajratib olinadi. Gel quritilganda polimerlashish jarayoni yuz beradi (c-rasm). Termik ishlov berish bilan hosil bo'lgan turli komplekslarning parchalanishi kuzatiladi (d-rasm). Bu jarayonda A va B moddalar turli kimyoviy elementlar masalan, kislorod bilan birikib oksidlar hosil qilishi mumkin. Yakuniy mahsulot nanoo'lchamlarda bo'lib, uning tuzilishi polikristal xususiyatga ega bo'ladi (e-rasm).

Ko'rinadiki kristalchalarning polikristal xususiyatga ega bo'lishi uning o'lchamiga bog'liq emas. Hatto nanotuzilmalar sintez qilish jarayonida atomlarning notekis taqsimlanishi kristalning sirt sohalari panjaralarida tartibsiz holatlarni paydo qiladi. Bu noqulaylik kristal o'lchami ortib borishi bilan umumiy hajmga nisbatan sezilarli bo'lmaydi. Biroq, bir necha atomdan iborat nanoo'lchamli kristal panjarada atomlarning notekis taqsimlanishi kvanto'lchamli jarayonlarni paydo bo'lishiga olib keladi. Bunday tuzilma mikroskopik holatlarda qaralganda polikristal tuzilmadan iboratligi bilinadi. Bizning holatda, termik ishlov berish bilan 10 nm o'lchamdagi kukunlarning birikib $1 \div 10$ mkm o'lchamli polikristal tuzilmalar hosil bo'ladi. Kristalchalar o'rtasida krishmalarning notekis taqsimoti chegaraviy sohalarning hosil bo'lishiga olib keladi.



3.3 – rasm. Zol-gel metodi.

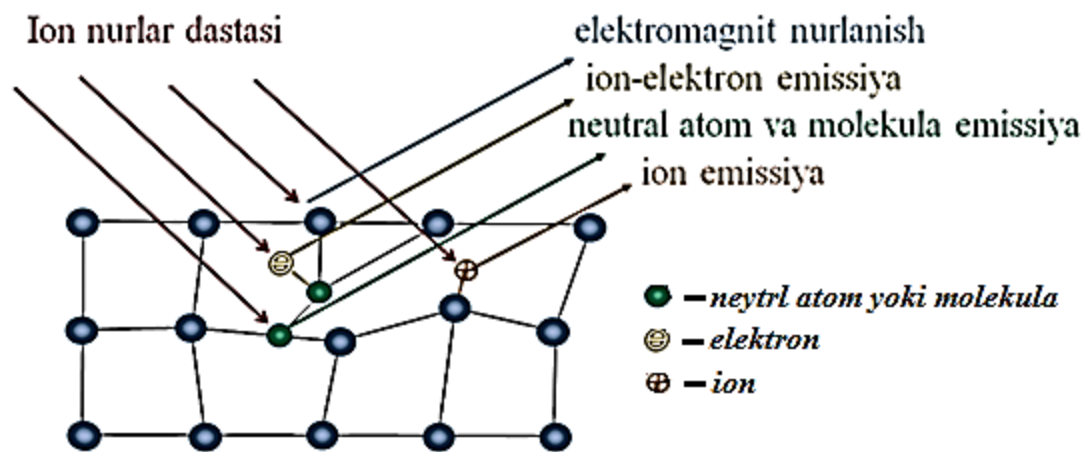
Xulosa qilib aytganda, bu metodlar nafaqat moddaning tuzilishi yoki morfologiyasini o'rganishda balki, turli modda yoki tuzilmalar yaratishda ham keng qo'llanilishi mumkin. Bu mikro- yoki nanoelektronikaning rivojlanishida muhim ahamiyatga ega.

