

**O'ZBEKISTON RESPUBLIKASI OLIIY VA O'RTA MAXSUS TA'LIM  
VAZIRLIGI**

**SH.A.KARIMOV**

**METALLARNI TUZILISHI VA  
DETALLAR SIFATINI NAZORATI**

**DARSLIK**

**Toshkent-2019**

## **UDK 620.1(075.8)**

Taqrizchilar: **Risbaev A.C.** – ToshDTU «Umumiy fizika» kafedrası professori,  
f.m.f.d.

**Abidov A.** – OKMK «Nodir metallar va qattiq qotishmalar» ilmiy  
ishlab chiqarish birlashmasi «Nanotexnologiya va  
kompozit materiallar» laboratoriyasi bolim boshlig',  
PhD.

**Tursunqulov O.M.**- O'zR Innovasion rivojlanish vazirligi  
qoshidagi yoqori texnologiyalar markazi k.i.x.,  
f.m.f.n.

**Karimov SH.A.** Metallarni tuzilishi va detallar sifatini nazorati: Darslik –T.:  
2019. 180 bet.

Darslik metall materiallar tuzilishi va ulardan tayyorlangan detallarni sifatini nazorat qilishda qo'llaniladigan elektron mikroskopik, rentgenostrukturaviy, spektral, mikrorentgenostrukturaviy, magnitli, akustik tadqiqot usullarining fizikaviy asoslarini o'rganadi. Tadqiqot qilish usullari taxlil qilingan va tadqiqot ob'ektlariga qo'yiladigan talablar keltirilgan. Texnikani qo'llash usullari, shu jumladan rasterli va transmission elektron mikroskoplari, tunnel mikroskopi va spektral qurilmalar qo'llaniladigan qurilmalarning ishlash tamoyillari va qurilmalari tavsiflanadi. magnit akustik nazorat qilish.

Darsdik 5320100- Materialshunoslik va yangi materiallar texnologiyasi yo'nalishi talabalari va 5A320101 – Materialshunoslik va materiallar texnologiyasi mutaxassisligi magistrilariga mo'ljallangan.

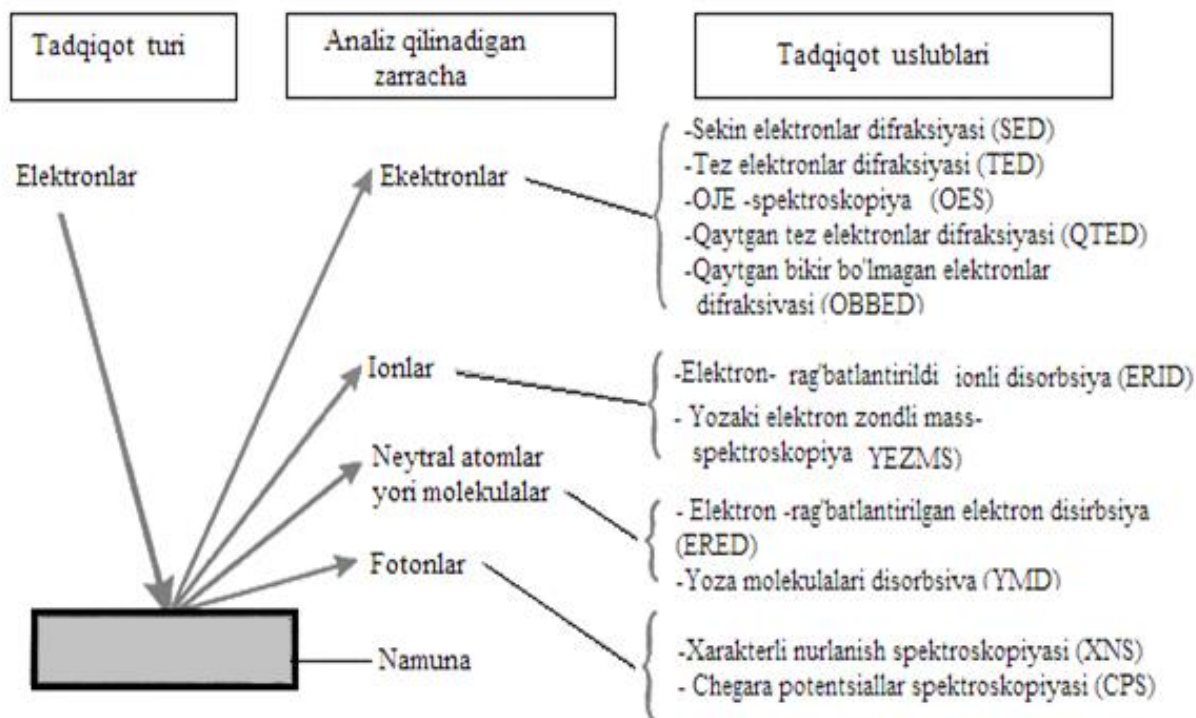
## KIRISH

Iste'molchi tomonidan materialdan foydalanishni belgilaydigan eng muhim mezonlar uning (jismoniy, kimyoviy, mexanik, texnologik) xususiyatlari hisoblanadi. Materiallarning xossalari ularning tuzilishi bilan aniqlanadi. Shuning uchun materiallar tarkibini o'rganish, ulardagi turli kamchiliklarni aniqlash va tahlil qilish zamonaviy materialshunosning eng muhim vazifasidir.

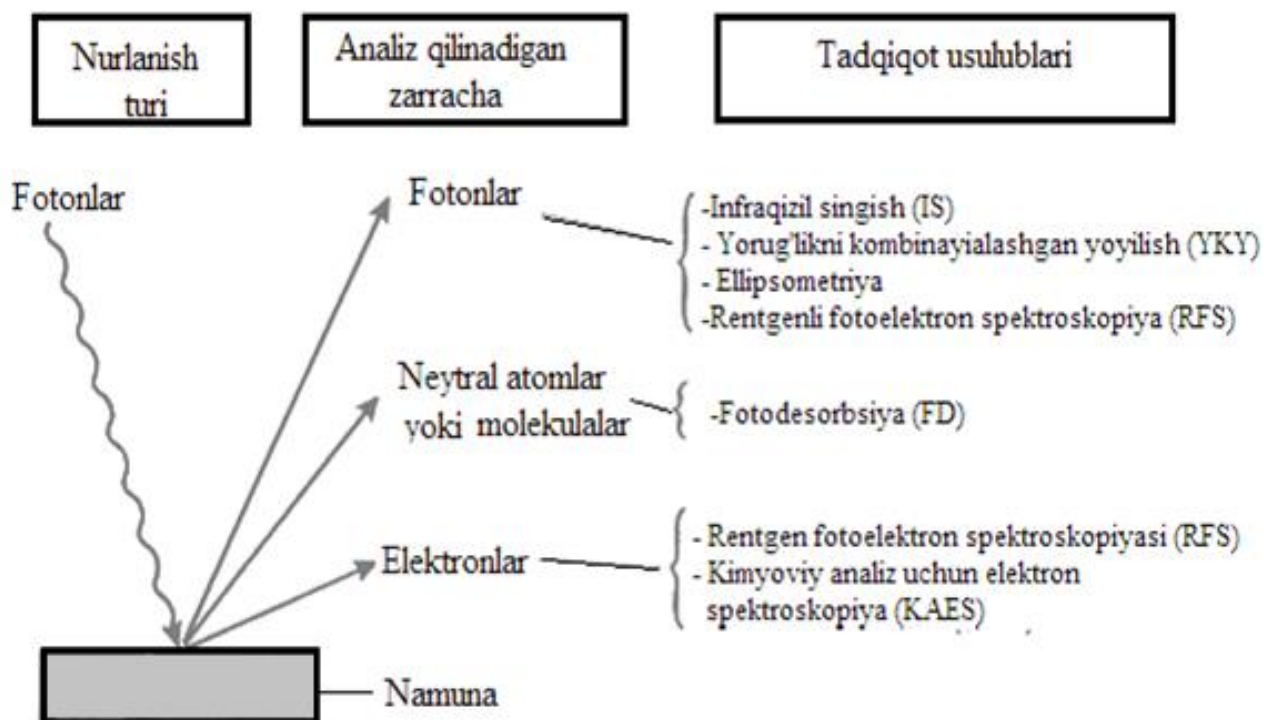
Hozirgi vaqtda materiallarning tuzilishini nazorat qilishning universal usuli yo'q, bu ularning nozik va qo'pol tuzilishining barcha muhim xususiyatlarini baholash imkonini beradi. Mutaxassislar doimiy ravishda takomillashtirilgan va rivojlanayotgan materiallarni nazorat qilish uchun o'nlab turli usullarni taklif qilishdi [15,5]. Zamonaviy asbob-uskunalar bazasini rivojlantirish orqali kompyuter texnologiyasidan foydalanish, yangi jismoniy printsiplardan foydalanish, tadqiqotchilar rivojlangan qobiliyatlari bilan tobora rivojlangan tahliliy vositalar bo'lib kelgan. O'tgan yillardagi eng yorqin yutuqlar - skanerlar o'tkazish va atomik kuchli mikroskopik usullarini ishlab chiqishdir. Sinxrotronnurlanishidan foydalanishga asoslangan strukturaviy tadqiqot usullaridan foydalanish katta istiqbolga bog'liq.

Materiallar tarkibiy tahlilining zamonaviy uslublari va sifat nazorati asoslari bir qator jismoniy qodisalar va printsiplarga asoslanadi. Birlamchi nurlanishning turli xil turlari va tahlil qilingan zarralar yordamida metall materiallarning yuzasini o'rganish uchun jismoniy usullar ishlab chiqildi. Misollar K1, K2 va K3-rasmlarda ko'rsatilgan [15].

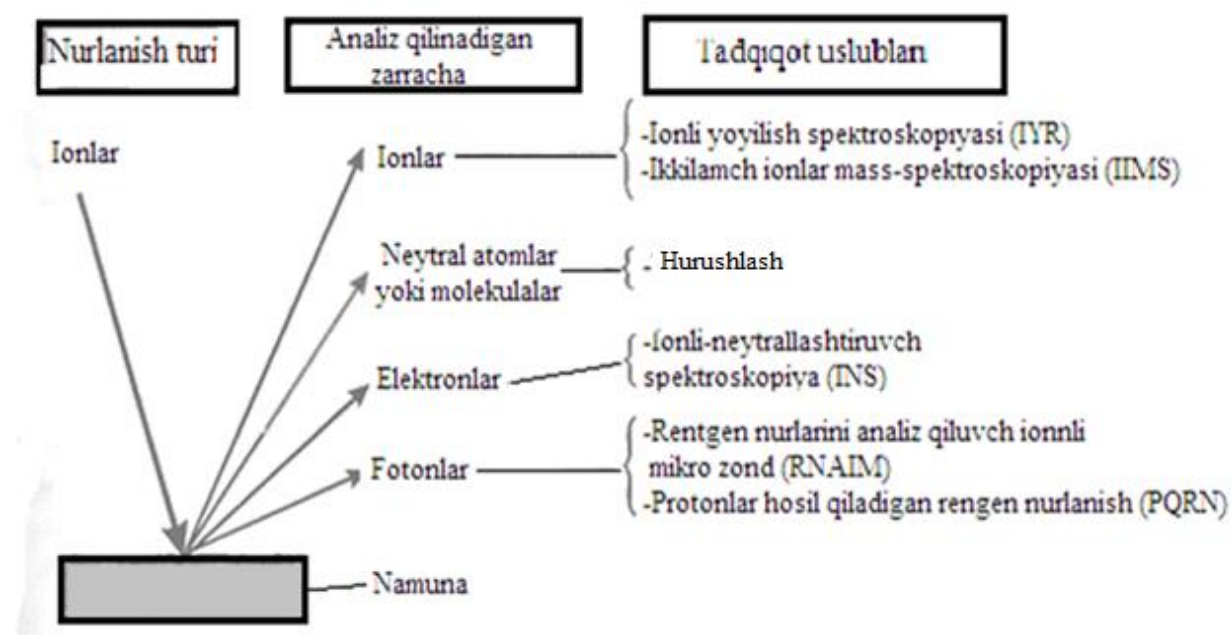
Bugungi kungacha ishlab chiqilgan materiallarning tizimli tahlillari va sifat nazorati bo'yicha ko'plab usullardan eng keng tarqalgan usullardan biri hisoblanadi. Ushbu ma'lumot tadqiqotchilar tomonidan juda yaxshi qabul qilinadi va tahlil qilish uchun juda qulaydir. Elektron mikroskopni o'tkazish va ko'rish usullarini qo'llash orqali yangi materiallarni olish va turli texnologik jarayonlarni ishlab chiqish bilan boqlik ko'plab ishlar bajarildi. Elektron mikroskopiga qo'shimcha ravishda, Oje- spektroskopiyasi (AES: Auger Elektron Spectroscopy), sekin elektron diffraksiya usuli (LEED: Low Energy Electron Diffraction), kimyoviy analiz uchun elektronik spektroskopiya (ESCA: Electron Spectroscopy for Chemical Analysis) ikkilamchi ion massasi spektrometri (SIMS: Secondary Ion Mass Spectrometry) aytib o'tish mumkin.



K1 – rasim. Ob'ektlarning elektron nurlanishiga asoslangan metall sirlarni tekshirishning fizikaviy usullari



K2 – rasim. Fotonli ob'ektlarning nurlanishiga asoslangan metall sirlarni o'rganish uchun fizikaviy usullar



K3– rasm. Ob'ektlari ionlarning nurlanishiga asoslangan metall sirtlarni o'rganishning fizikaviy usullari

Darslik «Metallarni tuzilishi va detallar sifatini nazorati» fanini o'rganish 5320100- «Materialshunoslik va yangi materiallar texnologiyasi» ta'lim yo'nalishi bo'yicha bakalavrlarni tayyorlashda asosiy qo'llanma bo'lishi mumkin. Davlat ta'lim standarti materiallarni sifat nazorati metodikasi, elektron mikroskopik, spektral, mikro-rentgen spektrli, magnit, akustik usullarining fizikaviy asoslarini o'zlashtirishni nazarda tutadi. Standartga muvofiq, muhandis rentgen texnologiyasi, kristallarni tasvirga olish usullarini, kukun usuli, qutb shakllari usuli, skanerlash elektron mikroskopi, mikroanalizatorlar, magnit nazorat asboblari va uskunalari, akustik emissiya usullari va uskunalari haqida tushunchaga ega bo'lishi kerak. Ushbu materiallar darslikda ixcham shaklda taqdim etilgan.

Darslik tekshirish materiallari tahlil usullarining asosiy xususiyatlarini jamlagan o'nta mustaqil bo'limdan iborat. har bir bo'lim oxirida uni tayyorlash uchun ishlatiladigan bibliografiyalarni ro'yxati keltirilgan. Zarur bo'lganda, tadqiqot materiallarining muayyan uslubini chuqurroq tahlil qilishda o'quvchi ushbu adabiyotga murojaat qilishi mumkin.

## I-BOB. METALLARNING TUZILISHI VA XOSSALARI

### METALLAR VA ULARNING ASOSIY XOSSALARI

Metall va ularning qotishmalari ishlab chiqarishda asosiy material hisoblanadi. Metallar metall yaltiroqligiga ega bo'lgan plastik moda hisoblanadi. hamma metallar va ularning qotishmalarini 2 ta guruhga bo'lish qabul qilingan:

Temir va uning qotishmalari bo'lib, ularga po'lat va cho'yanlar kiradi. qolgan barcha metallar, ya'ni Al, Cu, Ti, Ni, Mo, V, Cr, Mn, Mg, Co, Ag, Sn, W, Hg, Pb, Au va boshqalar rangli metallar deyiladi.

Ko'proq sanoatda qora metallar ishlatiladi.

Konstruksion va asbobsozlik materiallarini kamida 90-95% temir asosli qotishmalardan tayyorlanadi. Chunki temir er yuzida ko'p tarqalgan, narhi qimmat bo'lmagan, yuqori texnologiya va mexanik xossalarga ega bo'lgan metallidir. Rangli metall va qotishmalarning narxi temirga nisbatan ancha qimmatdir. Kobalt, nikel, marganets kabi metallar ham temir guruhidagi metallarga kiritiladi.

Rangli metallar xossasiga va ishlatilishiga qarab, bir qancha guruhlarga bo'linadi:

1) kichik solishtirma og'irlikka (zichlikka) ega bo'lgan engil rangli metallar bo'lib, ularga *Be, Mg, Al, Ti* va boshqalar;

2) oson eriydigan rangli metallar bo'lib, ularga *Zn, Cd, Sn, Sb, Hg, Pb, Bi* va boshqalar;

3) qiyin eriydigan rangli metallar bo'dib, ularni erish temperaturasi temirga (1539° C) nisbatan yuqori – *Ti, Cr, Jr, Mo, W, V* va boshqalar;

4) kimyoviy inertlikka ega bo'lgan, nodir metallar–*Ph, Pd, Ag, Os, Pt, Au* va boshqalar;

5) atom texnikasida qo'llaniladigan uran metallar–*U, Th, Pa*; siyrak er metallari;

6) ishqor er metallar – *Li, Na, K* bo'lib ular asosan yadro reaktorlarda issiqlik tashuvchilar bo'lib xizmat qiladi.

Hamma metallar va ularning qotishmalari kristall jismlar hisoblanadi. Metallarda atomlar (ionlar) ma'lum tartibda joylashgan bo'ladi. Amorf jismlarning atomlari esa betartib joylashgan.

Hamma metallar qattiq holatda va qisman suyuqholatda quyidagi xossalarga ega bo'ladi:

- yuqori issiqlik va elektr o'tkazuvchanlikka;
- elektr qarshilikni temperatura koeffitsientiga;
- termoelektron emissiyasiga, ya'ni qizdirilganda o'zidan elektron chiqarish qobiliyatiga;
- yaxshi metall yaltiroqlikka;

- yaxshi plastik deformatsiyalanish qobiliyatiga va boshqalarga.

Yuqorida qayd etilgan xossalar moddaning metall holatini ko'rsatadi.

Oddiy struktura xolatdagi toza metallar kichik mustaqkamlikka ega bo'lib, talab qilingan xossani ta'minlay bera olmagan uchun, ularni sanoatda kam ishlatiladi.

Qotishmalar esa ko'proq qo'llaniladi. qotishma deb kamida ikkita va undan ortiq metallar yoki nometallardan tashkil topgan moddaga aytiladi

Qotishmalarni hosil qiluvchi kimyoviy elementlar komponentlar deyiladi. qotishma kamida ikkita va undan ortiq komponentlardan tashkil topadi. qotishmalarga misol qilib, po'lat, cho'yan, latun va bronzalarni keltirish mumkin.

Metall qotishmaning tuzilishi, toza metallnikiga qaraganda ancha murakkabdir.

«Metallshunoslik asoslari» fanida «sistema» (tizim), «faza» va «struktura» degan tushunchalar ham ko'p ishlatiladi.

Sistema–muvozanat holatdagi fazalarning yig'indisi.

Faza–bir xil tarkibga, kristall tuzilishga, xossaga va agregat holatga ega bo'lgan sistemaning bir xil (gomogen) tarkibiy qismidir.

Struktura–metall va qotishmalardagi fazalarini shakli, o'lchovi va o'zaro joylashish xarakterini ko'rsatuvchi tomonidir.

## **1.2. Metallarning kristall tuzilishi**

Sanoatda turli xil detallarni tayyorlash uchun metall tanlashda, uning kimyoviy tarkibi, tuzilishi, mexanik, fizik – kimyoviy va texnologik xossalarini bilish, shuningdek undan foydalanish sharoitlarini, mashinalarining ishlash hussusiyati hamda, puxtaligiga ta'sir qiluvchi kuch va boshqa omillarni hisobga olish zarur.

Ushbu bobda metall va ularning qotishmalarining tarkibi, tuzilishi bilan xossalari o'zaro bog'langan holda o'rganiladi.

Atomlarning o'zaro joylashishiga qarab, amorf va qattiq jismlar bo'ladi. Kristall jismlar qizdirilganda ma'lum temperaturagacha (suyuqlanish temeperaturasigacha) qattiq kristall holatda qoladi, bu temperaturadan ozgina ko'tarilganda esa, ular suyuqholatga o'tishi mumkin. Amorf jismlar qizdirilganda katta temperatura oraliqida yumshaydi; avval ular qovushqoq bo'lib qoladi, so'ngra suyuqholatga o'tadi.

Barcha metallar va ularning qotishmalari kristall jismlar hisoblanadi.

Metallarning kristall strukturasini bayon qilish uchun kristall panjara tushunchasidan foydalaniladi. Kristall panjara bu xayoliy fazoviy to'r bo'lib, uning tugunlarida metall hosil qiluvchi atomlar (ionlar) joylashadi. Kristallni hosil

qiluvchi modda zarralari (ionlar, atomlar) fazoda davriy ravishda takrorlanib turadigan ma'lum geometrik tartibda joylashgan bo'ladi. Amorf jismlarda atomlar fazoda betartib, xaotik tarzda joylashgan. Bunday jismlarga shisha, smola, kanifol, elim kabilar kiradi.

Moddalarning kristall panjara tugunlarida joylashgan zarrachalarning xiliga, hamda ularni o'zaro bog'lovchi kuchlarga ko'ra molekulyar, atom, ion va metall bog'lanishlarga ajratiladi.

Molekulyar bog'lanishda kristall panjara tugunlaridagi molekulalar o'zaro molekulyar kuchlar hisobiga bog'lanadi. Bu bog'lanish moddalariga asosan metalmas materiallar, organik va bir qancha anorganik moddalar kiradi. Bu moddalar molekulalarini o'zaro bog'lovchi kuchlari kichikligi sababli, ular unchali puxta va qattiq bo'lmaydi, oson suyuqlanadi.

Atom bog'lanishda kristall panjara tugunlarida joylashgan atomlar o'zaro tortishish kuchlar hisobiga bog'lanadi. Bu bog'lanishdagi moddalarga asosan olmos, kremniy va ba'zi neorganik birikmalar kirib, ular juda qattiq, suyuqlanish temperaturasi yuqori bo'lib, amalda hech qanday eritmalarda erimaydi.

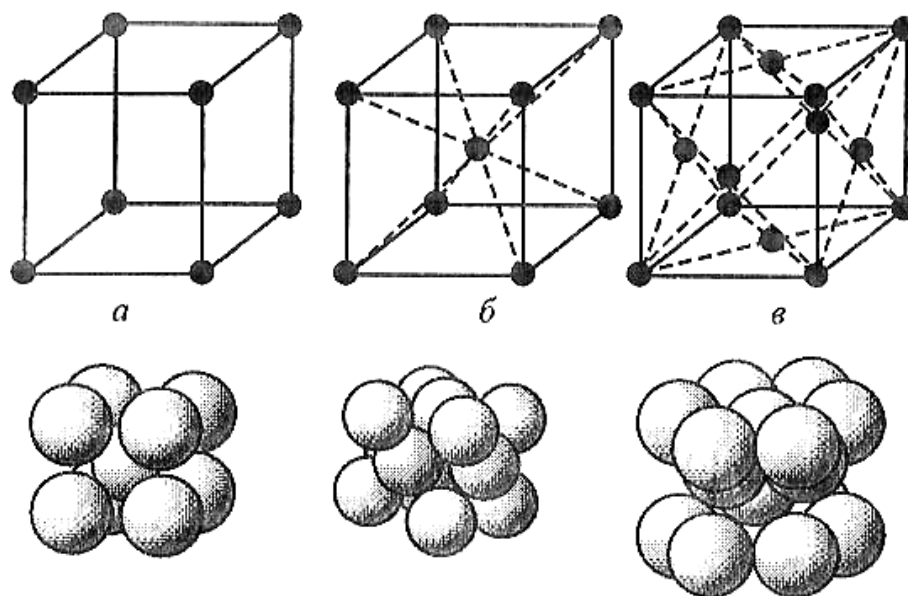
Ion boqlanishda kristall panjara tugunlarida musbat va manfiy zaryadli ionlar ketma-ket tartibda joylashib, o'zaro elektrostatik tortishish kuchlari hisobiga bog'lanadi. Ion bog'lanishli moddalarga ko'pchilik tuzlar va ba'zi oksidlar misol bo'ladi. Bu moddalar molekulyar bog'lanishdagi moddalarga nisbatan puxtaroq bo'lib, suyuqlanish temperaturasi yuqoridir.

Metall bog'lanishda kristall panjara tugunlarida metall atomlarining musbat ionlari joylashib, ular orasida esa elektronlar erkin harakat qilib o'zaro bog'lanadi. Ana shu metall bog'lanishdan kelib chiqib, metallda kristall panjara quyidagicha shakllanishini ko'rib chiqamiz. Metall suyuq holatdan qattiqholatga o'tayotganda, atomlar orasidagi masofa qisqaradi, ularning o'zaro ta'sir kuchi ham ortadi. Atomlarning o'zaro ta'sirlashish xarakteri, ularning tashqi elektron qobiqlarining tuzilishi bilan aniqlanadi. Atomlar yaqinlashganda bir atomning valentli elektronini boshqa atomning musbat zaryadlangan yadrosiga o'tishi natijasida tashqi qobiqda joylashgan elektronlarning o'z atomlari bilan bog'lanishi yo'qoladi. hech bir atomga tegishli bo'lmagan erkin elektronlar hosil bo'la boshlaydi. Shunday qilib, qattiq holatdagi metall erkin elektronlar bilan qurshab olingan musbat zaryadlangan ionlardan tashkil topgan strukturadan iborat bo'ladi. Metalldagi bog'lanish elektrostatik kuchlar bilan amalga oshiriladi, ionlar va erkin elektronlar o'rtasida elektrostatik tortishish kuchlar hosil bo'ladi, bu kuchlar ionlarni to'plab turadi. metallda ionlar ma'lum tartibda joylashib, kristall panjara hosil qiladi. Ionlarning bunday joylashishi, ularning valentli elektronlar bilan o'zaro ta'siri hisobiga ta'minlanadi. Valentli elektronlar ionlarni kristall panjarada ushlab turadi.



Sanoatda ishlatiladigan metallarda quyidagi kristall panjaralar keng tarqalgan: (1.1-rasm): hajmi markazlashgan kub panjara (1.1-rasm, a); yoqlari markazlashgan kub panjara (1.1-rasm, b); geksagonal panjara (1.1-rasm, v).

hajmi markazlashgan kub panjara 9 ta atom bo'lib, ulardan 8 tasi panjaraning uchlarida, 1 tasi markazida joylashgan. Bunday panjaraga xrom, volfram, vanadiy, 1400°C dan yuqori va 900°C gacha temperaturada temir ega bo'ladi (1.1-rasm,a).



1.1-rasm. Fazoviy kristall panjaralar:

a-hajm markazlashgan kub panjara; b-yoqlari markazlashgan kub panjara; v-geksagonal panjara

Yoqlari markazlashgan kub panjarada 14 ta atom bo'ladi, bulardan 8 tasi kub uchlarida va 1 tadan har bir yoq markazida joylashgan bo'ladi. Bu panjaraga 900°C dan 1400°C gacha temperatura oraliqida *Fe*, hamda *Cu*, *Ni*, *Al* va boshqalar ega bo'ladi (1.1-rasm, b).

Olti yoqli prizma ko'rinishidagi geksagonal panjarada 17 ta atom bo'ladi, bundan 12 tasi prizma uchlarida, 2 tasi prizma asoslari markazida, 3 tasi prizma ichida joylashadi. Bunday panjara magniy, rux kabi metallarda uchraydi (1.1-rasm, v).

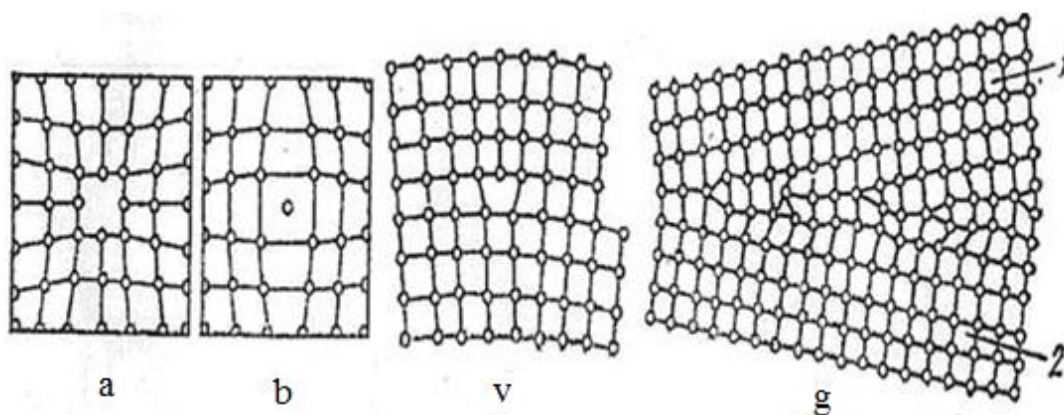
Turli turdagi kristall panjaralarda atomlarni egallagan joyi, ya'ni zichligi har xil bo'ladi. Masalan, yoqlari markazlashgan kub va geksogonal panjaralarda atomlar 74%, hajmi markazlashgan kub kristall panjarada esa 68% joyini egallaydi.

Kristall panjarani o'lchamlari panjarani davri (parametr) orqali xarakterlanadi. Panjara davri deb, elementar yacheyka tomonlaridagi atomlar orasidagi masofadir. Panjara davri nanometrlarda o'lchanadi ( $1\text{nm}=10^{-9}\text{m}=0,1\text{A}$ ).

Kub panjaraning davri kub tomoni bilan xarakterlansa, geksogonal panjaraniki esa olti burchakni tomoni va prizmani balandligi bilan xarakterlanadi. Bundan tashqari elementar kristall yacheyka koordinatsion son bilan ham ifodalanadi. Koordinatsion son tanlangan atomga nisbatan eng yaqin turgan atomlar sonidir. hajm markazlashgan kub kristall panjarada koordinatsion son 8 ga teng bo'lsa, yoqlari markazlashgan kub kristall va geksogonal panjarada esa bu son 12 ga teng bo'ladi.

### 1.3. Krstall panjaradagi nuqsonlar

Kristall panjarada atomlarning noto'g'ri joylashishi oqibatida, kristallarda doim nuqsonlar bo'ladi. Kristall tuzilishidagi nuqsonlar geometrik belgilariga ko'ra nuqtaviy, chiziqli va sirtqi bo'ladi (1.2-rasm). Ma'lumki atomlarni kristall panjara tugunlari atrofida tebranma harakat amplitudasi ortadi. Ushbu kristall panjaraning ko'pgina atomlari bir xil amplituda bilan tebranadi. Biroq ayrim atomlarda o'rtacha energiyadan ko'proq energiya bo'lib, ular bir erdan boshqa joyga suriladi. Sirtqi qatlam atomlari juda oson surilib, sirtga chiqadi. Bunday atomning egallagan o'rnini vakansiya deyiladi (1.2-rasm, a).



1.2-rasm. Kristallardagi nuqsonlar: a-vakansiya, b-singdirilgan atom, v-chegaraviy chiziqli dislokatsiya, g- 1 va 2 zarra chegarasida atomlarning noto'g'ri joylashishi.

Ma'lum vaqt o'tgach, bu erga qo'shni qatlamning atomlaridan biri suriladi va h.k. Vakansiya kristallning ichki qismiga siljiydi. Temperatura ko'tarilishi bilan vakansiyalar soni ortadi va ular ko'pincha bir tugundan, ikkinchi tugunga suriladi. Metallarda sodir bo'ladigan diffuzion jarayonlarda vakansiyalar muhim rol o'ynaydi.

Kristall panjara tugunidagi atom (1.2-rasm,b) va o'rnini almashtirgan atom nuqtaviy nuqsonlarga kiradi. Kristall panjarada bir metall atomining o'rnini boshqa begona atom egallab olganda o'rnini almashtirgan atom hosil bo'ladi.

Kristall panjarada nuqtaviy nuqsonlar mahalliy qiyshayishlar hosil qiladi.

Chiziqli nuqsonlar kristall panjaraning bir qismi, boshqa qismiga nisbatan bir atom oraliqi masofasiga surilganda paydo bo'ladi; surilish u yoki bu tekislikda atomlar qatori pastki qismiga nisbatan bittaga ko'p bo'lgan panjaraning yuqorigi qismida sodir bo'ladi. Bunda panjaraning yuqorigi qismida go'yo ortiqcha atom tekisligi (ekstrotekislik) paydo bo'ladi. Surilish yo'nalishiga perpendikulyar bo'lgan elektrotekislik chekkasi chegara yoki chiziqli dislokatsiya deb ataladi (1.2-rasm, v). Dislokatsiyaning uzunligi bir necha ming atom oraliqi masofasiga teng bo'lishi mumkin.

Dislokatsiya eng kichik o'lchamga ega bo'lib, bir necha atom oralig'iga tengdir.

Dislokatsiya zonasida kristall panjara elastik buzilgan bo'ladi, chunki bu zonadagi atomlar o'zining muvozanat holatiga nisbatan surilgandir. Dislokatsiyalar uchun, ularni engil suriluvchanligi xarakterlidir. Bu holat dislokatsiyaning hosil qiluvchi atomlarning muvozanat holatga surilishiga intilishi bilan tushuntiriladi. Dislokatsiyalar metallarning kristallanishi jarayonida, plastik deformatsiyalanganida, termik ishlov berilganda va boshqa holatlarda hosil bo'ladi.

Sirtqi nuqsonlar ayrim kristallar orasidagi bo'linish chegarasidan iborat (1.2-rasm, g) bo'lib, bu bo'linish chegarasida kristall atomlari hajmining boshqa yerdagiga nisbatan noto'g'riroq joylashishi oqibatida kuzatiladi. Bo'linish chegaralarida dislokatsiya va vakansiyalar to'planadi, atomlarning joylashish tartibini ko'proq buziladi. Bunda kristallarning yo'nalishlari buzilgan bo'lib, ular bir-biriga nisbatan bir necha o'nlab gradusga burilishi mumkin. Kristall panjaradagi nuqsonlar metall xossalariga katta ta'sir ko'rsatadi.

Kristallar anizotropiyasi. Metallarning o'ziga xos xususiyatlaridan biri kristall panjara tekisliklarining turli yo'nalishlarida mexanik xossalarining bir xil emasligidir. Metallarning bu xossasi anizotropik deyiladi. Bu panjaraning turli tekisliklarida atomlarning turli zichlikda joylashganligi va atomlar orasidagi masofalarning bir xil emasligi bilan tushuntiriladi.

Anizotropiya xossasi monokristalllarda, ya'ni zarralari butun hajm bo'ylab bir xil joylashgan yakka kristallarda joylanishda muhimdir. Monokristallar to'g'ri kristall qirralarga ega bo'lib, mexanik, elektr va boshqa fizik xossalariga ko'ra ham anizotropdir. Masalan, mis monokristallining mustahkamligi panjaraning tekisligida 140 MPa bo'lsa, ikkinchi tekisligida 330 MPa, plastikligi esa turlicha. Metallarga termik ishlov berish yo'li bilan panjaraning barcha tekisliklarida bir xil

xossalarga erishish mumkin. Anizotropik metallning magnit va elektr xossalari, allotropiya kabi xossalarini o'zgartirish imkonini beradi.

#### **1.4. Metallar strukturasini (tuzilishini) o'rganish usullari**

Metall materiallar uchun an'anaviy metodik usullarni qo'llashda metall va qotishmalar tomonidan olingan kristalining strukturasini. Amorf holat maxsus texnologik jarayonlarni qo'llash orqali amalga oshiriladi va suyuq metallning juda sovuqqina tezligi bilan ajralib turadigan, kamdan-kam uchraydi. Materiallar ideal kristall panjaraga ega bo'lsa, olimlar (metall ishchilari) vazifalari ancha soddalashtiriladi. To'g'ri, bu haqiqiy materiallarga xos bo'lgan ko'plab afzalliklarni yo'qotardi. Aslida, metall materiallar kristal tuzilishida juda ko'p nuqsonlar mavjud. Bu kabi nuqsonlar quyidagilardir: donalarning chegaralari, subdona, zichlanish nuqsonlari, dvoyniklar, fazalararo chegaralar, dislokatsiyalar, disklinatsiyalar, vakansiyalar, kirib borgan va o'zgartirilgan atomlar, kraudionlar, g'ovakliklar, yoriqlar, metall bo'lmagan qo'shimchalar va boshqalar.

«Metall tuzilishi va sifatini nazorat qilish» tushunchasi atomlarning kristalli to'rlarida va hozirgi kristal strukturasidagi nuqsonlarning kombinatsiyasi bilan ideal tuzilishi aniqlanadi. Metall va qotishmalarning ko'pgina muhim xususiyatlari, shu jumladan mustaqkamlik, plastiklik, yorilishga qarshiligi, eyilishbardoshligi ulardagi nuqsonlarga, ularning turiga, miqdori va hajmiga bog'liq.

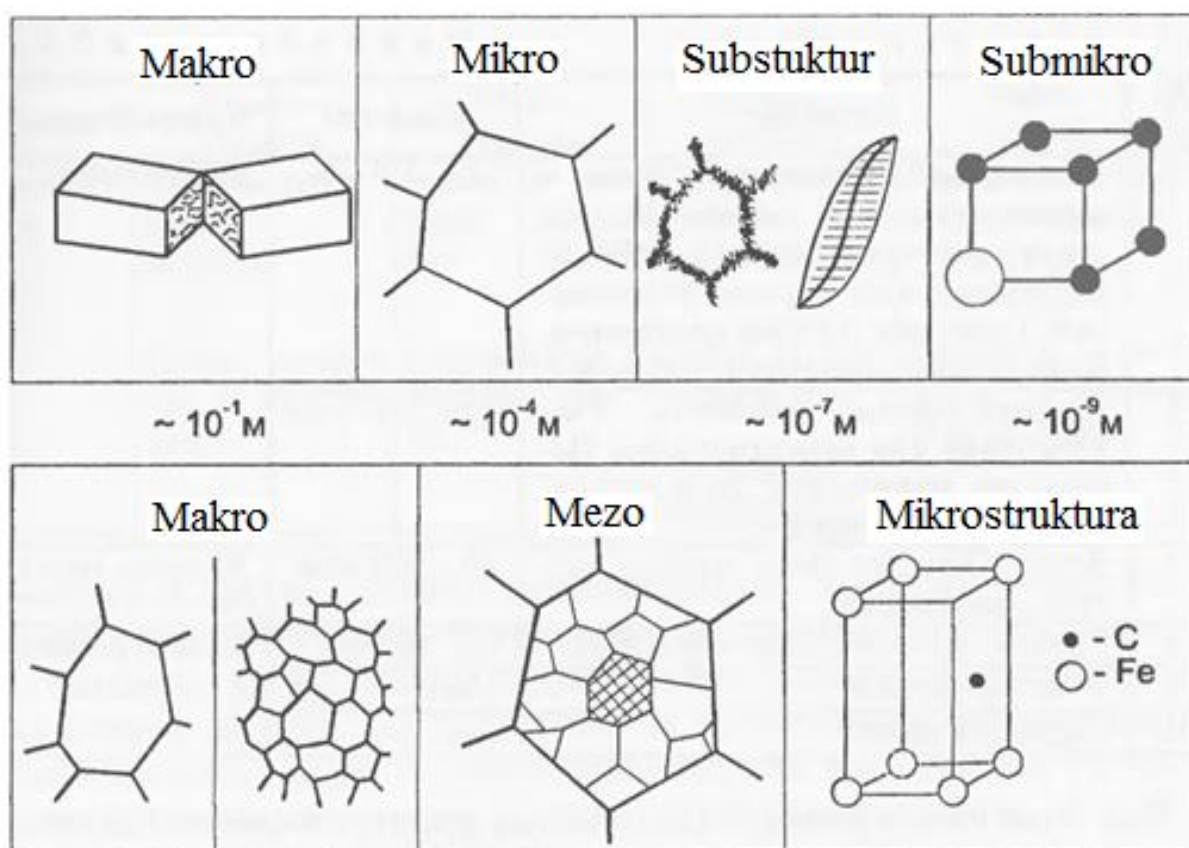
Haqiqiy tuzilma ishlab chiqarish texnologiyasi yoki keyinchalik metall materiallarni qayta ishlash yo'li bilan aniqlanadi. Texnologik jarayonni o'zgartirib, materialning nuqsonli holatidan foydalangan xolda uning tarkibini o'zgartirishi va natijada turli mexanik xususiyatlarning kompleksini o'zgartirish mumkin. Shunday qilib, materialning noto'g'ri tuzilishini tashqi ta'sir qilish (bosim, issiqlik va kimyoviy-termik davolash, radiatsion ta'sir) orqali nazorat qilish orqali uning xususiyatlarini samarali boshqarish mumkin. Bu aslida metall va qotishmalarni ishlab chiqarishning texnologik jarayonining har bir bosqichida yoki ulardagi mahsulotlarning materiallarning tuzilish holatini nazorat qilishni talab qiladi.

Muhim vazifa - tadqiqot usulini tanlash. Ko'plab mashhur usullardan iste'molchi (dizayner) uchun eng qiziqarli xususiyatlarni aniqlashga imkon beradigan usulni birini tanlashingiz kerak. Materiallarning kristal strukturasidagi barcha nuqsonlarni aniqlash juda qiyin vazifadir. Katta vaqt va pul xarajatlari bilan bog'liq. Ko'pgina hollarda bunday global vazifa belgilanmaydi, lekin muayyan vazifani hal qilish bilan chegaralanadi.

Kristall strukturasidagi nuqsonlarning eng muhim parametrlaridan biri ularning o'lchamlari hisoblanadi. Kattaligiga qarab, ularning o'qitish usullarini tanlash kerak.

O'lchov darajasi bilan bog'liq muammo sub'ektiv, terminologik xususiyatga egadir. Ba'zi mualliflarda materiallar tarkibining turli detallarga mos keladigan bir xil atamalar bilan atalishi mumkin. Shuning uchun strukturaning masshtab darajasidagi terminologiyasiga juda ehtiyotkorlik bilan ishlangan bo'lishi kerak. quyida taniqli ekspertlar tomonidan tavsiya etilgan strukturalar nuqsonlari tasniflanadi.

Professor L.I.Tushinskiy an'anaviy tasnifni ajratib oladi, unda makro-, mikro, subklinik va submikroskopik darajalar mavjud, yangi tasnif, makro, mezo va mikro strukturali darajalar [24]. Belgilangan darajalarni ifodalovchi strukturaning tafsilotlari sxematik tarzda 1.3-rasmda keltirilgan.



1.3-rasm. Materiallar strukturasining irarxiyasi: yuqori qator ananaviy klassifikatsiya; pastki qator yangi klassifikatsiya (ma'lumotlar L.I.Tushinskiyniki)

Professor E.V.Kozlova va N.V.Konevoy tomonidan mikro, mezo va so'l darajalariga qo'shimcha ravishda don miqdori alohida ajratiladi. Jadvaldagi har bir shkala darajasi uchun. 1.1-jadvalda strukturaning xarakterli tafsilotlarini ko'rsatadi [5].