3.2. Kristallarni o'rganishda lazerlarning kristal atomi yoki molekulalari bilan o'zaro ta'siri mexanizmlari

Yuqorida mikrokremniyning morfologiyasini o'rganishda olingan natijalarni ko'rib chiqdik. Kristalning kimyoviy tarkibi yoki atomar holati lazer nurlarining ular bilan o'zaro ta'siri asosida aniqlanadi. Quyida lazerlar nurlarining Kristal

atomi bilan o'zaro ta'siri jarayonida yuz beruvchi fizik jarayonlarni ko'rib chiqaylik. Ma'lumki, tabiatda sof atom yoki molekulalardan iborat modda bo'lmaydi. Uning tarkibida o'sha moddani olish yoki kimyoviy ishlov berish jarayonida tashqi muhitdan kirib qolgan neytral kirishma atomi yoki molekulalari bo'lishi mumkin. Bunday noqulayliklar yarimo'tkazgichlar materialshunoslikdagi asosiy muammalardan biri hisoblanadi.

Yutilgan nurlar modda hajmidagi turli atom yoki molekulalar bilan o'zaro ta'sirlashganda quyidagi jarayon yuz beradi. Bizning fikrimizcha, yutilgan nurlar neytral atom yoki molekulalar bilan o'zaro ta'sirlashganda, ularning atomar yoki molekulyar bog'ini uzib, neytral atom yoki molekulalar emissiyasini hosil qiladi (2.7-rasmga qarang). Bu hodisa neytral atom yoki molekulalar emissiyasi deb ataladi. Huddi shunday hodisa elektronlar bilan ham yuz berishi mumkin. Yutilgan nur elektronlar bilan ta'sirlashganda elektronni o'z o'rnidan chiqarib yuborishi mumkin. Natijada ion-elektron juftligi hosil bo'ladi. Bu hodisa ion-elektron emissiya deb ataladi. To'qnashuv uzilgan bog'dagi elektronlarga bog'liq bo'lsa, ham shunday jarayon yuz beradi. Uzilgan bog'da nafaqat elektron balki, ion bo'lishi ham mumkin. Agar yutilgan nur uzilgan bog'dagi ion bilan to'qnashsa, bo'sh o'ringa elektron joylashib qoladi. Natijada bo'sh o'rin bartaraf bo'ladi. Bu hodisa ion emissiya deb ataladi. Bo'sh o'ringa nurga tegishli elektron yoki o'z o'rnini tashlab chiqib, erkin holatga o'tgan elektron kelib o'tirish ham mumkin. Ko'rib o'tilgan hodisalar hisobiga qaytgan nurlarning to'lqin uzunligi va chastotalari bir-biridan farq qilib, ular ekranda turli tasvirlar hosil qiladi. Yakunda modda haqida to'la ma'lumot olinadi.