**Strukturaviy darajalarni tasniflash N.A. Konevoy va E.V. Kozlov bo'yicha**

| № p/p | Nomlanishi                                                                                                                                                                                                                                                     | Mashtab        | Klasifikatsiya |
|-------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|----------------|
| 1     | Vakantsiya, atom                                                                                                                                                                                                                                               | 2...3 Å        | Mikrodarajada  |
| 2     | Burilish, chegarasi                                                                                                                                                                                                                                            | 5...50 Å       |                |
| 3     | Dislokatsiya, dona chegarasidagi pog'ona, kraudion                                                                                                                                                                                                             | 100 Å          |                |
| 4     | Dislokatsiyalarguruhi, dislokatsiyalarchirmashiqi, siljishpolosasi, siljishzonasi, dislokatsiondevor, alohidadislokatsiyatipidagi hosilalar, donalarchegarasi. Domenchegaralari. Vakantsion, atomikvaaralashklasterlar, segregatsiyalar, ikkinchifazazarralari | 100... 1000 Å  |                |
| 5     | Yacheyka, dislokatsion tugun va dipol, polosa va polasali substruktura, qayta tiklanish mikropolosasi, mikroikkilamchilar, disklinatsiya guruhi. Martensit plitalari va reykalari. Mozaik bloklar, fragmenitlar, subdonalar                                    | 0,1... 1,0 mkm | Mezodaraja     |
| 6     | Dislokatsion ansambl. Uchastok Dona va monokristall uchachtkasi. Paket reek Martensit reyka paketi. Siljish zonasi, siljish sistemasi                                                                                                                          | 1mm...20 mkm   |                |
| 7     | Dona. Dendrit. Sijish zonasi, siljish sistemasi                                                                                                                                                                                                                | 10...200 mkm   | Dona darajasi  |
| 8     | Donalar guruxi. Kompozit tolasi                                                                                                                                                                                                                                | 0,2...0,5 mm   | Makrodaraja    |
| 9     | Namuna uchastkasi                                                                                                                                                                                                                                              | 1 mm           |                |
| 10    | Oynadagi namuna                                                                                                                                                                                                                                                | mm...sm        |                |

Materiallarning strukturasi o'rganish uchun o'lchovlar darajasining boshqa tasnifi va tegishli uslublar 1.2-jadvalda keltirilgan [3]. Mualliflar D. Brandon va U. Kaplan makro, mezo, mikro va nano-darajali darajalarni ajratib turadilar.

Tasniflash uchun boshqa variantlar mavjud. Shuning uchun, o'lchov darajasini ifodalovchi har qanday atamadan foydalanib, materialning tuzilishiga mos keladigan tafsilotlarni tushuntirish mantiqiy bo'ladi.

1.2-jadvalda keltirilgan tadqiqot usulini tanlash, o'rganilayotgan ob'ekt strukturasi miqyosi darajasiga va aniqrog' o'rganilishi kerak bo'lgan strukturaning odatiy tafsilotlari bilan bog'liq. Shu nuqtai nazardan, ushbu masalani ko'rib chiqish vositasida hal qilish zarur. Ob'ekt strukturasi ikkita ulashgan qismi orasidagi minimal masofani xarakterlaydi, bu alohida-alohida ajratilishi mumkin.

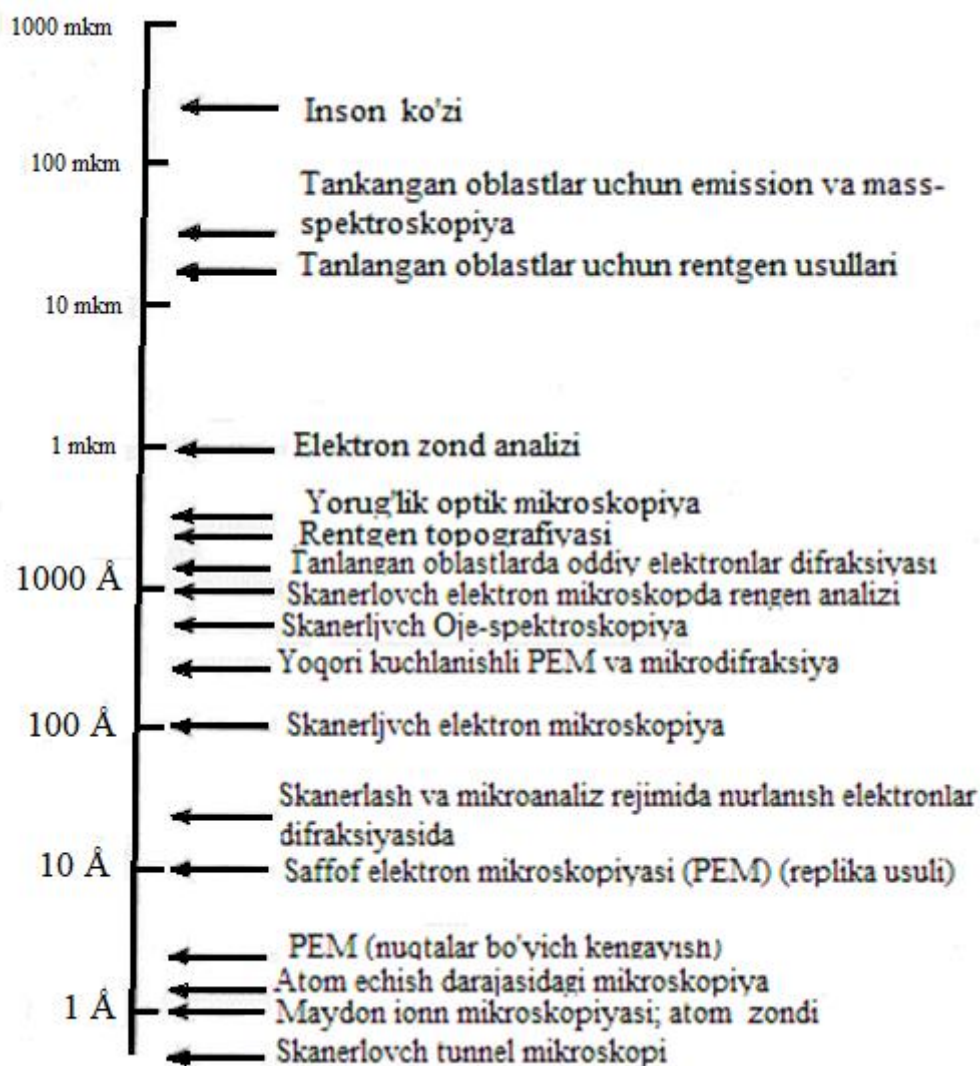
J.W.Rayleigh, ob'ektning ikki nuqtasi alohida-alohida farqlanishi mumkinligini ko'rsatdi, ya'ni nuqtalarning bittasining rasm intensivligining maksimal darajasi boshqa nuqta intensivligining birinchi minimal darajasiga to'g'ri kelib qolsa, ular echilishi mumkin. Inson ko'zi tasvirni millimetrning bir necha o'ndan biridan farqlash imkonini beradi. Inson ko'zi tomonidan qabul qilingan to'lqin uzunligi 0,4 dan 0,7 mm oralig'ida (quyuq rangdan qizil ranggacha rang oraliqi). Inson ko'zining maksimal sezuvchanligi yashil rangga ega, to'lqin uzunligi esa 0,56 mikronni tashkil qiladi.

1.2-jadval

### **Tegishli strukturani o'rganish uchun o'lchov darajalari va usullari [2]**

| Masshtab                 | Makro-daraja                                                          | Mezo-daraja                                                                  | Mikro-daraja                                                                   | Nano-daraja                                                                    |
|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| Odatdagi kattalashtirish | x1                                                                    | $\times 10^2$                                                                | $\times 10^4$                                                                  | $\times 10^6$                                                                  |
| Usul                     | Vizual tekshirish                                                     |                                                                              |                                                                                |                                                                                |
| Masshtab                 | Makro-daraja                                                          | Mezo-daraja                                                                  | Mikro-daraja                                                                   | Nano-daraja                                                                    |
| Odatdagi detallar        | Ishlab chiqarish nuqsonlari<br>G'ovakliklar, darzlar va Qo'shimchalar | Boshqa fazalarning dona va zarralari<br>Faza morfologiyasi va anizotropiyasi | Subdonalar strukturasi<br>Dona va fazalar chegarasi<br>Kristallarning tushishi | Kristallik va donalararo struktura<br>Nuqtaviy nuqsonlar va nuqsonlar klasteri |

Turli xil qurilmalarning rezolyutsiyasi sezilarli darajada farqqiladi (1.4-rasm). qurilmaning rezolyutsiyasi radiatsiya to'lo'qinining uzunligi, shuningdek, radiatsiyaning o'rganilayotgan material bilan o'zaro ta'siri xususiyati bilan belgilanadi. Metodning o'lchamini oshirish uchun to'lo'qin uzunligini kamaytirish va signalni qabul qilish burchini oshirish, ya'ni asbobning tashqi tomonini oshirish kerak. Hozirgi vaqtda sirtning atom strukturasi qaqida ma'lumot olish uchun ion-maydonni, skanerlashni tunnellashni va atom-quvvatli mikroskoplarni olish mumkin. Ma'lum ma'noda, bu usullar atomni ko'rishga imkon beradi deb taxmin qilish mumkin.



1.4-rasm. Materiallarni taxlil qilishda inson ko'zi va asboblarning fazoviy qobiliyati chegaralari



### **Nazorat savollar:**

1. Metallning qanday umumiy xossalari bilasiz?
1. Qora va rangli metallar haqida nimani bilasiz?
1. Metallarning kristall tuzilishi deganda nimani tushunasiz?
1. Kristall panjara nima?
1. Qanday kristall panjara turlarini bilasiz?
1. Qanday metallar yoqlari markazlashgan kub kristall panjaraga ega?
1. Koordinasion son nima?
1. Kristall panjaradagi nuqsonlarning kanday turlarini bilasiz?
1. Nuqtali nuqson nima?
1. Dislokasiya deganda nimani tushunasiz?
1. Vakansiya nima?
1. Sirtqi nuqsonlar haqida nima bilasiz?
1. Kristallanish jarayoni haqida nimani bilasiz?
1. Kristallanish markazlari nima?
1. Kristallanishda donachalarning o'lchami nimaga bog'liq?

## 2-BOB. OPTIK METALLOGRAFIYA

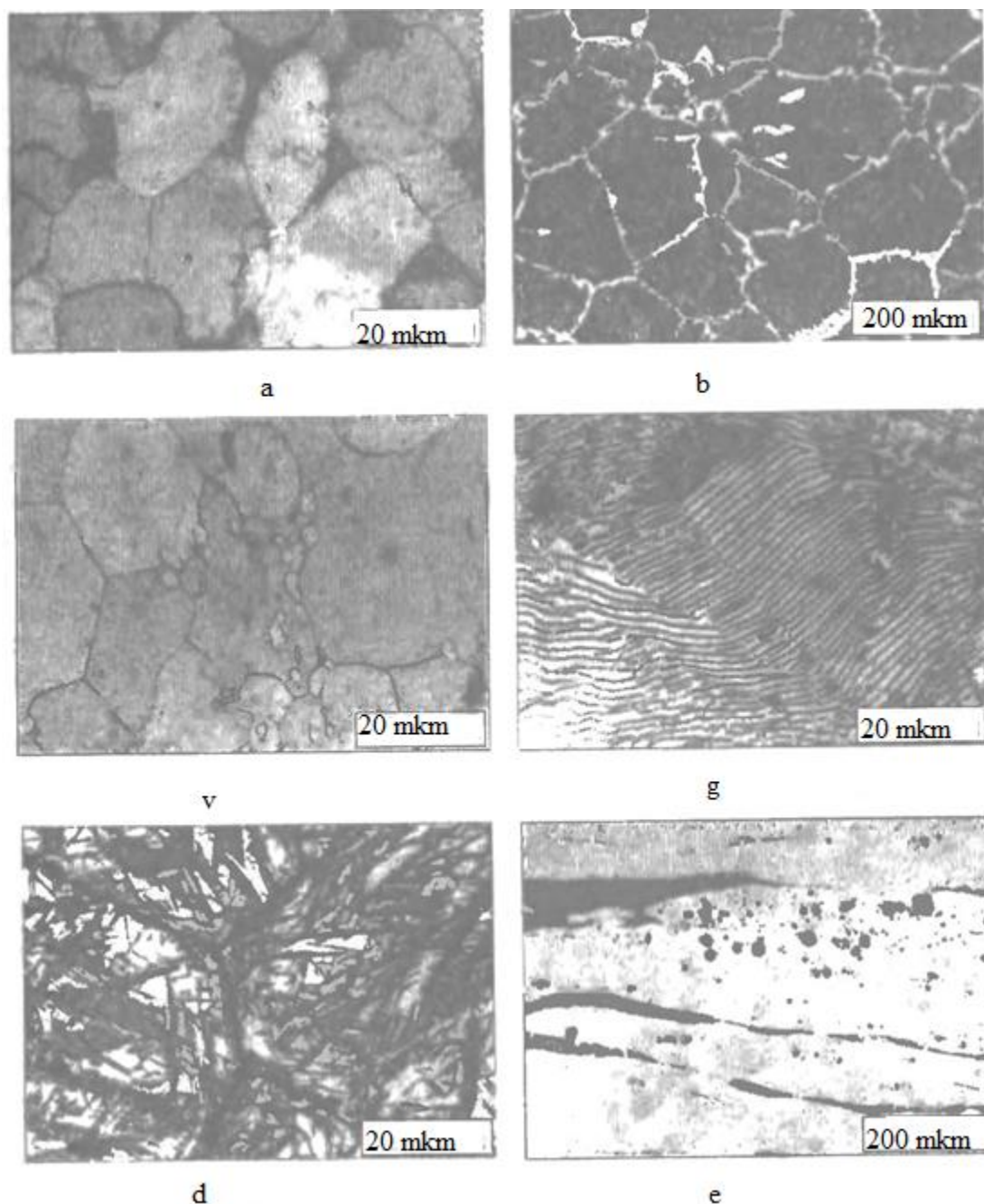
Materiallarni o'rganish uslubini tanlashda ekspertlar turli printsiplarni qo'llashlari mumkin. Eng muximlaridan biri quyidagilar: dastlabki bosqichda oddiy usullarni e'tiborsiz qoldirmaslik, darhol nozik va qimmatbaho narsalarni qo'llash kerak. Eng oddiy usullardan boshlash tavsiya etiladi. Ba'zida oddiy ko'z bilan bajarilgan makro tadqiqotlar, masalan, elektron va atom kuchi mikroskopi usullarini qo'llash uchun nozik ishlarga qaraganda ancha samarali. Misol tariqasida, biz portlash manbai topish masalasini (ob'ektdan tashqarida yoki uning ichida) topishimiz mumkin. Bunday holatda, savolga javob topishda makrotaxlil tadqiqot usuli yordamida texnik vositalardan foydalanmasdan olish mumkin. Oddiy ko'z bilan olingan yoki kattalashtiruvchi linza yordamida olingan yoriqning tabiati qaqida ma'lumot, odatda, yuqori piksellar soniga ega bo'lgan boshqa zamonaviy jixozlardan foydalanishdan ko'ra qimmatlidir. Bu erda «katta katta masofa ko'rinadi» degan ibora juda mos keladi. Agar makrotaxlil tadqiqot usuli tadqiqotchiga qiziqishning barcha savollariga javob berishga imkon bermasa, unda bu holatda chuqurroq miqyosda borish va strukturaning elementlarini yanada yuqori aniqlik ta'minlaydigan to'g'ri uslubni qo'llash mantiqan to'g'ri keladi.

Optik metallografiya - bu eng muhim va eng ko'p ishlatiladigan strukturaviy metoddir. Metallografik mikroskoplar dona tarkibidagi metall bo'lmagan materiallarning strukturasini, ikkinchi bosqichning nisbatan katta zarralari, darzlar va yoriqlar kabi detallarni o'rganishga imkon beradi. Ushbu tafsilotlar materiallarning eng muhim mexanik xususiyatlarini aniqlashga imkon beradi. Xato qilimasdan aytish mumkinki, bugungi kunda optik mikroskopni ishlatmasdan jiddiy metallografik tadqiqotlar o'tkaza olish mumkin emasligini ta'kidlanadi.

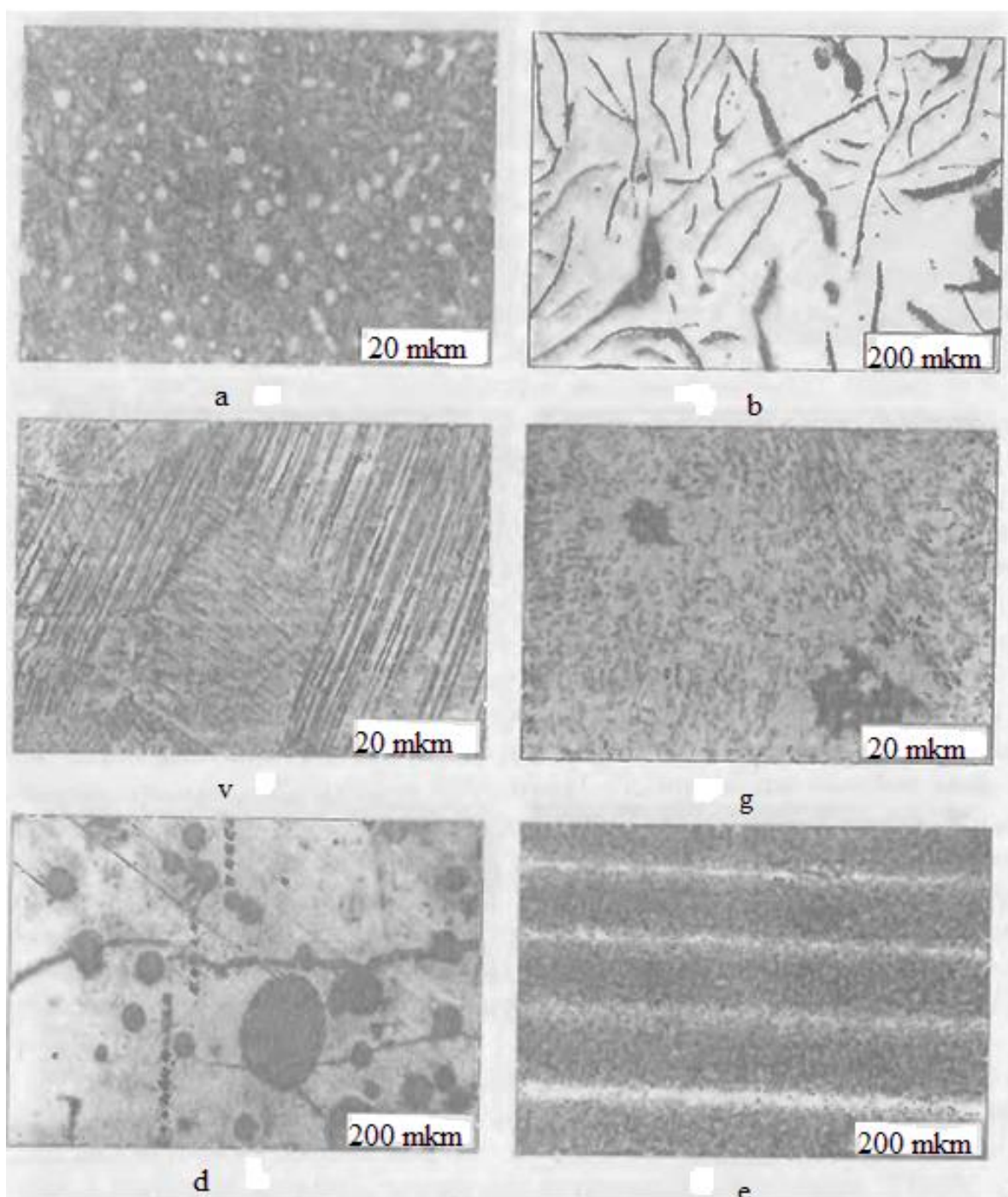
Optik mikroskopning usuli uchun odatiy holat bir fazali materiallarda dona o'lchamini aniqlash (misol uchun, ferrit donalari yoki austenit donalarining hajmi) metall va qotishmalarni tarkibida metall bo'lmagan qo'shimchalarning turini va tarkibini aniqlash, ikki va ko'p fazali tizimlardagi bosqichlar miqdorini aniqlovchi vazifalarni bajarish hisoblanadi. Metallografik mikroskop yordamida aniqlangan strukturalarning namunaviy misollari 2.1 - 2.3-rasmlarda keltirilgan.

Metallografik tadqiqotlar uchun ob'ektlar bo'lib shliflar xizmat qiladi. Ularni tayyorlashning turli usullari mavjud. Biroq, umumiy holatda, shliflarni tayyorlash texnologiyasi ishchi (tekshiriladigan) yuzani, uning keyingi pardozlash va travleniya qilish (agar kerak bo'lsa) silliqlash kabi bosqichlarni o'z ichiga oladi. Dastlabki ikkita operatsiyaning maqsadi sirtini iloji boricha silliqroqqilishdir. Jilvirlash turli xil abraziv materiallar (silliqlash g'qildiraklari, abraziv shkurkalar, abraziv kukunlar) yordamida amalga oshiriladi. Shliflarni jilvirlash mexanik (nozik abraziv shkurkalar, silliqlash pastalari), kimyoviy va elektrokimyoviy usulda

amalgga oshirilishi mumkin. Yuqori sifatli yuzalarni olish tartibini soddalashtirishga imkon beruvchi maxsus qurilmalar va qurilmalar majmui mavjud. Bu yo'nalishdagi taniqli etakchilardan biri Struers firmasidir. Metallografik tadqiqotlar uchun birinchi namunalar 1864 yilda Genri Sorbi tomonidan olib borilgan [5].

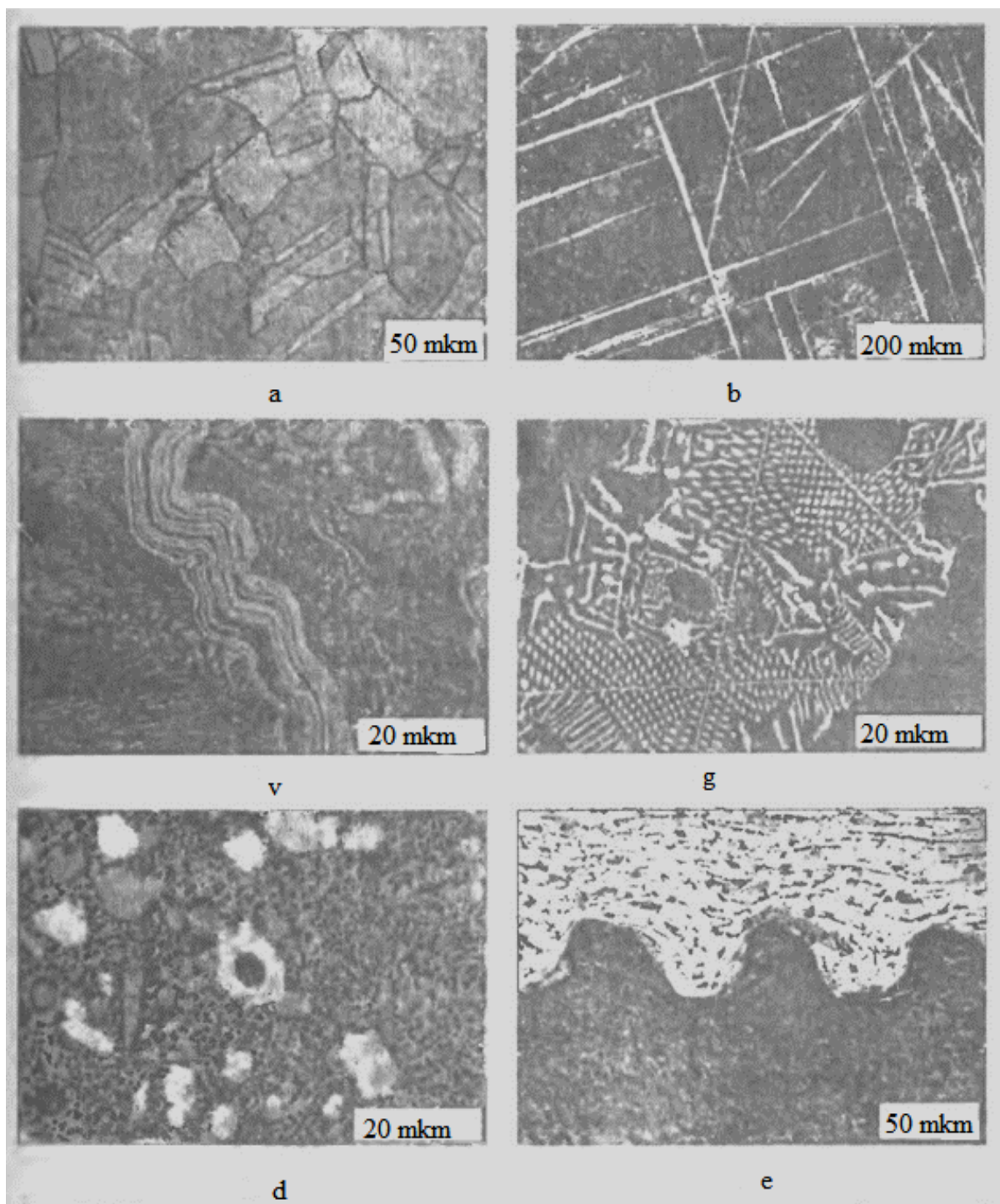


2.1-rasm. Metallografik mikroskoplardan foydalanish davrida po'latda kuzatilayotgan xarakterli strukturalar: a-po'lat 20 dagi ferrit-perlitli struktura; b-po'lat 60 dagi ferrit-perlitli struktura; v- po'lat 20 da yaqol ko'ringan globulyar sementit; g- U8 po'latning plastinkasimon strukturasi; d-U8 po'latdagi martensi va qoldiq austenit; e- kamuglerodli po'latdagi nometall materialdagi qo'shimchalar.



2.2-rasm. Metallografik mikroskoplardan foydalanish davrida po'latda kuzatilayotgan xarakterli strukturalar: a- U12 po'latdagi martensit matritsadaagi sementitning globulyar zarrachalari; b- kul rang cho'yanda plastinkasimon grafitni ko'rinishi; v- Plastik deformatsiyalangan 110G13L po'latda siljish chizig'i; g- 60S2 po'latda ajralgan globulyar sementit va po'stloq ko'rinishdagi grafit; d- 1420 alyumin qotishmasi payvand chokidagi g'ovaklik va darz (shlif travit qilinmagan); e- bosim bilan texnik payvandlangan «po'lat U8 -texnik temir» dagi qatlamli kompozitsion struktura

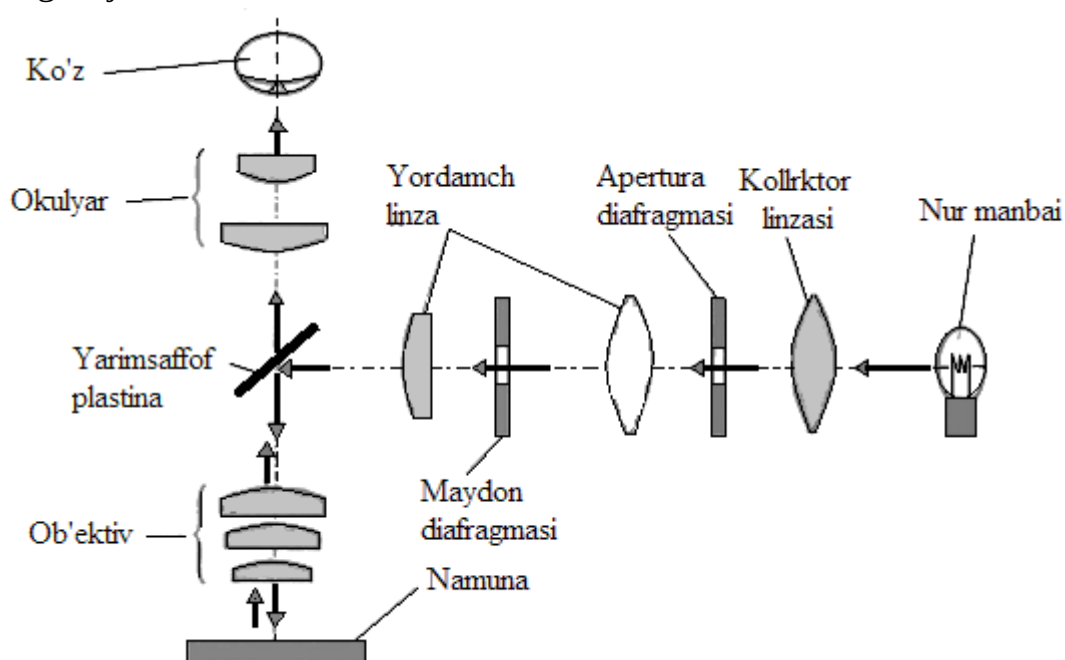




2.3-rasm. Metallografik mikroskoplardan foydalanish davrida metall qotishmalarda kuzatilayotgan xarakterli strukturalar:

a- donador latun strukturası; b- evtektoidgacha bo'lgan uglerodli pulatning (1,6%S) vidmanshtet sementitidagi plastinkasimon ajralmasi; v- vidmanshtet sementitining deformatsiyalangan kristallari (po'latni deformatsiyalanishi sovuq xolatda); g- qattiqqolishma va po'lat orasidagi o'tish zonsi evtektikasi; d- o'zi flyuslanuvchi PN70X17S4R4 kukunlarini plazma yordamida qoplangan qoplama strukturası; e- portlatish yordamida olingan po'lat 20 va U8 payvand birikma chokining strukturası

Metallografik mikroskopning sxematik diagrammasi 2.4-rasmda ko'rsatilgan. Maxsus tayyorlangan ingichka bo'lak mikroskopning optik o'qiga vertikal ravishda joylashtirilgan, bu maqsad o'zining oldingi asosiy markazida tekisligiga to'ri keladi. Bo'lim yorug'lik nurlari bilan yoritilgan, u yorug'lik tizimidan tashkil topgan optik o'qiga deyarli parallel bo'lgan linzalardan o'tadi. Yorug'lik tizimi yorug'lik manbai (chiroq), kollektorli linzalar, diafragma va yarim diafragmalar, yordamchi linzalarni, yarim shaffof plastinkalarni o'z ichiga oladi. Optik mikroskoplarda linzalarning soni 10 dan 12 gacha bo'lishi mumkin. Mikroskopdagi linzalar joyga arab ob'ektivlarga, okulyarga yoki oraliq optik tizimlarga ajratiladi.



2.4-rasm. Metallografik mikroskopning printsiptial sxemasi

Yoritiladigan yuzaning tekis joylaridan aks ettirilgan yorug'lik nurlari ob'ektivga tushadi. Ob'ektivga g'adir budurlikdan aks etgan nurlar tushmaydi. Yakuniy tasvir okulyarda hosil bo'ladi. Mikroskopning optik o'qiga perpendikulyar bo'lgan ingichka bo'lakning tekis bo'aklari so'nggi tasvir ustida yorug'lik paydo bo'ladi va o'qi yo'nalgan joylar qorong'i bo'ladi. Shu sababli donning chegaralari, ikkinchi faza zarralari, g'ovakliklar va materiallar strukturasining boshqa elementlari aniqlanadi.

Mikroskopning kattalashishi ob'ektiv va okulyarga mos keladigan kattalashishga tengdir. Asosiy kattalashish ob'ektiv tomonidan taqdim etiladi. Ob'ektivning kattalashuvi 100 marta oshishi mumkin. Okulyarni kattalashuvi

odatda 20 martadan kamroq bo'ladi. Mikroskopning kattalashishini aniq aniqlash uchun ob'ekt-mikrometre deb ataladigan maxsus plastinka ishlatiladi. Ushbu plastinka umumiy uzunligi 1 mm bo'lgan mikrometrik shkala qo'llaniladi. Ob'ekt-mikrometrda bitta bo'linma qiymati 0,1 mm teng.

## 2.1. Metallografik mikroskopning imkoniyatlari va kattalashtirishi

Optik mikroskopning maksimal kattalashtirish imkoniyati quyidagi shartlarga mos keladi

$$D = \lambda / 2 \cdot n \cdot \sin \alpha = \lambda / 2A, \quad (2.1)$$

bu erda  $\lambda$  - nurning to'liq uzunligi;  $n$  - ob'ekt va linzalar orasidagi vosita sinishi ko'rsatkichi (havo uchun  $n=1$ );  $\alpha$  ob'ektiv o'qi optik o'qi ustida turgan ob'ekt nuqtasidan ko'rinadigan yarim burchakka teng ob'ektning burchak to'plami.

$A = n \cdot \sin \alpha$  qiymati linzalarning raqamli aperturasi deb ataladi. Ob'ektiv va tekshirilayotgan shlif orasidagi bo'shliqni immersion moy to'ldirish yo'li bilan ob'ektivni sonli aperturasini kattalashtirish mumkin. Immersion moy vositasi sifatida odatda kedr moyi qo'llaniladi, uning sindirish koeffitsienti  $n=1.52$  ga teng. Immersion muhitlar bilan ishlash uchun maxsus immersion ob'ektivlar qo'llaniladi.

Burchak aperturasi odatda  $72^\circ$  dan oshmaydi. Shunday qilib,  $\sin \alpha \sim 0.95$  maksimal qiymati, shuning uchun «quruq» ob'ektiv uchun apertura maksimal qiymati  $A=1 \cdot 0.95=0.95$  va immersion ob'ektivlari uchun  $A=1.52 \cdot 0.95=1.44$  teng.

Oq yorug'lik odatda metallografik mikroskoplarda moslamalarni yoritish uchun ishlatiladi. Buning uchun to'liq uzunligi  $\lambda=0.55$  mkm deb qabul qilinadi. Shuning uchun metallografik mikroskopning maksimal imkoniyatlari quyidagicha:

$$D = 0.55 / 2 / 1.44 = 0.2 \text{ mkm}$$

Metallografik tadqiqotlar o'tkazishda to'g'ri mikroskopning kattalashishini tanlash kerak.  $N$  kattalashtirishni foydali deyiladi, agar strukturasining detallari 2 dan 4 minutlik burchak ostida kuzatilishi mumkin bo'lsa, foydali kattalashish quyidagilar orasida yotadi:

$$N = 500A \dots 1000A \quad (2.2)$$

Raqamli aperturaning maksimal qiymatini hisobga olgan holda, metallografik mikroskopdagi maksimal foydali kattalashtirishini aniqlash mumkin. Bu taxminan 1500 martani tashkil etadi ([5] ga ko'ra, optik mikroskopning foydali magnitlanishi 1000 martadan oshmaydi). 1000A dan ortiq kattalashtirishdan foydalanish maqsadga muvofiq emas, chunki u strukturaning tasvirida yangi tafsilotlarni keltirib chiqarmaydi, faqat tasvir sifati yomonlashishiga olib keladi.

Metallografik tadqiqotlar o'tkazilayotganda mikroskopning ob'ektivi zarur bo'lgan foydali kattalashtirish  $N$  asosida aniqlanadi.  $N$  ning qiymati  $N=200/d$  ifodasidan aniqlanadi, bu erda  $d$  - tadqiqotchi qiziqishning strukturaviy detallari (masalan, fazaning biror zarralari), mkm; 200 kuzatuvchining ko'ziga echilishi mumkin bo'lgan masofa, mm.  $N$  qiymatini bila turib, (2.2) formuladan foydalanib mos keladigan raqamli apertura  $A$  va ob'ektivni, so'ngra okulyarni tanlash mumkin.

## **2.2. Metallografik mikroskopda ishlaganda nuqsonlar tasviri**

Tasvir nuqsonlariga: xromatik va sferik aberratsiya, astigmatizm, koma, distorsiya va tasvirni qiyshayishi kiradi.

Xromatik aberratsiya, shartli ravishda nemonoxromatik nurni ishlatganda, qisqa to'lqin uzunligi bo'lgan nurlar linzalar tomonidan kuchliroq sindiriladi, ayni paytda tolqin uzunligi kattalari esa kamroq sindiriladi. Natijada, har xil tekisliklarda joylashgan turli o'lchamdagi tasvirlar hosil bo'ladi.

Sferik aberratsiya monoxromatik nurlarning linzaning turli uchastkalaridan o'tganda turlicha sindirilishi bilan bog'liq bo'ladi.

Koma asimmetriya nuqsoni hisoblanadi. Bu turdagi nuqsonlar katta diametrdagi yorug'lik nuri tutamini qo'llanilganda hosil bo'ladi. Natijada koma nuqsonlari hosil bo'lishi natijasida detal namunalarining alohida qismlari tasviri linzalar o'qidan biroz masofada joylashgan tasviri xiralashgan ko'rinishda bo'ladi.

Astigmatizm tufayli, tutam nurlari linzalardan o'tib bo'lgach optik o'qdan tashqarida joylashgan yorug'lik nuqtasi man'basidan, turli tekisliklarda joylashgan ikkita fokus chiziqlari yo'nalish hosil bo'ladi. Astigmatizm mavjud bo'lganda, oraliq tekisliklarda nuqta tasviri yumaloq yoki elliptik sohadigan joy shaklida bo'ladi.

Distorsiya optik o'qdan turli masofalarda bo'lgan ob'ektlarning detallari bo'yicha boshqa o'sish bilan bog'liq. Distorsiya mavjud bo'lganda to'g'ri chiziqlar tasvirlari qiyshaygan bo'ladi.

Optik mikroskoplarda linza tizimlari (ob'ektivlar va okulyarlar) shunday tanlanadiki, tasvir nuqsonlarini maksimal darajada kamaytirishga xarakat qilinadi.

## **2.3. Metallografik mikroskoplar uchun ob'ektivlar va okulyarlar**

Ob'ektiv nuqsonlarni tuzatish darajasiga va spektrning ish maydoniga qarab metallografik mikroskopning vazifalari axromatlar, apoxromatlar, planaxromatlar va planpoxromatlarga bo'inadi.



Axromatik ob'ektivlarda eng muhim kuzatishlar uchun sferik aberratsiya, koma va xromatik aberratsiya ikki rang uchun to'g'rilangan. Apoxromatik ob'ektivlar sferik aberratsiya va koma darajasining yuqori darajada tuzilishiga ega bo'lishi, shuningdek, aniq ranglarni uzatish ta'minlashi bilan farqlanadi. Ular, ayniqsa, yuqori kattalashtirish va mikrofotografik ishlar uchun to'g'ri keladi.

Planaxromatlar va planpoxromalar axromatik va apoxromatik ob'ektivlar bilan bir xil tarzda korrektsiyalashgan. Bundan tashqari, ular tasvirning egri chiziqlari tuzatilgan.

Okulyarlar o'zlarining kattalashishi va tasvirni tuzatish darajasi bilan ajralib turadi. Zamonaviy metallografik mikroskoplar 5 dan 20 martagacha kattalashgan okulyarlar bilan jihozlangan. Nuqsonlarni tasvirini tuzatish turi va darajasiga qarab okulyarlar oddiy okulyarlar, kompensatsion okulyarlar, fotookulyarlar va gomallarga farqlanadi.

Oddiy okulyarlar (Gyuygensning okulyarlari) odatda ob'ektivlar - kichik va o'rta aperturali axromatlar bilan ishlov berishda ishlatiladi. Kompensatsion okulyarlar ob'ektivlarning qoldiq aberratsiyasini tuzatish uchun maxsus ishlab chiqilgan va ular bilan ishlatiladi. Fotookulyarlar va gomallar mikrofotolarni va tasvirni ekranda aks ettirish uchun mo'ljallangan.

## **2.4. Mikroskopik tadqiqotlarning asosiy usuli**

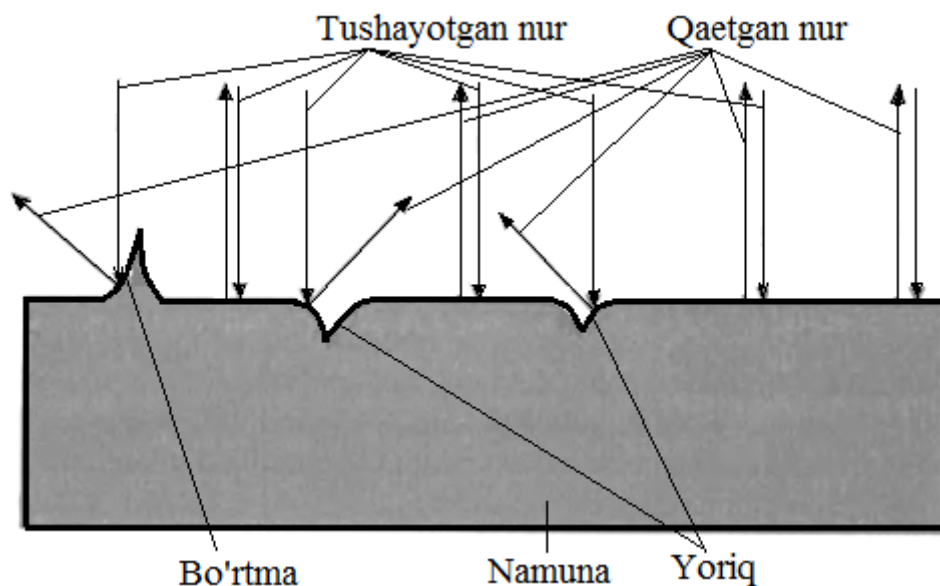
Materiallarning strukturasini nazorat qilish usullarini qo'llashda etarli kontrastli tasvirni ta'minlash juda muqimdir. Tasvir kontrasti ma'lum tafsilotlardan va biz ushbu detalni ajratishni istagan fonning intensivligidan, signal kuchlanishidagi farq bilan aniqlanadi [5].

Ko'pgina metallografik tadqiqotlar yorqin (vertikal) yoritish yordamida amalga oshiriladi. Ushbu usuldan foydalanganda, o'rganilayotgan strukturaning topografik detallari linzalardan tashqaridagi sohadigan yorug'lik bilan aniqlanadi (2.5-rasm).

Ushbu tafsilotlar (botig'lik va bo'rtmalar) tuzilgan tasvirga nisbatan qoraroq ko'rinadi. Tasvirda mikroskop ob'ektivida nurni qaytargan yuza joylari yorug'roqdir. Kontrastni kuchaytirish uchun boshqa turdagi yoritish turlari qo'llaniladi. Masalan, [15] kitobida yorqin yorug'lik usullari, qorangu yoritilgan, polarizatsiyalangan yorug'likda materiallarni o'rganish, faza o'zgarishlar kontrasti, interferentsion kontrasti usullari qo'llaniladi.

Qiyshiq yorug'lik usuli tizimning optik o'qiga parallel bo'lmagan nurlardan foydalanishga asoslangan. Bu holatda kontrastning ko'payishi, strukturaning turli elementlariga ajraladigan nurlarning roli ortib boradi va ob'ekt sirtining yorug'idan soyalarni hosil qilish natijasida paydo bo'ladi. Shuning uchun, qiyshiq yorug'likni

nozik qismning etarlicha keskin sirtini bartaraf qilishda foydalanish tavsiya etiladi [5].