2.7 – rasm. Ion nur dastalarining atom yoki molekulalarda sochilish sxemasi

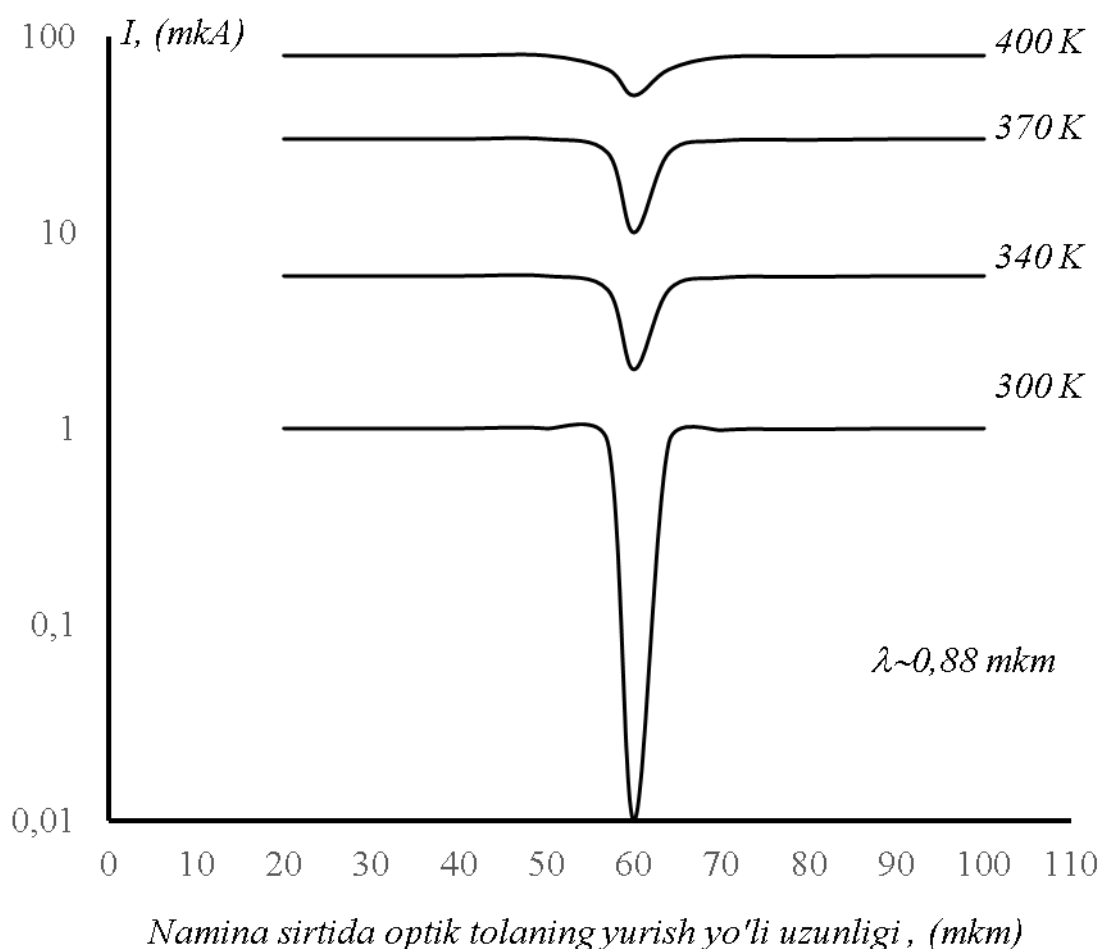
Kristal sirtlarini oʻrganishda toʻlqinli hamda nuqtaviy tekshirish usullaridan foydalaniladi. Nuqtaviy tekshirish usulida namunaning belgilangan nuqtadagi xarakteristikalarini olinadi. Toʻlqinli usulda ikkilangan elektron nurlari kristal sirti boʻylab harakatlanib uning kimyoviy tarkibini taxlil qiladi. Bizning holatda har ikkala usullardan foydalanildi.

3.3. Lazer nurlarining polikristall tuzilmalari xossalariga ta'siri

Oldingibanda yarimo'tkazgichli tuzilmalarning mikrotuzilmasi polikristal tuzilishga ega ekanligini ko'rib o'tdik. Masalan, polikristal kremniy tuzilishi jihatidan, donadarlik va donadorliklararo chegara sohalaridan iborat. Shuningdek, zol-gel metodi bilan olingan nanotuzilmalar ham tuzilishi jihatidan, polikristal tuzilishga ega. Adabiyotlar taxlillaridan ko'rinadiki, polikristal yarimo'tkazgichlarning asosiy elektrofizik yoki fotoelektrik, shuningdek, boshqa fizik xossalari donadorliklararo chegara sohalarining xususiyatlariga bo'g'liq. Mikroo'lchamli polikristal yarimo'tkazgichlarning fizik xossalari donadorliklararo chegara sohalarining elektron holatlari bilan izohlanadi. Polikristal yarimo'tkazgichlar olish jarayonida saqlanib qolgan qoldiq kirishmali holatlar bu sohada turli rekombinasion markazlarni hosil qilib, zaryad tashuvchilar uchun potensial to'siq bo'lib qoladi. Bu esa o'z navbatida polikristal yarimo'tkazgichlarning boshqa xarakteristikalariga salbiy ta'sir ko'rsatadi. Nanotuzilmalarda esa bu sohada yuz beruvchi fizik jarayonlar kvant o'lchamli effektlar asosida tushuntiriladi. Nanotuzilmali yarimo'tkazgichlar olish jarayoni murakkab texnologiyalarni talab qiladi. Mazkur ishda bunday tuzilmalarni olish imkoniyati bo'lmadi. Biroq ishda mikroo'lchamli polikristal kremniy naminalaridan foydallanildi.

Mikroo'lchamli polikristal kremniyning xossalariga lazer nurlarining ta'sirini o'rganish uchun donadorliklar o'lchami 200-300 mkm bo'lgan polikristal kremniydan foydalanildi. Bu turdagi polikristall kremniyning mikrotuzilmasiga bog'liq natijalar oldingi bandlarda ko'rib o'tilgan. Lazer nurlari manbai sifatida $\lambda \sim 0,88$ mkm to'lqin uzunligidagi lazerlardan foydalanildi. Polikristall kremni donadorliklar va uning chegara sohalarini alohi-alohida o'rganish uchun optik tolalardan foydalanildi. Optik tola diametri ~ 40 nanometrni tashkil qiladi. Optik tola namina sirtiga perpendikulyar joylashgan. Namuna tutgich namuna bilan birgalikda xy tekisligi bo'ylab erkin harakat qiladi. Qurilmaning tuzilishi va uning ishlash prinsipi ikkinch bobda keltirilgan.

2.8-rasmda dastlabki olingan natijalar keltirilgan. Olingan natijalardan ko'rinadiki, donadorlik va donadorliklararo chegara sohalarining lazer nurlariga sezgirligi bir-biridan farq qiladi. Jumladan, lazer nurlari donadorlik sirtiga tushganda uning lazer nurlariga ta'siri sezilarli darajada bo'lsa, optik toladantushyotgan lazer nurlari donadorliklararo chegara sohalariga yaqinlashishi bilan fototok kamayib hatto uning qiymati nul holatgacha o'zgarishi mumkin ekan. Aksincha, optik tola orqali tushayotgan lazer nurlar dastasi donadorliklararo chegara sohalaridan donadorlik sirtiga o'tganda fototokning qiymati qayta ortadi. Bu holatni quyidagicha tushuntirish mumkin.



2.8-rasm. Polikristal kremniy donadorlik va donadorliklararo chegara sohalariniing lazer nurlariga sezgirligi.

Oldingi banda ko'rib o'tdikki, polikristall kremniy kristalchasi chegara sohalarida turli kimyoviy birikmalar mavjud bo'lib, ularning miqdori kristalcha

markazidan sirt tomonga ortib borgan, lekin, kremniy atomlarining miqdori kamaygan holatda taqsimlangan. Ular birinchidan, kristalcha sirtida turli g'adir-budirliklarning hosil bo'lishiga olib kelsa, ikkinchidan, ular zaryad tashuvchilar uchun rekombinasiya markazlari hisoblanadi. Zaryad tashuvchilarning bu markazlarda ushlanishi natijasida birinchidan donadorliklararo chegara sohalarida solishtirma qarshiligining ortishiga, bu esa o'z navbatida polikristall yarimo'tkazgichlarning umumiy solishtirma qarshiligining ortishiga olib keladi. Ikkinchidan, bu jarayonda rekombinasiya markazlarida ushlanayotgan zaryad tashuvchilar konsentrasiyasining ortishi umumiy zaryad tashuvchilar konsentrasiyasining kamayishiga olib keladi. Shuningdek, bu jarayonda tok ham kamayadi. Demak, lazer nurlari ta'sirida hosil bo'lgan elektron-kovak juftliklari bu markazlar ta'siriga tushib bartaraf bo'ladi. Ya'ni zaryad tashuvchilarning rekombinasiya markazlarida ushlanadi. Bu esa fototokning kamayishiga olib keladi. Hozirgi vaqtda bunday markazlarni boshqarish usullarini o'rganish mikro- va nanoelektronika hamda fotoenergetikadagi asosiy muammolardan biri hisoblanadi.

Adabiyotlar taxlillaridan ko'rinadiki, bir vaqtning o'zida ham monoxromatik nurlar hamda temperatura ta'sir qilinganda donadorlik hamda donadorliklararo chegara sohalarida elektron kovak juftliklari hosil bo'ladi. Bu jarayon kirishmali issiqlik fotovoltaiq effektlar asosida tushuntirilgan. Bizning holatda ham temperatura ortib borishi bilan donadorlik chegara sohalarida elektron kovak juftliklari hosil bo'ladi. Bu esa o'z navbatida fototokning ortishiga olib keladi. Olingan natijalar asosida quyidagi xulosa va mulohazalarni yuritish mumkin.