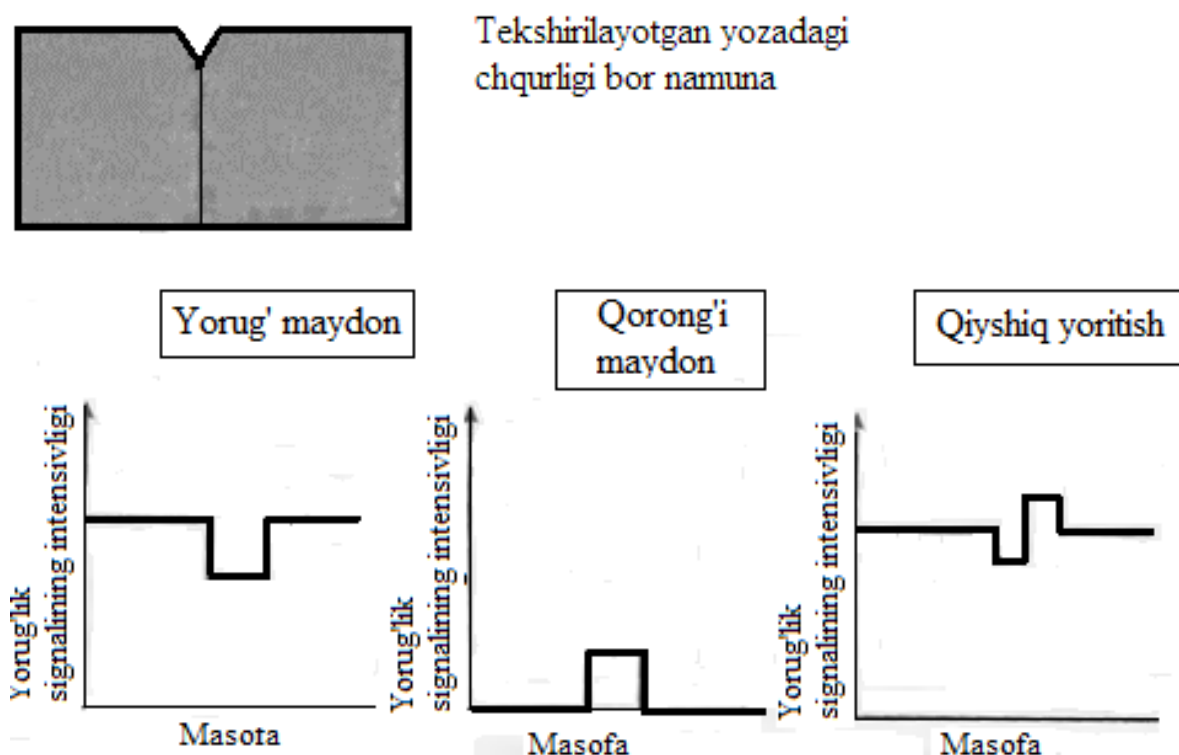
2.5-rasm.Ochiq rangli tasvir usulini qo'llanganda ko'rilayotganstrukturaning turli elementlaridan qaytgan nurlar

Qorong'i polosali yoritish usuli ob'ektiv nurlanish tizimidan chiqarib olinganligiga asoslanadi [6]. Ob'ektni yoritish uchun maxsus qorong'i maydon kondensori ishlatiladi. Bunday holda, to'g'ridan-to'g'ri nurlari linzalardan o'tmaydi. Tasvir tarqalgan nurlar bilan hosil qilingan. Qorong'i maydon tasvirini ishlatganda, tekis joylar qorong'i ko'rinadi va tekis joylar yorug' va yorqin ko'rinadi. Yorqin rangli tasvirga nisbatan qorong'i maydon tasvirlari farqlanadi. Qorong'i maydonning yoritilishi usuli o'rganilayotgan materiallarning strukturaviy elementlarining yuqori kontrastli qiyofasini ta'minlaydi (dona chegaralari, fazalararo chegaralar, g'ovakliklar, yoriqlar, tirnalishlar). Yorqin maydon, qora maydon va yoritilgan yorug'lik usullarini qo'llashda kontrastning shakllanishi xususiyatlari 2.6-rasmda ko'rsatilgan.

Ko'plab metall fazalar va metall bo'lmagan qo'shimchalar optik jihatdan anizotropdir. Shuning uchun metalografik tadqiqotlar o'tkazishda bir qator xolatlarda polarizatsiyalangan yorug'likni ishlatish tavsiya etiladi [5,6]. Polarizatsiyalangan nurda materiallarni o'rganish usulini qo'llash uchun kollektorli linzalarning old qismiga polarizatorlar joylashtiriladi.

Ob'ektni aks ettirgandan keyin polarizatorda yaratilgan polarizatsiyalangan yorug'lik ob'ektiv va okulyar orasidagi ko'zgu orqali yoki analizator orqali o'tadi. Ob'ekt optik jihatdan izotropik bo'lsa, unda polarizator va analizatorning o'zaro pozitsiyasi bilan nurning to'liq absorptsiyasini olish mumkin. Biroq, har qanday

faza optik jihatdan anizotropik bo'lsa, u holda kesib o'tgan polyarfiltrli chiziqlar bilan nurlar to'liq yo'qolmaydi va aloqida kristallar nurga aylanadi, ya'ni aniq kontrastli tasvir olinadi. Ko'pincha polarizatsiyalangan nur po'latlarda metall bo'lmagan qo'shimchalarni aniqlash uchun ishlatiladi. Ta'riflangan usulni tatbiq qilish uchun mikroskopning konstrukttsiyasi polar filtrlarini va analizatorni 0 dan 90 gradus oraliqida ochish va aylantirishni o'z ichiga olishi kerak



2.6-rasm. Nurlanish maydoni, qora maydon va qiyshiq yoritish usullaridan foydalanilganda chuqurligi mavjud nishonni ko'rilganda nur intensivligini o'zgarish xususiyatlari (dona chegaralari travleniya qilingan)

Faza kontrasti usuli relefni tafovut darajasini  $\sim 5$  nmgacha bo'lgan farqni aniqlab beradi. Uni dona chegaralarini, dvoyniklarni, siljish chiziqini va dispers cho'kindilarni o'rganish uchun foydalanish tavsiya etiladi. Usul shlif yuzasida notekisliklarni aks ettirilgan yorug'lik nurlari orasidagi farqni hosil qilishiga asoslanadi. Mikroskoplarda bu farqni xalqali diafragma va faz plastinkasidan tashkil topgan tizimda kuchaytiriladi.

Interferentsiya kontrasti usuli sirt mikrorelefidagi kichik o'zgarishlarni aniqlash imkonini beradi. Ikki nurli va ko'p nurli interferometriya usullarini qo'llash mumkin. Ikki nurli interferometriya usuli yordamida Linnik interferometrida yorug'lik ikki tutamga ajratiladi. Bir nur tekshirilayotgan yuzaga tushadi, ikkinchisi oynaning etalon-optik tekis yuzasini yoritadi. Ushbu sirtlardan qaytgan nurlar bir-birining ustiga yopishadi. Ikki chiziq davomida farq mavjud

bo'lganda, interferentsion suratlari paydo bo'ladi, bu maksimal va minimal nurlanishning almashinishida ifodalanadi. Ushbu surat to'lqin uzunligining 1/20-lari aniqligi bilan relefni chuqurligini aniqlashga imkon beradi.

## **2.5. Metallografik mikroskoplarning asosiy turlari**

Korxonada va tadqiqot laboratoriyalarida ishlatiladigan mikroskoplar odatda yorug'lik va qorong'i joylarda va polarizatsiyalangan nurlarda 1500 marta kattalashtirib ko'rishingiz mumkin. Masalan, MMP-4, MIM-8, MIM-10, Neofot-32 mikroskoplari haqida gapirish mumkin.

Metallografik tadqiqotlar o'tkazishda sifatli strukturaviy taxlil juda ko'p vaqt talab qiladi. Ushbu operatsiyani avtomatlashtirilgan tasvir analizatorlari juda osonlashtiradi. «KVANTIMET», «EPIKVANT» kabi analizatorlar juda mashxurdir. Zamonaviy tasvir analizatorlari ko'p funktsional avtomatlashtirilgan tizimlar bo'lib, ular kompyuterlar yordamida amalga oshiriladi.

Sifatli tarkibiy taxlil qilish uchun metallografik mikroskoplar videokameralar bilan jihzlanishi mumkin. Olingan tasvirlarni taxlil qilish kompyuterda maxsus dastur yordamida amalga oshiriladi. Ushbu tizim ob'ektlarni aniqlash va tasniflash, ob'ektlarning geometrik, rang va yorqinligi parametrlarini aniqlash, statistik taxlil qilish va tadqiqot natijalariga hisobot berish imkonini beradi.

### **NAZORAT SAVOLLARI:**

1. Optik metallografiya qanday metod?
2. Metallografik tadqiqotlar uchun ob'ektlar bo'lib nima xizmat qiladi?
3. Shlif qanday tayyorlanadi?
4. Metallografik mikroskopni asosiy qismlari va ishlash prinsipi qanday?
5. Metallografik mikroskoplarda nechta linza mavjud?
6. Metallografik mikroskoplarda necha matritta kattalashtirishi mumkin?
7. Metallografik mikroskoplarda imkoniyatlari qanday?
8. Tasvir nuqsonlariga nimalar kiradi?
9. Metallografik mikroskoplarning ish maydniga qarab vazifalari qanday?
10. Okulyarlar nima bilan ajratiladi?
11. Metallografik mikroskoplarda faza kontrast usuli?
12. Metallografik mikroskoplarda interferensiya usuli?
13. Metallografik mikroskoplarning qanday turlari mavjud?

### **3-BOB. TRANSMISSION ELEKTRON MIKROSKOP**

#### **3.1. Elektronlarni moddalar bilan o'zaro ta'siri**

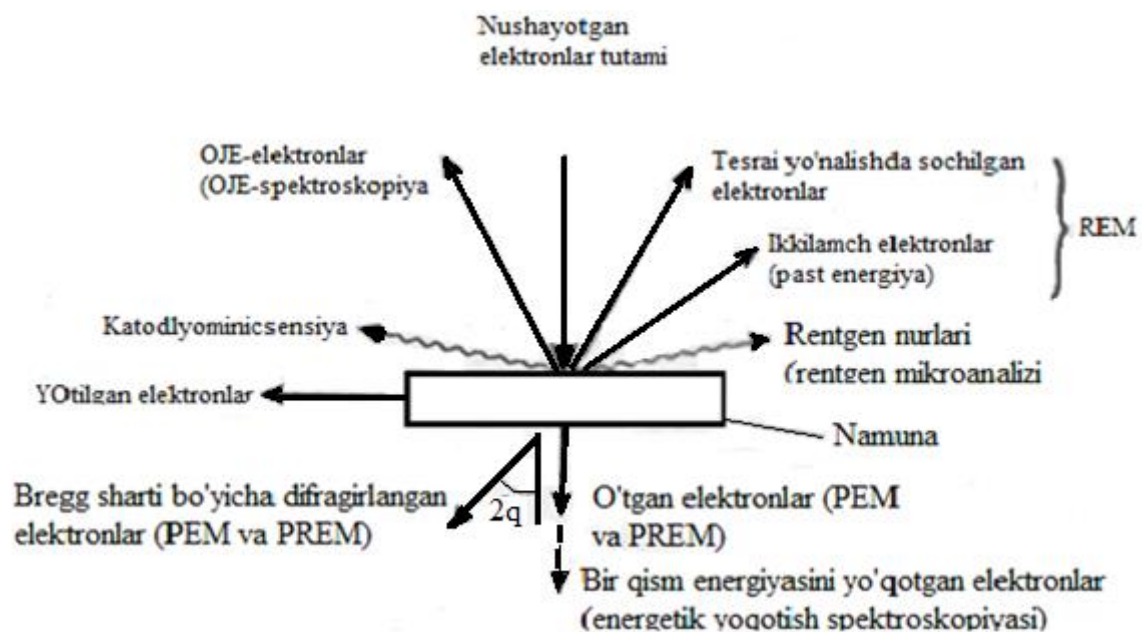
Elektronlarning moddalar bilan o'zaro ta'sirlashuvining turli xil jarayonlari elektronning turli funktsiyalarini o'rganishga imkon beradi (3.1-rasm) Elektron bilan o'zaro ta'sirlash xususiyatlarini aniqlaydigan elektronlarning asosiy xarakteristikasi va natijada qabul qilingan ma'lumotlarning tabiati modda elektronlarning tezligi yoki aniqroq, ularning kinetik energiyasi.

Elektronlarning yuzlab elektron vorisi (sekin elektronlardagi diffraktsion usul) energiyasi bilan elektronlarning izchil (elastik) tarqalishi qattiqqatlamlarning sirt qatlamining atom-kristal tuzilishini o'rganishga imkon beradi. Uch o'lchovli atomik kristal tuzilishini taxlil qilish uchun elastiki tarqalgan elektronlarning o'nlab va yuzlab kiloelektronvolt (tezkor elektron diffraktsion usuli) tartibidagi energiya bilan diffraktsiyasi ishlatiladi. Tezroq elektronlar difraktsiya usuli rentgen diffraktsiyasiga o'xshaydi.

Tez elektronlarning bikir tarqalishi va difraktsiyasi elektron-optik analiz usuli - shaffof elektron mikroskopi usuli (SHEM) asosida amalga oshiriladi. Kristalli moddalarni o'rganish uchun qo'llaniladigan bu usul ko'pincha diffraktsion elektron mikroskopi deb ataladi. Ba'zan atamalar elektron mikroskopi (transmisson elektron mikroskopiyasi) atamasi ishlatiladi.

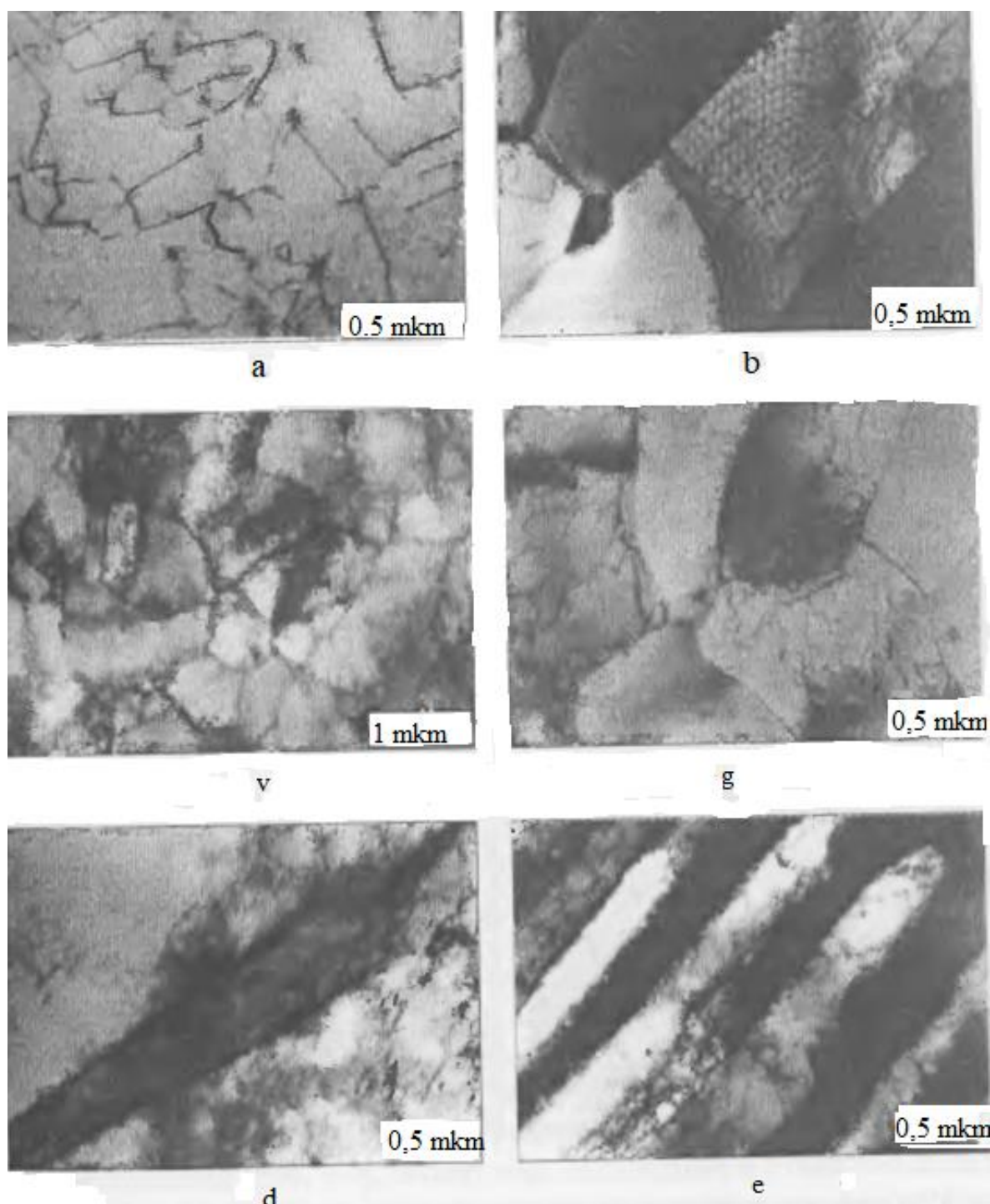
Shaffof elektron mikroskopi (SHEM) elektron nurning o'rganilayotgan ob'ektga ta'siriga asoslangan. Ob'ektda bu holda paydo bo'ladigan nurlanish sxematik tarzda 3.1-rasmda ko'rsatilgan bo'lib, uning natijasida Bragg holatiga mos keladigan ob'ekt va elektronlar orqali o'tadigan elektronlar shaffof elektron mikroskopi usuli qo'llanilishida ishtirok etadi.

SHEM ni yaratishda birinchi qadamlar 30-yillar boshlanishiga (1931-1932) to'g'ri keladi. Ular elektron optikani rivojlantirish bilan bog'liq edi. Elektron mikroskopning birinchi prototipi taxminan 1934 yilda Rusk (E. Ruska) tomonidan qurilgan. Amalda ishlatiladigan elektron mikroskoplarning birinchi namunalari 1939 yil oxirida paydo bo'ldi. Borres va Rask tomonidan ishlab chiqilgan mikroskop «Siemens» mikroskopining prototipi bo'lib xizmat qildi. 1939 yilda birinchi marta tasvirlangan Prebus va Hiller dizayni RCA mikroskopining prototipi bo'ldi. Taxminan besh yil mobaynida bir nechta kompaniyalar ushbu turdagi asbob-uskunalarni ishlab chiqarishni yo'lga qo'ygan. 1950 yilga kelib, elektron mikroskoplari 20 dan 10A gacha bo'lgan imkoniyatlar bilan yaratildi. O'shandan beri elektron mikroskoplari ko'plab ilmiy-tadqiqot institutlari amaliyotida mustahkam o'rtnashib olingan.



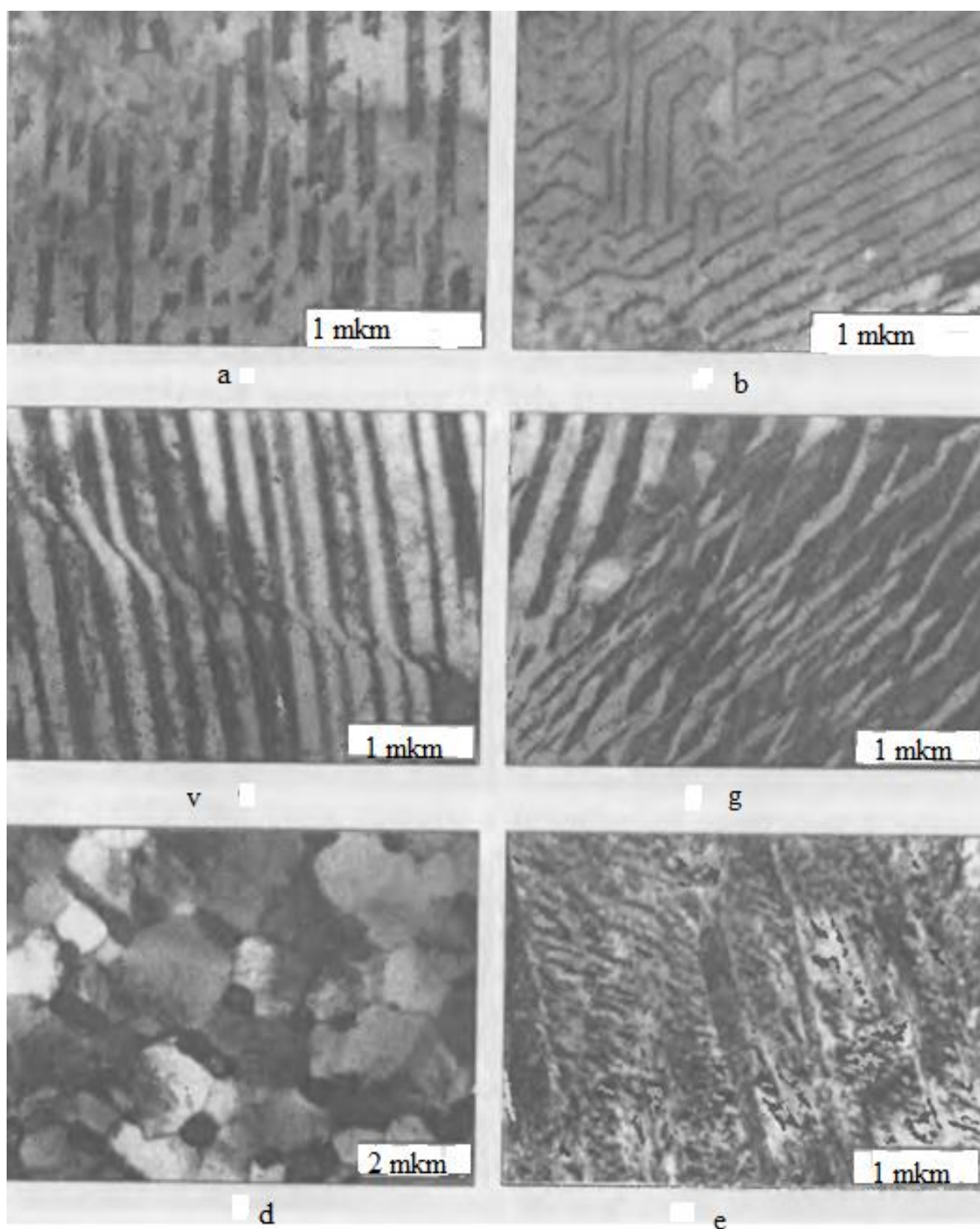
3.1-rasm. Elektronlar bilan nurlanganda namunada hosil bo'ladigan nurlanish turlari

Transmisson elektron mikroskopidan foydalanishda o'zgarishlar konvertatsiya qilish mexanizmlari, donalarning chegaralari va interfeys sirtlari tuzilishi, plastik deformatsiya jarayonlari, ko'pburchak shakllantirish, qayta kristallanish, nurlanish zaryadlari va boshqa ko'plab jarayonlar va hodisalar asosini tashkil etuvchi zamonaviy tushunchalarni shakllantirishga hal qiluvchi zamonaviy materialshunoslikka ta'sir ko'rsatdi. Metall materiallarning dislokatsiya tuzilishini o'rganish uchun shaffof mikroskopidan foydalanishning ba'zi bir misollari 3.2-rasmda ko'rsatilgan. 3.3-rasmda xarakterli geterofazaga strukturasiga ega bo'lgan materiallarning yupqa tuzilishini ko'rsatilgan. Yuqoridagi tasvirlar sementit zarralarining shakli va hajmini ishonchli tarzda baholash imkonini beradi, ferrit matritsadagi joylarini ochadi, lamellar perlitidagi deformatsiyalar mexanizmlarini va plastinkali perlit koloniyalarini emirilish qayta hosil qiladi.