Birinchidan, optik tolali lazerlarning qo'llanilishi polikristall xususiyatga ega bo'lgan mikro- yoki nanoo'lchamli tuzilmalarning donadorlik va donadorliklararo chegara sohalarini aniqlash imkonini beradi. Ikkinchidan, optoelektronika va fotoenergetikada optik tolali lazerlarning qo'llanilishi polikristall yarimo'tkazgichlardagi donadorliklararo chegara sohalarini boshqarish imkonini beradi. Uchinchidan, olingan natijalar mikro- va nanotuzilmali yarimo'tkazgichlarning fizik xossalarini tushuntirishda muhim ahamiyatga ega.

III bob Bo'yicha umumiy mulohaza va xulosalar

Mazkur bobda olingan asosiy natijalar va mulohazalar sifatida quyidagilarni keltirish mumkin.

1. Optik metodlar yordamida mikro- va nanoo'lchamli yarimo'tkazgichlarning tuzilishi va morfologiyasi o'rganildi. Olingan natijalardan ko'rinadiki, har ikkala turdagi yarimo'tkazgichlar tuzilishi jihatidan polikristal xususiyatga xos bo'lib, donadorlik va donadorliklararo chegara sohalaridan iborat. Yarimo'tkazgich olish jarayonida saqlanib qolgan qoldiq kirishma atomlari mikroo'lchamli yarimo'tkazgichlarning donadorliklararo chegara sohalarining, sintez jarayonida termodinamik muvozanatning o'zgarishi nanoo'lchamli tuzilmalarning polikristal xususiyatga xos bo'lishiga olib keladi.

2. Optik tolali lazerlarning qo'llanilishi polikristall xususiyatga ega bo'lgan mikro- yoki nanoo'lchamli tuzilmalarning donadorlik va donadorliklararo chegara sohalarini aniqlash imkonini beradi.

3. Optoelektronika va fotoenegetikada optik tolali lazerlarning qo'llanilishi polikristall yarimo'tkazgichlardagi donadorliklararo chegara sohalarini boshqarish imkonini beradi.

Xulosa qilib aytganda, olingan natijalar mikro- va nanotuzilmali yarimo'tkazgichlarning fizik xossalarini tushuntirishda muhim ahamiyatga ega.

Dissertatsiya ishida olingan asosiy natijalar va xulosalar

Mavzu bo'yicha olingan asosiy natijalar va xulosalar sifatida quyidagilarni keltirish mumkin:

Santimetr to'lqin uzunligidagi elektromagnit to'lqinlarni kuchaytiradigan molekulyar generatorlar mazerlar deb atalsa, qattiq jisimli, optik diapazonida ($\lambda = 6943 \text{ A}^\circ$) ishlaydigan optik generator esa lazerlar deb ataladi. Nurni kuchaytiradigan aktiv muxitning tipiga qarab lazerlar - qattiq jisimli, gazli, yarimo'tkazgichli va suyuqlikli lazerlarga bo'linadi. Lazer nurlardan metallarni kesishda, payvandlashda, buyumlardagi nuqsonlarni aniqlashda, medisinada nozik operatsiyalarni bajarishda, nihoyatda toza materiallar olishda, o'lchash texnikasida, aloqada ham keng foydalaniladi.

II boba tadqiqot metodlari, ularning tavsifi hamda mohiyatini yoritib berishga harakat qilindi. Bitiruv ishda oldinga qo'yilgan maqsadga erishish uchun quyidagi tadqiqot metodlari tanlandi va qayta ishlab chiqildi:

- Moddalarni o'rganishning optik metodlari o'rganildi va ular yordamida mikro- va nanotuzilmali yarimo'tkazgichlarning tuzilishi va morfologiyasini aniqlash uchun rengen spectral mikrozonad analiz metodi tanlab olindi;
- Mikro- va nanotuzilmali yarimo'tkazgichlar xossalarini o'rganish metodlari, xususan lazer nurlaridan foydalanish imkoniyatlari o'rganildi;
- Tadqiqotlarni samarali olib borish uchun tajriba usullarining yangi "modifikatsiya"larini ishlab chiqildi. Yangi modifikatsiyaga ko'ra, tadqiqot qurilmasi lazer nurlar manbai, mikro- yoki nanotuzilmali yarimo'tkazgich, ularni bog'lovchi optik tolalardan iborat;

Tanlangan metodlar va metodlarning yangi modifikatsiyasi mikro- yoki nanotuzilmali yarimo'tkazgichlarning xossalarini o'rganishda, kutilayotgan natijalar bu bunday tuzilmalardagi yangi kinetik hodisalarni tushuntirishda muhim ahamiyatga ega bo'lishi mumkin.

III bobda olingan asosiy natijalar va mulohazalar sifatida quyidagilarni keltirish mumkin.

- Optik metodlar yordamida mikro- va nanoo'lchamli yarimo'tkazgichlarning tuzilishi va morfologiyasi o'rganildi. Olingan natijalardan ko'rinadiki, har ikkala turdagi yarimo'tkazgichlar tuzilishi jihatidan polikristal xususiyatga xos bo'lib, donadorlik va donadorliklararo chegara sohalaridan iborat. Yarimo'tkazgich olish jarayonida saqlanib qolgan qoldiq kirishma atomlari mikroo'lchamli yarimo'tkazgichlarning donadorliklararo chegara sohalarining, sintez jarayonida termodinamik muvozanatning o'zgarishi nanoo'lchamli tuzilmalarning polikristal xususiyatga xos bo'lishiga olib keladi.

- Optik tolali lazerlarning qo'llanilishi polikristall xususiyatga ega bo'lgan mikro- yoki nanoo'lchamli tuzilmalarning donadorlik va donadorliklararo chegara sohalarini aniqlash imkonini beradi.

- Optoelektronika va fotoenegetikada optik tolali lazerlarning qo'llanilishi polikristall yarimo'tkazgichlardagi donadorliklararo chegara sohalarini boshqarish imkonini beradi.

Dissertatsiya ishida hal qilingan muammolar lazerlar texnologiyasi, ularda optik tolalardan foydalanish muammolar, olingan natijalar mikro- va nanotuzilmali yarimo'tkazgichlarning xossalari, ularda yuz beruvchi jarayonlarni tushuntirishda muhim ahamiyatga ega.

**Magistrlik dissertatsiyasi mavzusi bo'yicha nashr etilgan ilmiy
ishlar ro'yxati**

Foydalanilgan adabiyotlar ro'yxati

1. Поликристаллические полупроводники. Физические свойства и применения: пер. с англ. под. ред. Г. Харбек (М., Мир, 1989).
2. Л.О.Олимов. Поликристал кремний олиш жараёнида мураккаб шаклдаги микробўшлиқларнинг ҳосил бўлиши ҳақида. ФФТЗМ-1 республика конференция тўплами, СамДУ, Самарканд, 11-12 декабрь 2009, 123-124 бет.
3. M. Mo'yidinova. Polikristal yarimo'tkazgich donadorliklararo chegaralarida zaryad ko'chish jarayonlarini o'rganish. Magistrlik dissertatsiyasi. 2013 y. 69 bet.
4. A.N. Ignatov. Optoelektronika i nanofotonika. Sankt-Peterburg. Moskva. Krasnodar. 2011.
5. *Примерная краткая история нанонауки и нанотехнологии.*
<http://www.nanonewsnet.ru/blog/birger/primernaya-kratkaya-istoriya-nanonauki-nanotekhnologii>
6. А.В. Астахов, Ю.М. Широков. Квантовая физика М., Наука, 1983.
7. E.L. Ivchenko, R.Ya.Rasulov. Nanofizikaning nazariy asoslari. Farg'ona davlat universiteti. Qo'llanma. 2013 y.
8. Квантовая механика. http://ru.wikipedia.org/wiki/Квантовая_механика
9. С. Г. Моисеев, С. В. Виноградо. Основы нанофизики. Ульяновс. 2010
10. Тимошенко Виктор Юрьевич. Фундаментальные основы нанотехнологий. МГУ.

11. L.O. Olimov. Nanofizika asoslari. O'quv qo'llanma. Toshkent, Yangi asr avlodi, 2014 y. 140 bet.
12. <http://go.mail.ru/search?q=Suyuq+kristalli+nanoelektron+qurilmalar>
13. <http://nova.rambler.ru/search?query=Optik%20tolali&page=2>