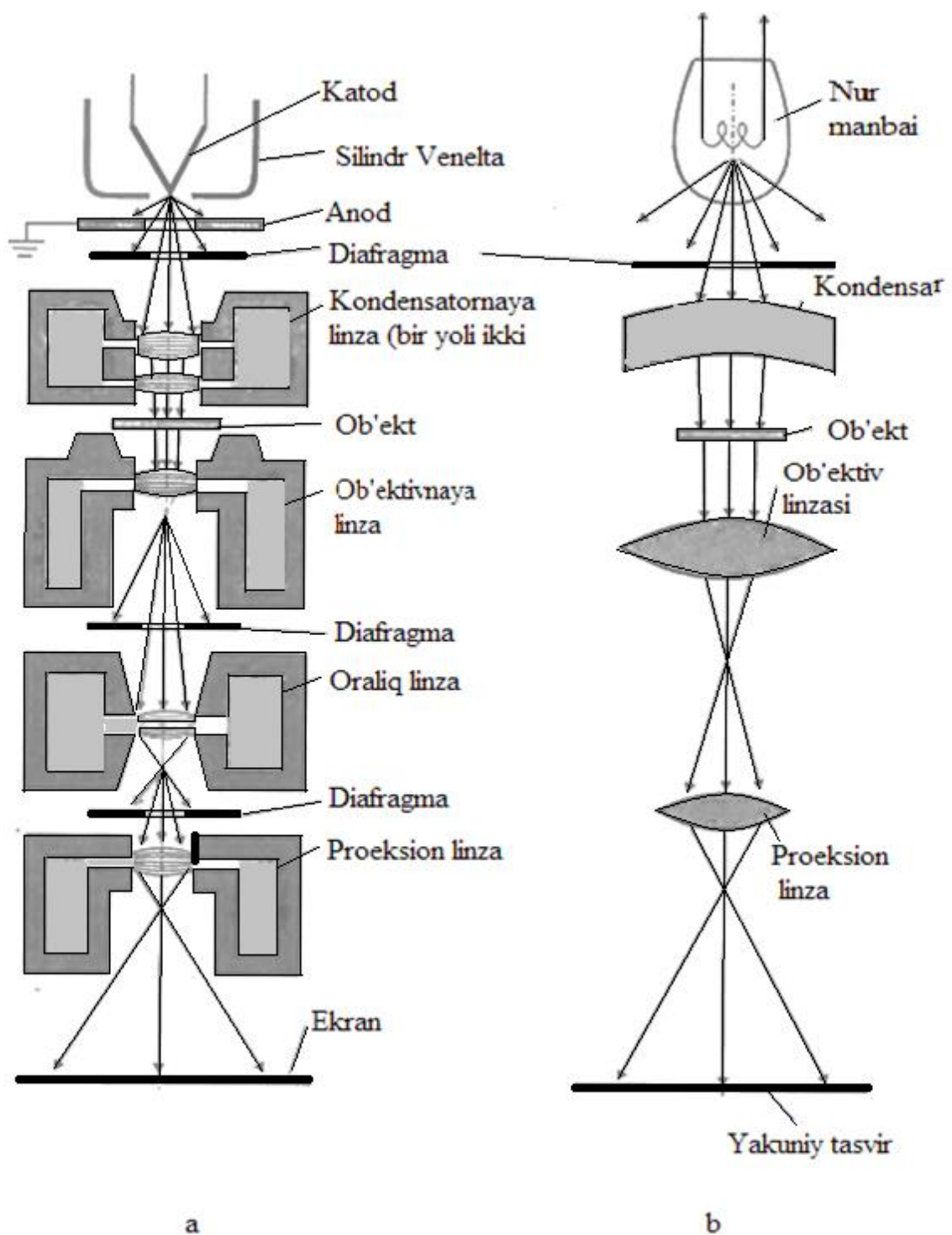


3.2-rasm. Shaffof elektron mikroskop qo'llanganda qayd etilgan po'latdagi dislokatsion struktura: a- po'lat 5 dagi dislokatsiya «o'rmoni»; b- U8 po'latini subdona chegarasidagi dislokatsiya tuzilishi; v,g- 09G2S po'latdagi dislokatsiya substrukturasi; d-12XN3A po'latida dipol maxsus disklinatsiyasi; e- 12XN3A po'latdagi polosali struktura





3.3-rasm. Shaffof elektron mikroskopda qayd etilgan uglerodli po'latlarning strukturasi: a- evtektikagacha bo'lgan po'latda psevoperlit; b- U8 po'latida turli yo'nalishlarda yo'naltirilgan martensit plastinalari; v-U8 po'latda sementitni deformatsiyalangan plastinalari; g- U8 po'latida murt singan sementit plastinalari; d- U8 po'latida subdonalar chegarasida joylashgan sementitning globulyar zarralari; e- U8 po'latida pastki beynit



3.4-rasm. Shaffof (a) va yorug'lik (b) mikroskoplarining asosiy uzellari

### 3.2. Mikroskopni tuzilishi

Transmission elektron mikroskopi elektron pushka va elektromagnit linzalar tizimidan iborat bo'lib, u vertikal kolonda  $10^{-3} \dots 10^{-4}$  Pa bo'lgan vakuum bilan qamralgan.

Transmission elektron mikroskopining optik sxemasi an'anaviy nur mikroskopiga o'xshash (3.4-rasm). Kondensor linzasi tor elektron nuriga ega bo'lgan ob'ektni «yoritadi». Ob'ektiv va proektorli linzalarni kengaytirilgan hajmdagi ob'ekt tasvirlari ekranga o'tkaziladi.

TEMning asosi elektronlar manbai bo'lib, vakuum xonasida joylashgan elektron pushkadir. Elektron pushka yoritish tizimining vazifasini bajaradi. U uchta asosiy elementlardan iborat: katod, anod va ular orasida ishlaydigan Venelt silindri, u o'z navbatida setka (triode tipidagi chiroq) vazifasini bajaradi. Katod volfram chiviqidan tayyorlangan. Natijada katodni qizdirganda uning yaqinida joylashgan termoelektron emissiya elektronlar bulutini hosil qiladi. Katod va anod o'rtasida yuqri tezlashuvchi kuchlanish qo'llaniladi. Ushbu kuchlanish ta'siri ostida elektronlar katoddan anodgacha ko'chiriladi. Anodda kichik teshik mavjud. Ba'zi elektronlar bu teshikka kirib, elektron mikroskop ustuni bo'ylab yurishadi (3.4-rasm). Anod bo'shligiga o'tgan elektronlar elektromagnit linzalardan ta'sirlanib, mikroskopning tarkibiga qarab farqqilishi mumkin. Elektron tushgan birinchi linza kondenser linzalaridir. Konstruktiv ko'rinishda kondensetor bir yoki ikki linzadan iborat bo'lishi mumkin. Kondensetor uchun muammo, elektronlarni namunaga qaratishdir. Kondenser linzalari namunaga elektron manba kichraytirilgan tasvirini qaratishi mumkin, bu esa  $\sim 2\text{mm}$  nuqtaga aylantirilishi mumkin. Bu ob'ektning tekshirilgan maydonini yaxshi yoritishni ta'minlaydi. Asosiy elektron nurining kichik burchagi birlamchi elektron tutam kondanserli diafragma orqali ta'minlanadi.

Ob'ektning birinchi tasviri (tadqiqot qilinayotgan namuna) ob'ektiv linzasi tasvirining tekisligida hosil bo'ladi. Kelajakda bu tasvir yana ikki marta - oraliq va proeksion linzalarida ortadi. Proeksion linzalari ob'ektning oxirgi tasvirini fluoresentslovchi mikroskopning ekranda yoki fotoplasinkada hosil qiladi.

Apertura diafragmasi yonida joylashgan ob'ekt orqali elektronlar ob'ektning atomlari bilan o'zaro bog'lanib, asl yo'nalishdan ajralib qoladi va tarqalib ketadi. Tarqalish bikir va bikir emas bo'lishi mumkin. Bikir tarqalib turganda, elektronlar tezligi faqat yo'nalish bo'yicha o'zgaruvchan, qiymati o'zgarmaydi. Bikir bo'lmagan tarqalishda elektron tezligi har ikkala kattalikda ham, yo'nalishda ham o'zgaradi. Bunday holda, elektron energiyasining bir qismi ob'ektlarning atomlarida elektronni uyqotish va ionlashiga sarflanadi. Mendelev jadvaldagi element sonining ko'payishi bilan bikir tarqalish ulushi ortadi.

Ob'ektda tarqalib ketgan elektronlar parchalanib ketgan nurni shakllantiradilar. Ob'ektivning orqa markazida joylashgan tekisligida diametri 10 dan 50 mm gacha bo'lgan bir qator teshiklar bilan almashtiriladigan diafragma o'rnatilgan. Diafragmaning diametri bilan aniqlangan ob'ektiv linzaning ochiladigan burchagidan katta burchakka cho'zilgan elektronlar bu diafragma materialining

qalinligida so'riladi va mikroskopning ekranda tasvir shakllanishida ishtirok etmaydi. Bu sizga ob'ektning o'tkir, kontrastli qiyofasini olish imkonini beradi. Diafragmaning diametrlari qanchalik kichik bo'lsa, tasvir yana farqlanadi.

Natijada, ushbu ob'ektning boshqalarga nisbatan tarqalish qobiliyati qanchalik katta bo'lsa, ob'ektiv linzaning ochiladigan burchagidan katta burchak bilan tarqalgan elektronlar sonining ko'payishi va bu ob'ektning tasvirini shakllantirish jarayonida ishtirok etadigan elektronlar sonining ko'payishi kuzatiladi. Shunday qilib, tekshirilayotgan ob'ektning ma'lum bir qismini tarqalish qobiliyati qanchalik katta bo'lsa, uning tasviri shunchalik qora bo'ladi.

Ob'ektivning markazlashtirilgan uzunligini o'zgartirish orqali tasvirga e'tibor qaratiladi. Fokus masofasining o'zgarishi linzalarni o'rab turgan oqimni o'zgartirish orqali amalga oshiriladi.

Birlamchi elektron nurini diafragma stoliga nisbatan almashtirish orqali, faqat tarqoq elektronlar u orqali o'tishi uchun ob'ektning qorong'i maydoni tasvirini olish mumkin. Keyin ob'ektning mikroskop ekrani bo'ylab tarqaladigan elektronlar yorqin bo'ladi.

Ob'ektiv tasvirining linza tekisligida harakatlanuvchi selektor (mikrodifraksion) diafragma joylashadi. Ushbu diafragma yordamida uni belgilangan joylaridan mikrodifraksion tasvir olish mumkin. Selektor diafragma o'rnatilgandan so'ng, oraliq linzadagi oqim kuchini ushbu linzaning ob'ektiv tekisligi ob'ektiv orqa fokal tekisligiga mos keladigan qiymatga kamaytiradi. Diafragma chetga suriladi. Natijada, mikroskop ekranida namunaning tanlangan selektor diafragma qismidan difraksion tasvir proektsion diafragma yordamida hosil qilinadi.

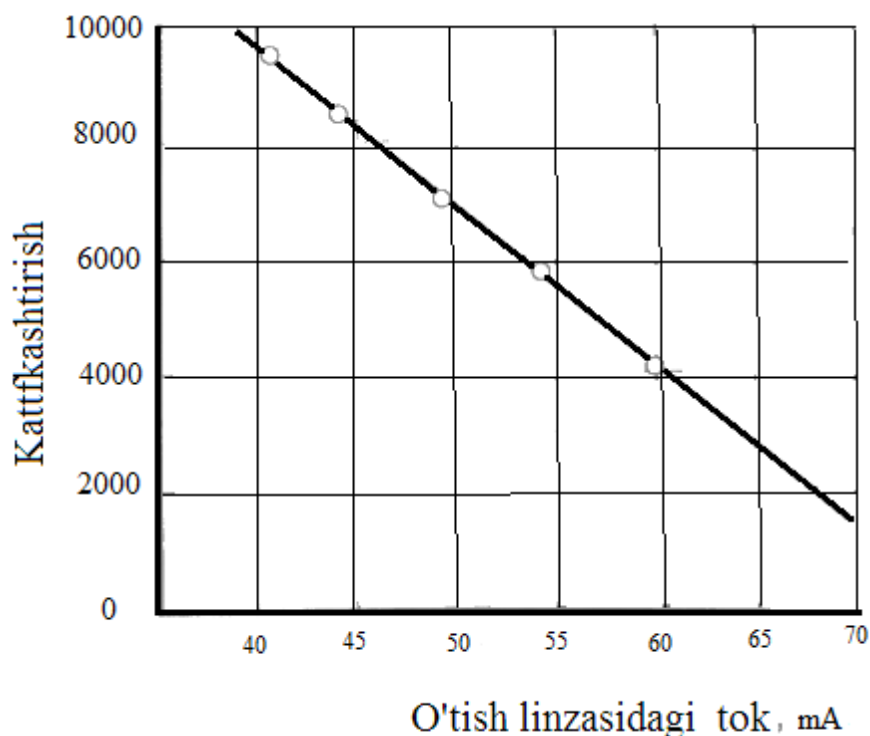
Metrologik va metallofizik tadqiqotlar o'tkazish uchun odatda 100 ... 200 kV kuchlanishli kuchlanishli mikroskoplar qo'llaniladi. Ob'ektning turiga (materialning zichligi) qarab, bunday mikroskoplar  $\sim 0,2 \dots 0,6$  mm qalinlikdagi narsalarni ko'rishga imkon beradi. 400, 500, 1000, 1500 va hatto 3500 kV kuchlanishli yuqori va yuqori kuchlanishli elektron mikroskoplari mavjud. Ushbu mikroskoplar bir necha mikrometrgacha qalinligi bo'lgan metall buyumlarni tadqiqot qilish imkonini beradi.

Shaffof elektron mikroskoplari doimiy ravishda takomillashtirilmoqda. Hozirgi vaqtda 500 kV kuchlanishli va yana 0,1 ... 0,2 nm o'lchamli, elektron nurni skanerlash uchun elektron-optik tizimlar bilan jihozlangan va turli jarayonlarning dinamikasini o'rganish uchun turli xil birikmalar bilan jihozlangan mikroskoplar yuqori mahalliy va yuqori darajada sezgir kimyoviy taxlillar o'tkazish mumkin.

### 3.3. Shaffof elektron mikroskoplarining kattalashtirishi va imkoniyatlar

Odatda transmission elektron mikroskop tomonidan erishilgan kattalashtirish  $\sim 200 \dots 300000$  marta. Kattalashtirishni tanlash ob'ektning o'rganilayotgan qismlarining o'lchamiga va xususiyatlariga bog'liq. Kichik qismlarga ajratib olishni ta'minlash kerak bo'lsa, siz katta hajmdan foydalanishingiz kerak.

Etalon setkalardan tayyorlangan maxsus replika yordamida kattalashtirishni onson kalibrlash mumkin. Bu setkalar elektron asboblari tayyorlaydigan firmalar tomonidan etkazib beriladi. Elektromagnit linzalarning oqimlarining turli qiymatlari bilan test ob'ektining fotosuratlarini olib, kalibrlash bog'anishini qurish va u yordamida asbobni kattalashtirishi aniqlanishi mumkin. 3.5-rasmda shaffof elektron mikroskop uchun odatdagi kalibrlash bog'liqligi ko'rsatilgan. Olingan bog'lanish faqat ma'lum bir qurilma uchun va faqat ma'lum bir tezlashtirilgan kuchlanish uchun amal qiladi.

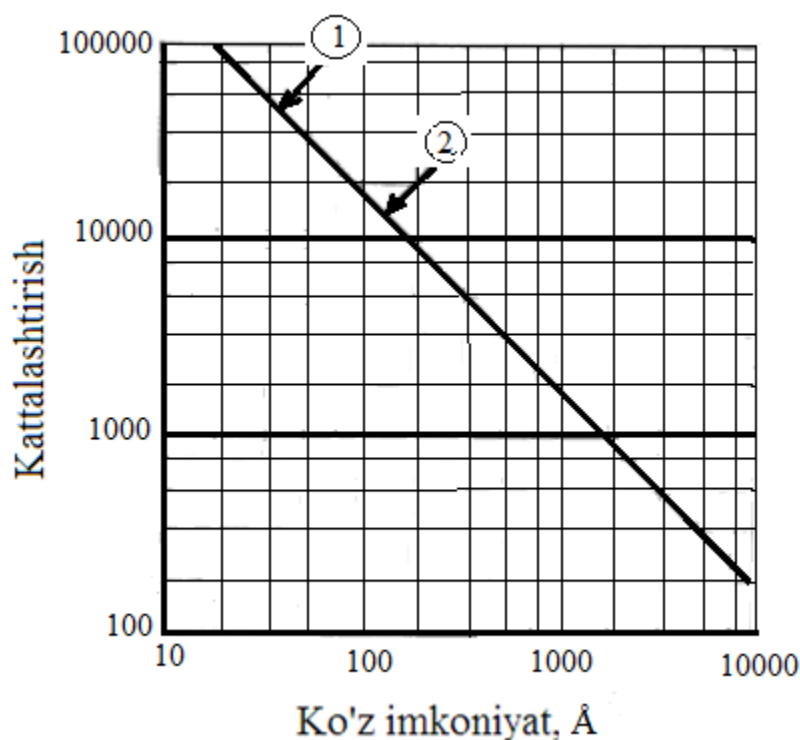


3.5-rasm. Shaffof elektron mikroskop uchun odatdagi kalibrlash egri chizig'i

Kattaroq kattaliklardan foydalanish sizni bir-biriga yaqin bo'lgan chizig'larni yoki nuqtalarni masalani ko'zdan aloqida qismlar sifatida ko'rib chiqishga imkon beradi. Har qanday optik qurilma nazariy imkoniyatlari ob'ektni yoritish uchun ishlatiladigan nurlanish to'lqin uzunligi tartibiga ega. Yuzkilovolt kuchlanishli elektron mikroskopi uchun elektronlarning to'lqin uzunligi 0,03 A ni tashkil qiladi. Biroq, elektron optikasida nuqsonlar mavjudligi (xromatik va sferik aberatsiya, astigmatizm) mavjudligi sababli, elektron mikroskoplarining aniqo'lchamlari 2-3

nazariy jihatdan yomonroqdir. Shunga qaramay, transmission elektron mikroskopisi atomik ( $\sim 0.1$  nm) ga qadar yuqori darajadagi tasvirlarni olish imkonini beradi. Yaponiyaning JEOL kompaniyasining elektron mikroskopida to'g'ridan-to'g'ri metallar: mis va oltinlarni tatomini ko'rish imkonini berdi. Xususan, oltinning atom tuzilishi qinligi 10 nm bo'lgan plenkada kuzatildi.

3.6-rasmda qurilmaning xal qilish imkoniyati va ko'zga zarur bo'lgan kattalashtirish, hamda bu kattalikni amalga oshirish o'rtasidagi bog'liqlik ko'rsatilgan. Hal qilish imkonini oshirirmay turib tasvirni yanada kattalashtirish ob'ekt haqida yangi ma'lumot bermaydi.



3.6-rasm. Ko'z imkoniyati va kattalashtirish o'rtasidagi bog'liqlini xal qilish uchun zarur bo'lgan munosibat

Aperturaning kengaytirilishi xal qilish imkoniyatini oshiradi. Biroq, juda katta kattalashtirishda katta aperturani ishlatilishi aniqlik chuqurligini qisqartiradi. Shunday qilib, nazariy jihatdan kichikroq tezlatish kuchlanishi va kichik apertura qiymatlari yordamida tasvir sifati yaxshilanadi, ya'ni yaxshikontrast, katta aniqlikchuqurligivayaxshixal qilish imkoniyatini beradi.

### 3.4. Kontrast va tasvirni hosil qilish

Amorf moddalarni o'rganish natijasida, elektron mikroskopning ekranidagi kontrastning paydo bo'lishi elektronlarning taqoq tarqalishi bilan bog'liq. Moddaning qatlami qalinroq bo'lsa, atomlarning tarqalishi qobiliyati (ya'ni, davriy

jadvalda elementning buyurtma sonining kattaroqligi) yoki uning zichligi qanchalik katta bo'lsa, elektronlarning ko'proq tarqalishi yanada kengroq burchak ostida amalga oshiriladi.

Elektron mikroskopning xal qilish imkonini oshirish uchun apertura ob'ektivini ochilishini maxsus apertura diafragmasi bilan cheklash mumkin. Ushbu diafragmani ob'ektivning orqa fokal tekisligi yonida o'rnatiladi. Faqat apertura diafragmasi teshigiga tushgan elektronlar tasvirni hosil qilishda ishtirok etadi. Tarqalish natijasida katta burchakka oqgan elektronlar va diafragma aperturasi teshigiga elektronlarkirmasa, u holda elektron tutami intensivligi, qaysiki tasvirni hosil qilishda ishtirok etayotgan elektronlar zaiflashadi va o'z navbatida mikroskop ekranida tegishli maydon tasviri yanada qora bo'ladi.

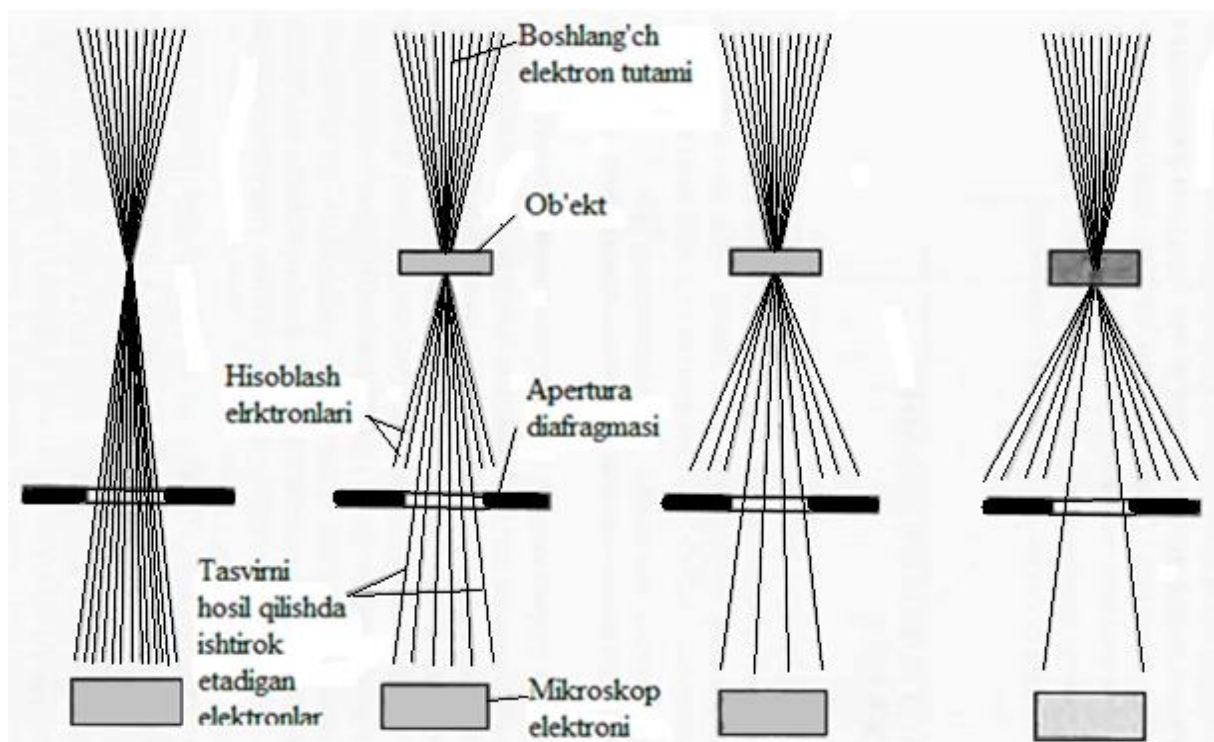
3.7 va 3.8-rasmlarda turli qalinlik va zichlikdagi ob'ektlar orqali elektronlarning o'tishini ko'rsatadigan diagrammalar keltirilgan. qalin va zichroq ob'ektlarni o'rganishda elektronning tarqalishi yanada ko'proq darajada bo'lishi o'zini namoyon qildi, shuning uchun apertura diafragmasi orqali kam miqdorda elektronlar o'tadi. Buning ma'nosi qalin ob'ektlarning tasviri yupqasiga nisbatan qoraroq bo'ladi.

Ob'ekt bir xil qalinlikdagi qismlarga ega bo'lsa-da, turli zichlikda, u holda bu qismlarda elektronlarning tarqalishi ham turli darajada namoyon bo'ladi. Maydon qanchalik zichroq bo'lsa, unda elektronlar tarqaladi, elektron mikroskopning ekranda yaqqolroq ko'rinadi (3.8-rasm).

Agar ob'ekt kristalli tuzilishga ega bo'lsa, u holda diffuzion tarqalishdan tashqari tasvir kontrastiga difraktsion tarqalishi ham ta'sir ko'rsatadi. Umumiy holatda, difraktsiya burchagi ob'ektivni apertura burchagidan oshib ketadi, shuning uchun yorqin rangli tasvirda barcha boshqa narsalar teng bo'lganda, kristall uchastkalar amorfga ko'ra qorong'roqquyuqroq ko'rinadi. Ob'ekt polikristal tuzilishga ega bo'lsa, ob'ektning elektron nuri tutamiga nisbatan yo'nalishiga qarab, alohida bo'laklarning (donalarning) tasvirining yorqnligi juda boshqacha bo'lishi mumkin.

Folganı bukılıshı yoki nuqsonlar oldida kristall panjarani lokal o'zgarishi, masalan dislokatsiyalar oldida elektronlarni qaytish sharti o'zgarishi mumkin. Metall folganing egriligi ba'zi bo'limlarida Vulf-Bregg sharti to'liq bajarilishi va yorqin rangli tasvirlardagi uchastkalarda qora polosalar ko'rinishidagi ekstinktsion egilgan chizig'i sifatida paydo bo'ladi. «Ekstinktsiya» so'zi aslida so'ngish, yo'q bo'lib ketishi, yo'q bo'lish degan ma'noni anglatadi. Agar o'zgaruvchi qalinlikdagi kristallni tadqiqot qilinsa (masalan, folga chetida) elektron interferentsiyasi bilan bog'liq bo'lgan qalinlik ekstintsiyon konturlari kuzatilishi mumkin.





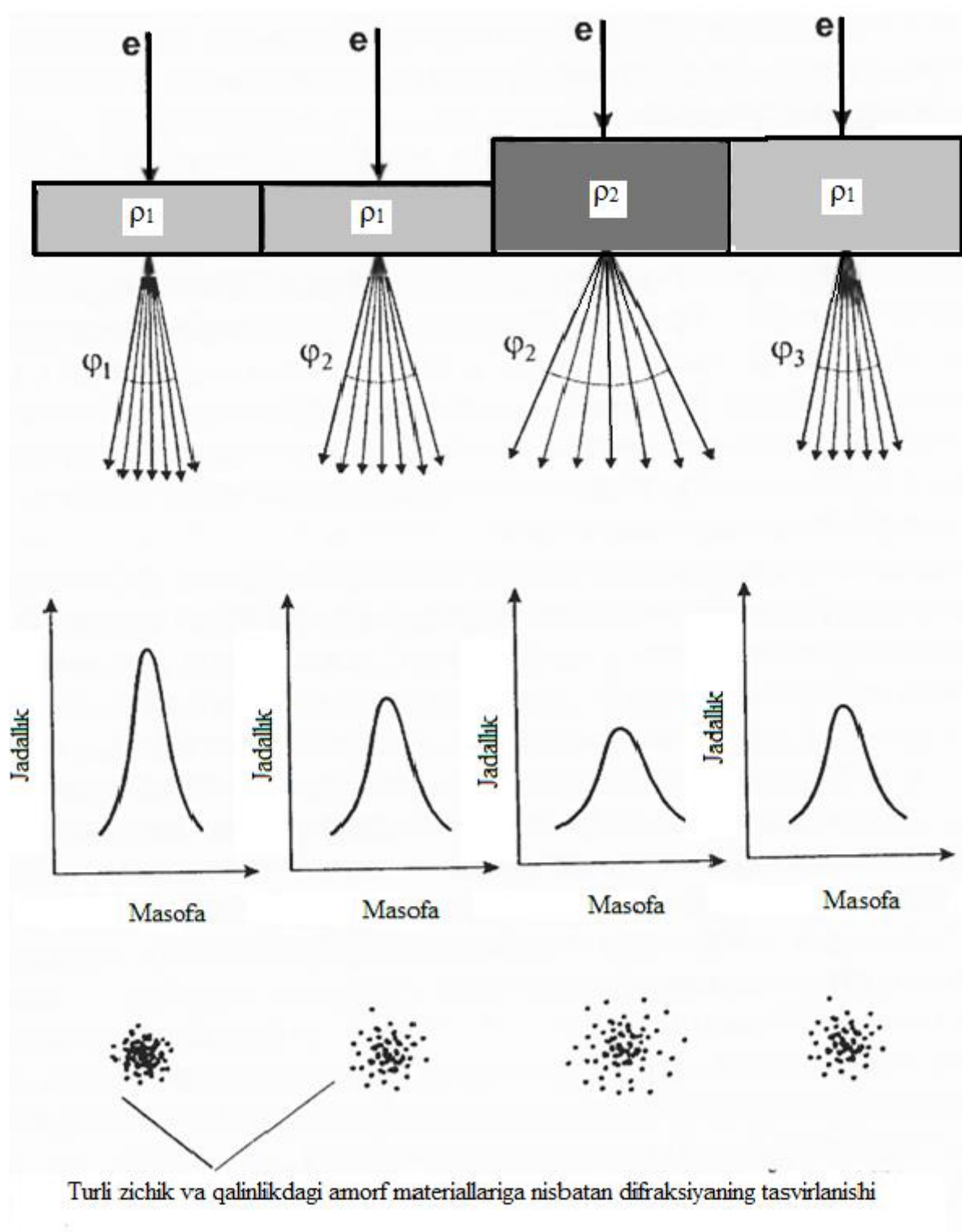
3.7-rasm. Turli qalinlikdagi ob'ektivlarni qo'llanganda amorf materiallarda kontur sxemasini hosil bo'lishi

Tasvirning difraksion kontrasti har qanday o'q atrofida og'ishi nazorat qilinadigan ob'ekt yordamida boshqarilishi mumkin. Ushbu operatsiya ob'ektning azimutal aylanishini o'qi atrofida har qanday burchakka, mikroskopning optik o'qiga parallel va  $20...40^\circ$  burilishni ta'minlaydigan maxsus gonometrik qurilmalar yordamida amalga oshiriladi.

Tasvirning yorqinligi tezlashtirilgan kuchlanishga mos, kimyoviy elementning atom nomeriga teskari proporsional va folga qalinligi bilan mutanosib. Yorqinlik, shuningdek, namunaning burchagi bilan ham o'zgaradi, chunki bu burchak elektron nurlari tutamini o'tishining samarali qalinligini aniqlaydi.

Ob'ektiv linzanig aperturasini kamaytirish orqali rasm kontrastini yaxshilash mumkin. Nazariy jihatdan mikroskopning hal qilish imkoniyatini yo'qolishiga olib kelishi kerak. Tezlashuvchi kuchlanishning pasayishi ham kontrastning yaxshilanishiga olib keladi.

Replikalar tadqiqot ob'ektlari sifatida ishlatilsa, bu holda replikani xrom, platina, palladiy yoki oltin-palladiyli qotishma bilan purkalsa kontrastning kuchayishiga yordam beradi.



3.8-rasm. Elektronlarni tarqalishi, intensivlikni taxsimlanishi va difraksiyon ko'rinishni amorf materiallarni o'zgaruvchi zichligi va qalinlik semasi:  $\varphi$ -elektronlarni tarqalish burchagi;  $\rho$ -materiallar zichligi,  $\rho_1 < \rho_2$

Tasvirning aniqligi asosan ob'ekt sirtining tozaligiga boqliq. Ko'pgina mikroskoplarda uglevodorod molekulalari kolonnada mavjud. Ushbu molekulalar

diffuziya nasosining yog'idan va vakuum yog'idan bug'lanadi, namunaning sirtiga adsorblanadi va elektron nurlari ostida bo'linadi, uglerod polimerlari plenkasini hosil qiladi. Ushbu plenka tufayli kontrast va emirilish kamayadi. Ushbu aralashuvning ta'sirini kamaytirish uchun eng quyi intensivlikdagi elektron nurlari ishlatilishi kerak. Yana bir echim - ob'ektga iloji boricha yaqin joylashtirilgan azot «Tutgich»larini qo'llashdir. Azot tutgichlari suyuq azot bilan to'ldirilgan idish. Bunday qurilmaning sovuq yuzasida ifloslantiruvchi uglevodorod buqlari kontsentratsiyasi taxminan 95% ni tashkil qiladi.

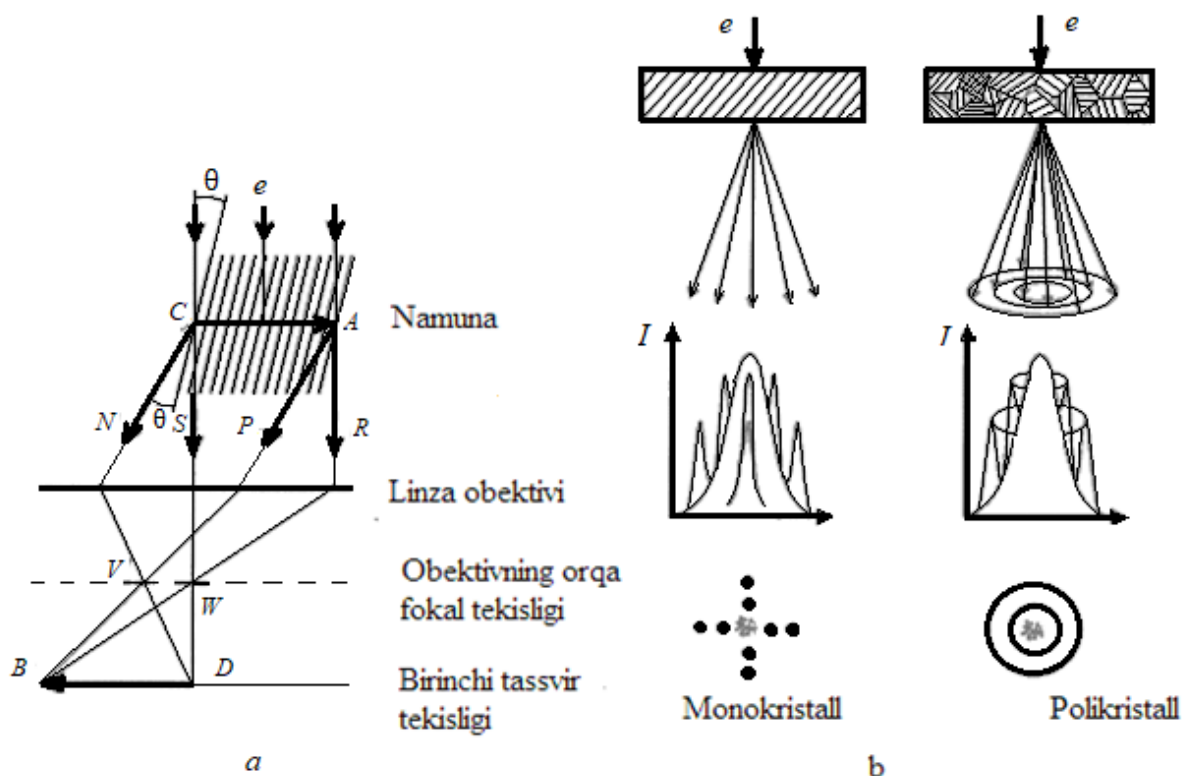
### **3.5. Elektronlarni modda tomonidan tarqalishi. Elektron mikroskopda difraksion tasvirni hosil bo'lishi**

Elektron mikroskopida elektronlar bir moddadan o'tib ketganda, ularning ba'zilar turli yo'nalishlarda va turli burchaklarda ostida asosiy nur tarqalish yo'nalishidan chetlanadi. Namuna moddasi o'anchalik zich va uning qalinligi qanchalik katta bo'lsa, u xolda tushayotgan elektronlarning ko'p qismi tarqoq bo'lib, tarqaladigan burchak ham katta bo'ladi. Bu sxematik shaklda turli zichlik va qalinligida amorf namunalar misolida 3.8-rasm ko'rsatilgan. Xuddi shu rasmda tegishli intensivlidagi elektron nurlar tutamini taqsimlanishini ko'rsatilgan.

Ob'ektni tasvirlari elektron mikroskopning ekranda har safar paydo bo'lganda, ob'ektivning orqa fokal tekisligida difraksion tasvirlari paydo bo'ladi. Bir difraksion tasvirlarini hosil bo'lishi 3.9,a-rasm ko'rsatilgan. Namunaning bir nuqtasidan kelib chiqqan nurlarning birinchi tasvir tekisligida fokuslanishi kuzatiladi. Shunday qilib, namunaning  $A$  nuqtasini tark etgan ikkita nur, birinchi kattalashagan tasvirning  $V$  nuqtasida fokuslanadi.  $S$  nuqtasidan chiqqan ikkita chiroq  $D$  nuqta fokuslanadi.

Bundan tashqari, ko'rinib turibdiki, namuna tomonidan singdirilgan bir xil yo'nalishda tarqalgan barcha nurlar ob'ektiv linzaning orqa fokal tekisligida fokuslanadi. Shunday qilib,  $R$  va  $N$  nurlari linzaning orqa fokus tekisligining  $Vb$  nuqtasiga fokuslanadi, singmagan bir xil yo'nalagan  $R$  va  $S$  nurlari  $W$  nuqtasida fokuslanadi.

Natijada, namunaning bir nuqtasida tarqalgan nurlar (masalan,  $S$  va  $A$  nuqtalaridan kelib chiqqan ikkita nur) birinchi tasvir tekisligiga фокусланади, шу bilan birga namunalar bir xil yo'nalishda tarqalgan nurlar (masalan,  $R$  va  $N$ ) ob'ektiv linzasining orqa fokal tekisligida fokuslanadi. Ob'ektivning orqa fokusli tekisligida shakllangan bu «tasvir» difraksion tasvir deb ataladi.

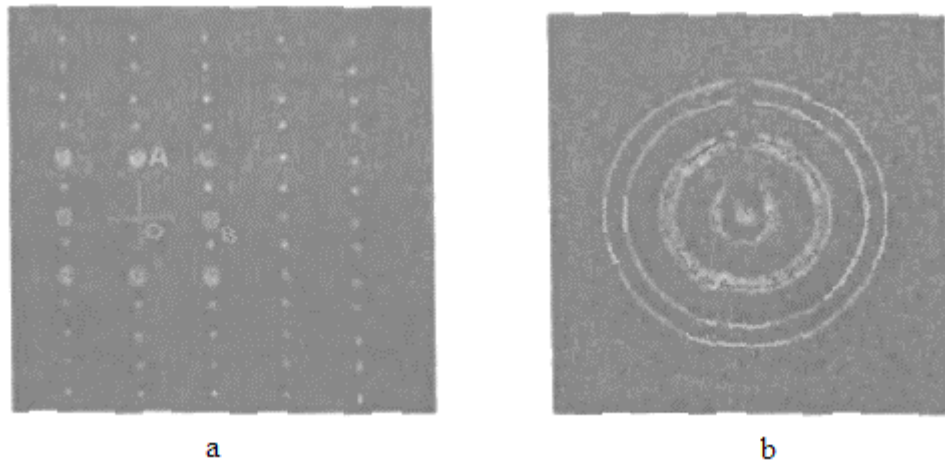


3.9-rasm. Difraksion ko'rinishni hosil bo'lishi: a-ob'ektiv linzasida elektron nurini yurish sxemasi; b- monokristall va polikristallar namunaga qarab elektronlarni tarqalishi, intensivlikni taqsimlanishi va difraksion shaklni ko'rinishni

Agar polikristallik namunasi o'rganilayotgan bo'lsa, elektron-gammada kontsentrik doiralar shakllidagi reflekslar kuzatiladi (3.10, b). Monokristall namunalarni tadqiqot qilinganda elektrogramma tasvirlari muntazam ravishda joylashgan doqlar ko'rinishida bo'ladi (3.10,v-rasm) .

Bu difraksion maksimumlar markaziy nuqtaga yaqinidagi diffuzion tarqalish fonida sodir bo'ladi. Difraksion maksimumning paydo bo'lishining sababi elektronlar kristalli namunadan o'tganda ma'lum bir yo'nalishdagi parallel parchalanuvchi tekisliklar yordamida tarqalgan elektron to'lqinlar bir-birining kuchayib, o'zaro ta'sirlashib, bir-birining kuchayishiga olib keladi. Boshqa yo'nalishlarning panjarali tekisliklar tomonidan tarqalgan elektron «to'lqinlar» «fazada emas» bo'lib chiqadi va o'zaro ta'sirlashib, ular bir-birini zaiflashtiradi. Ushbu tarqalgan elektronlardan hech qanday difraksion maksimumlar hosil bo'lmaydi.

3.9,b-rasmda intensivlikni taxsimlanishini olingan sxematik tasvirini, intensivlikni diskret maksimumli elektrogrammasi dog'lar yoki halqalar shaklida, qaysiki diffuzion fonida tarqalishi ko'rinishi ko'rsatadi.

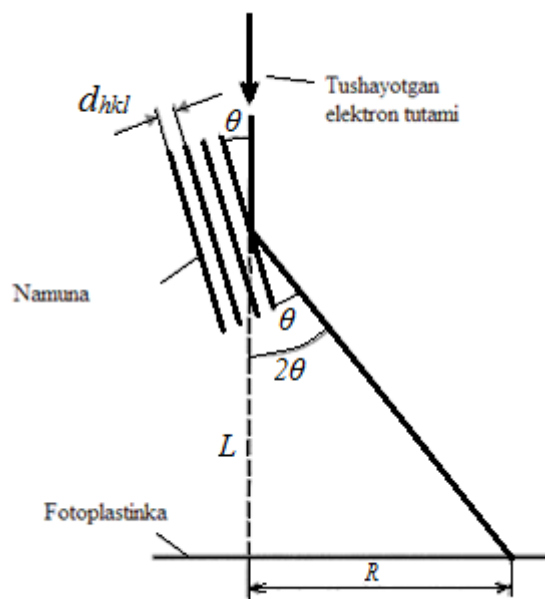


3.10-rasm. Monokristall (a) va polikristall (b) materiallarning difraksiya ko'rinishi

Oraliq masofa  $d$  bo'lgan panjara ko'p tekislili orintatsiyasi elektronlar diffraksiyasi doqlar yoki halqalar shaklida alohida reflekslarni hosil qilish uchun paydo bo'ladi, hamda ma'lum Vulf-Bregg qonuni bilan belgilanadi.

$$\lambda = 2d_{hkl} \cdot \sin\theta,$$

bunda,  $\lambda$ - tushayotgan elektronlarning to'lqin uzunligi (tezlashtiruvchi kuchlanishga bog'liq bo'lib, kuchlanish katta bo'lsa, to'lqin uzunligi kichik bo'ladi),  $\theta$ - elektron nuri yo'nalishi va atom tekisligi orasidagi burchak (3.11-rasm),  $d_{hkl}$  - ushbu tekislik seriyasining alohida tekisliklari orasidagi masofa.



3.11-rasm. Elektron nuriga  $\theta$  burchak ostida joylashgan tekisliklar orasidagi masofasi  $d_{hkl}$  teng panjaraning parallel tekisliklarining ketma-ketligidan elektronlarning tarqalishi.

Diskret difraktsiya nuqtalari yoki halqalar faqat shu holda hosil bo'ladiki, agar Vulf-Bregg qonunini qondiradigan tushgan elektronlar atom tekisliklarida tarqaladi, qachonki tushgan nurga nisbatan  $\theta$  burchagi ostida tushayotgan bo'lsa.

Agar ko'rsatilgan qonuniyat bajarilmasa, o'zaro ta'sirdagi tarqoq elektron to'liqlar bir-birini zaiflashtiradi. Natijada, elektrogrammada markaziy dog' atrofida faqat zaif diffuzion tarqalish fondi paydo bo'ladi. Lekin, aslida, kristalldagi ko'plab tekisliklar tizimida, doimo bir nechta tekislik topiladi va u tushayotgan nurlarga nisbatan Bregg burchagi ostida joylashgan.

Natijada, kristalli ob'ektdan olingan elektronogramma har doim diskret reflekslari bo'ladi. Umumiy atama «refleks» ko'pincha difraktsiya nuqtalari va difraktsiya halqalarini belgilash uchun ishlatiladi.

### **NAZORAT SAVOLLARI:**

1. Transmission elektron mikroskopning qanday turlari mavjud?
2. Transmission elektron mikroskopi qanday tizimdan iborat?
3. Transmission elektron mikroskopning elektronlar manbai nima?
4. Katod nimadan tayyorlangan?
5. Transmission elektron mikroskopning asosiy qismlari nima?
6. Metallofizik tadqiqotlar o'tkazish uchun qanday kuchlanish ishlatiladi?
7. Transmission elektron mikroskop tomonidan erishilgan kattalashtirish qancha?
8. Transmission elektron mikroskop uchun namuna nima?
9. Vulf-Bregg qonuni qanday?
10. Ob'ektni tasvirlari elektron mikroskopning ekranda hoil bo'lishi?

## **4-BOB. RASTR ELEKTRON MIKROSKOPI**

### **4.1. Kirish**

Bu makro- mezo va mikroskopik darajadagi materiallarning strukturaviy qolatini o'rganish uchun juda ko'p tomonlama va istiqbolli vositalardan biridir. Rivojlanish darajasi va shaffof elektron mikroskop (ShEM) modellari soni bo'yicha rastor elektron mikroskoplari (REM) oldinda [16,20,25].

Rastr elektron mikroskopi ob'ektlarni fraktografik tadqiq qilish uchun juda qo'l keladi. Taqlil qilinayotgan ob'ektlarning deformatsiyasi va emirilish xususiyatlarini aniqlash, materialning mo'rtlashish darajasini aniqlash, emirilish manbaini topish, emirilish bosqichini kuzatish imkonini beradi. Ushbu usul kukun metallurgiyasida ishlatilgan zarrachalarning o'lchami va shaklini o'rganishda kukun metallurgiyasida ham keng qo'llaniladi. Shu bilan birga, rastor spektroskopik mikroskoplardan foydalanib, oldindan aniqlangan mikrostruktura bilan metallografik shliflarni tadqiq qilish mumkin. Rastr elektron mikroskoplari yordamida olingan tasvirlarning namunalari 4.1 va 4.2-rasmlarda ko'rsatilgan.

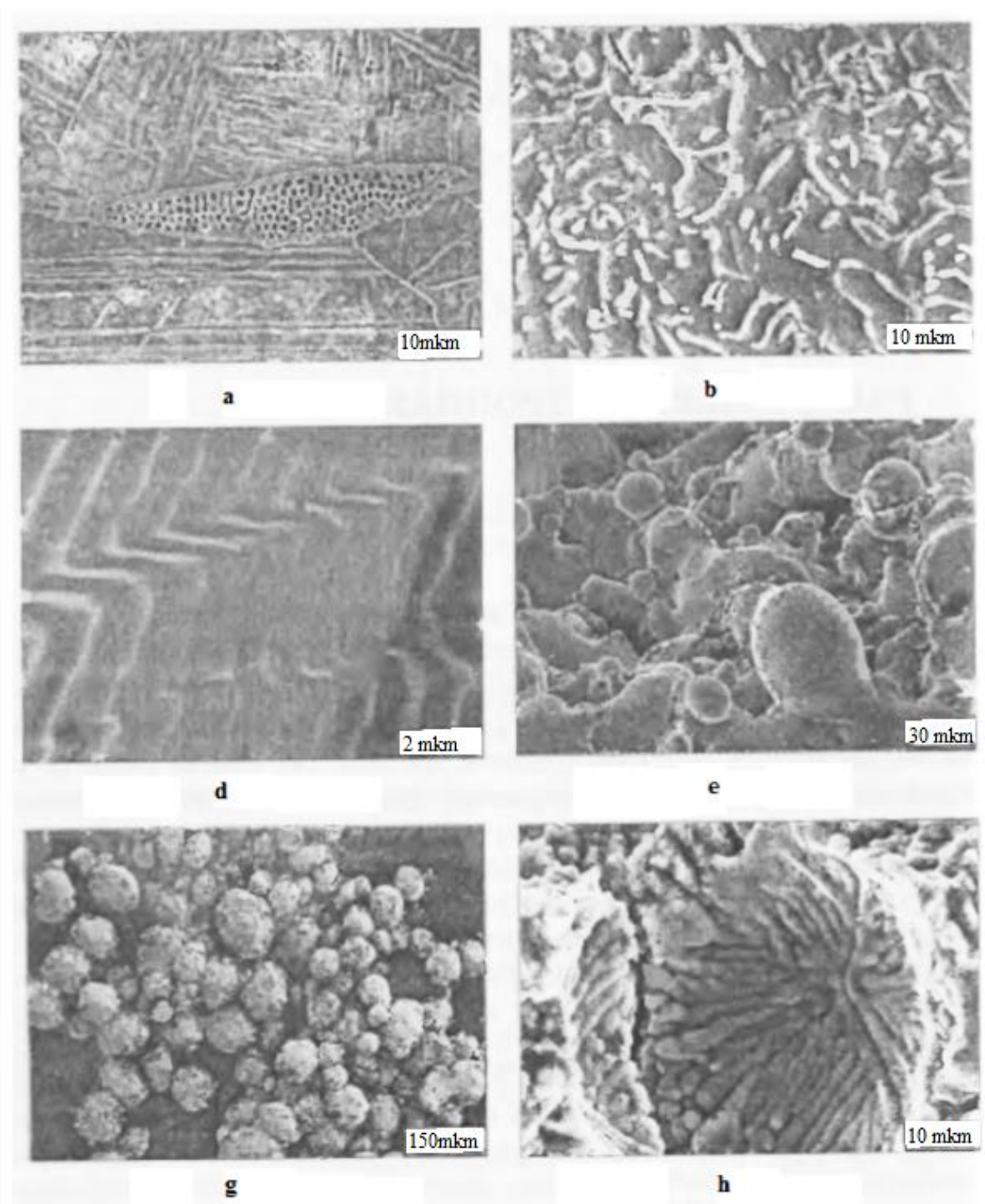
Rastr elektron mikroskopi yorug'lik mikroskoplari va shaffof elektron mikroskoplari orasidagi oraliq pozitsiyani egallaydi. 4.1 –jadvalda bu tadqiqotusullariningal qilish imkoniyatlari, fokusning chuqurligi va boshqa xususiyatlarga nisbatan qiyosiy ko'rsatkichlari aksettirilgan [25].

Yorug'lik, rastor va elektron mikroskoplar raqobatlashadigan qurilmalar sifatida qaralmaslik kerak. Ular muvaffaqiyatli tarzda bir-birini to'ldiradi, shuning uchun metallografik tadqiqotlardagi mukammal foydalanish eng istiqbolli hisoblanadi.

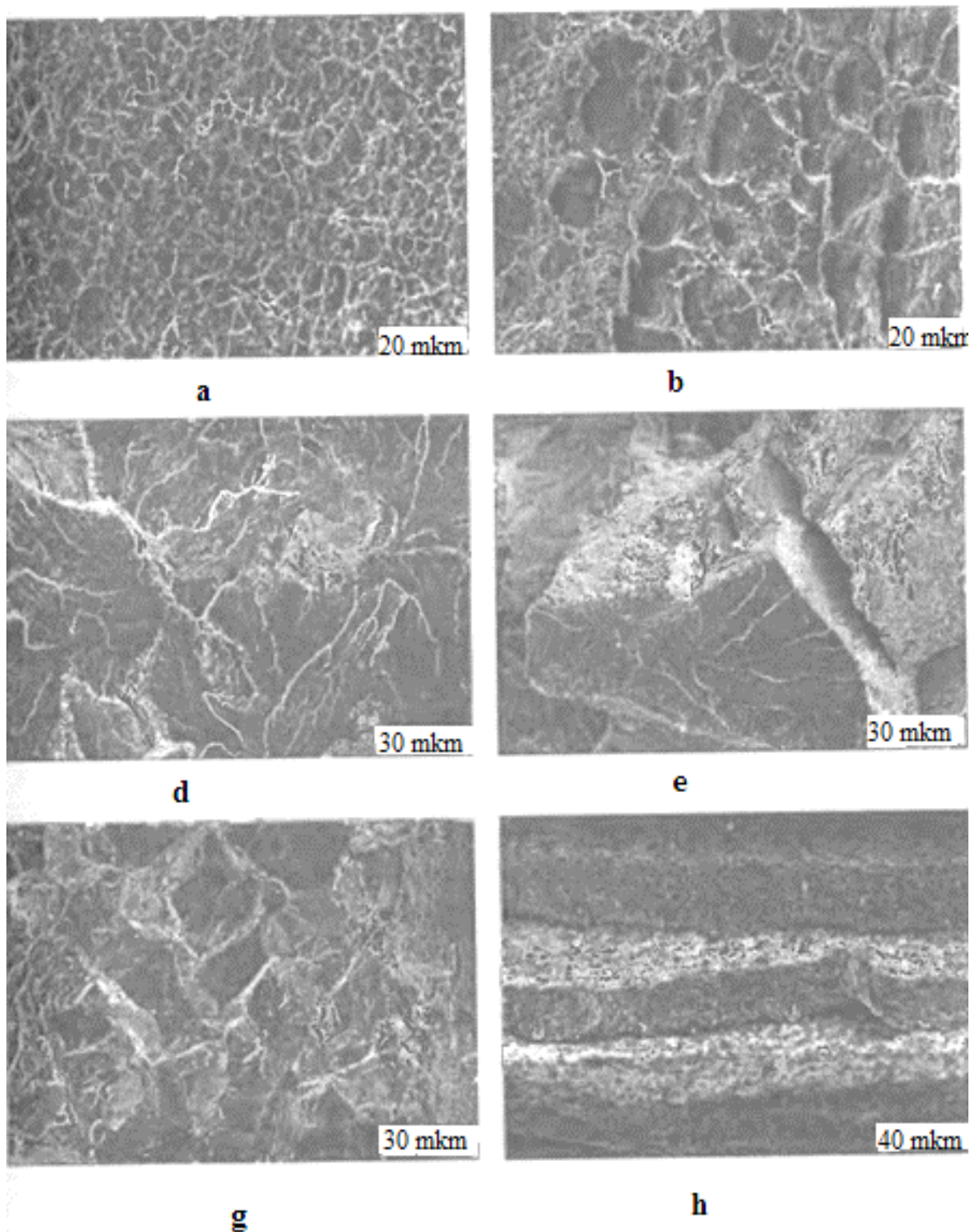
Rastr elektron mikroskopi tez rivojlanishini aniqlashda REMning quyidagi afzalliklari mavjud:

- yuqori hal qilish imkoniyati;
- katta fokus chuqurligi tasvirni yaqqolligi bilan uyqunlashganli, hamda aniq sirt topografiyasiga ega bo'lgan obektlarni o'rganishga imkon berishi;
- REM-ning yuqori ish faoliyatini ta'minlovchi va artefaklarga yo'l qo'ymaydigan tadqiqot ob'ektlarini tayyorlashning soddaligi;
- REMda yuqori aniqlikdagi tadqiqotlarni ta'minlaydigan kichik va katta kattalikdagi nishonlardagi o'zgarishlarning soddaligi;
- rentgen va katodli luminesans, elektron spektrometriya taxlilari hamda magnit va elektr mikromaydonlarni, difraktsiya effektlari va boshqalarni o'rganish;





4.1-rasm. Rastr elektron mikroskopidan foydalanib olingan metall ob'ektlarning rasmi: a- evtektoidgacha bo'lgan cho'yanda lediburit koloniyasi; b- po'lat 20 da sementit zarralari ferrit matritsasida; v- evtektoid po'lat perlitida plastik deformatsiyalangan sementit plastinalari; g- Elektron nuri bilan eritilgan qoplamali qattiq qotishma yuzasi; d-kukun material zarralari; e- alyumin qotishmasi 01420 payvand chokidagi g'ovaklik tubi



4.2-rasm. Metall materiallarning yuzalarini emirilish rasmi: a- texnik temirni yumshoq emirilishi; b- 09G2S po'latni yumshoq emirilishi; v- U8 po'latning transkristallik ariqchali sinishi; g, d- puxtalangan U8 po'latni interkristallik sinishi; e- «po'lat 7XNM- texnik temir» qatlamli kompozitsiyani sinishi

**Turli tipdagi mikroskoplarning solishtirma xarakteristikasi**

| Xarakteristika                      | EM           | REM                     | ShEM                               |
|-------------------------------------|--------------|-------------------------|------------------------------------|
| Imkoniyati                          | 5 mkm        | 0.2 mkm                 | 10 nm                              |
| Fokus chuqurligi                    | Kichik       | Yuqori                  | O'rtacha                           |
| Ishlash rejimi:                     |              |                         |                                    |
| Nur o'tish                          | +            | +                       | +                                  |
| Nur qaytarish                       | +            | +                       | -                                  |
| Difraksiya                          | +            | +                       | +                                  |
| Namuna tayyorlash                   | Oddiy        | Oddiy                   | Murakkab<br>Artefaktlari<br>mavjud |
| Tadqiqot uchun<br>maksimal qalinlik | Ommaviy      | O'rta                   | Juda nozik                         |
| Ishchi muqit                        | Turli tuman  | Vakuum                  | Vakuum                             |
| Foydali maydon                      | Kichik       | Katta                   | Kichik                             |
| Signal                              | Faqat tasvir | Ishlov berish<br>mumkin | Faqat tasvir                       |
| Tannarxi                            | Past         | Yuqori                  | Yuqori                             |

REM ning kamchiliklari yuqori narxni, namunadagi strukturani aniqlashning mumkin emasligi, rangli tasvirning yo'qligi, namunani vakuumda joylashtirish, tadqiqot vaqtida ba'zi materiallarning radiatsiyaviy ziyonni, dielektrlarni o'rganishdagi qiyinchilikni o'z ichiga oladi.

**4.2. Rastr elektron misroskopida tekshirish uchun namunalarni tayyorlash**

Rastr elektron mikroskopi bo'yicha tadqiqotlar uchun namunalarni tayyorlash juda sodda bo'lib, usulni amalga oshirishning o'ziga xos talablariga rioya qilish kerak [26].

Namunalarning o'lchami qurilmaning namuna o'rnatish jihozining o'lchamlari bilan cheklanadi. hozirgi kunda foydalaniladigan ko'plab mikroskoplarda ob'ekt tutgichning diametri 20 mm, balandligi 10 mm dan oshmaydi. Kichik o'lchamdagi namunalar, shu jumladan, 1 mm dan kam (ingichka simlar, lenta, changlar va boshqalar) o'rganilishi mumkin.

REM bo'yicha tadqiqotlar uchun namunalarni kesishda, tekshiriladigan yuzaning isitilishi va ifloslanishini oldini olish kerak. Bunday holda, taxlil qilinadigan sirt folga bilan extiyotkorlik bilan qoplanadi. qizib ketishini oldini olish uchun kesish jarayoni asta-sekin bajariladi, to'xtash joylari bilan suv yoki emulsiya bilan sovutiladi. Kesishdan keyin emulsiya yoki namlik izlari olib tashlanadi, keyin folga olib tashlanadi, namuna spirt yoki atseton bilan yuviladi va suyuqlikni butunlay olib tashlash uchun siqilgan havo bilan purkaladi.

Yoriq yuzasida ifloslanish mavjudligi, ikkinchi darajali emissiyasiga salbiy ta'sir qiladi, tasvirlarni shakllanishida buzilishlarni keltirib chiqaradi. Ba'zi begona zarralar elektronlar tutamidan zaryadlanib, uni chetlashtiradi. Oksidli plenkalarni borligi sezilarli tasvir detallarini pasaytiradi. TEMda bo'lgani singari, sinishdan keyin darzliklar o'rganish tavsia etiladi.

Namunalar ob'ekt tutgichda maxsus elektr o'tkazmaydigan kley bilan o'rnatilishi mumkin. Namunani ob'ekt tutgichning bilan etarli darajada kontaktda bo'lmasa, tasvir sezilarli darajada yomonlashadi.

#### **4.3. Rastr elektron mikroskopning xususiyatlari**

Rastr elektron mikroskoplari  $\times 5$  dan  $\sim \times 200000$  ga kattalashtiradi. Fraktografik tadqiqotlar o'tkazishda maksimal kattalashtirish odatda  $\times 30000$  dan oshmaydi. REM ning xal qilish imkoniyati taxminan 100 A ni tashkil etadi. Fokus chuqurligi yoruqlik mikroskopidan 300 barobar ko'p. Bu 1000 mkm  $\times 1000$  marta kattalashtirishda, taxminan 10 mkm dan ziyod bo'lgan  $\times 1000$  kattalashtirishdan ortiq fokal chuqurlikka mos keladi. Namunalar fokusini o'zgartirmasdan har qanday yo'nalishda 45 darajadan ko'proq burchak ostida bo'lishi mumkin. Obektivdan namunagacha bo'lgan ish masofasi odatda 10 dan 25 mm gacha.

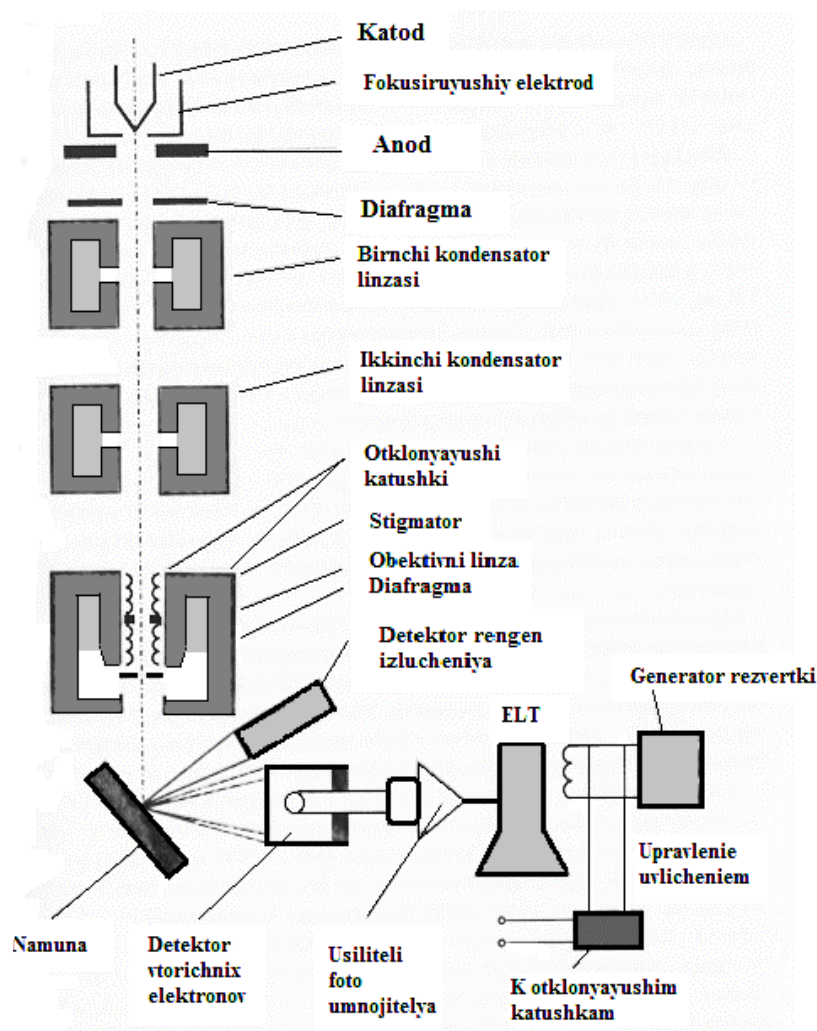
Elektron mikroskopning asosiy tizimlari va qurilmalari (4.3-rasm) quyidagilar[3]: zond va namuna yuzasida uning skanerlashini ta'minlaydigan elektron-optik tizim; vakuumli avtomatlashtirilgan tizim va nozik mexanik qurilmalar (shlyuzlar, namuna tutgichlar, namunalarga turli xil mexanik ta'sir etish qurilmalari va boshqalar). Elektron-optik tizim elektron pushka, elektromagnit linzalardan, diafragmadan va sistemani oqdiradigan katushkadan iborat. Elektron pushka elektron manbai bo'lib, katoddan, fokuslovchi elektrod va anoddan iborat. Anod erga ulangan, katod va fokuslovchi elektrod yuqori kuchlanish manbaiga (odatda 10 ... 30 kV, ba'zan q 1,5 kV) ulangan.

Yupqa volfram simidan elektron pushka ishlatilganda, elektronlar tutami termoemissiyasi hisobiga sodir bo'ladi.

Katodli elektron pushka geksoberid lantanli o'tkir charxlangan sterjendan iborat bo'lib, har tomonidan qizdiruvchi elementlardan va sovuq katodli avtoemission pushka katta yoruqlikka, hamda o'lchami kichik samaradorlikdagi

katod iborat, faqat olinadigan tutam barqarorligi yuqori vakuumda va o'ta yuqori vakuumda ta'minlanadi.

Katod tomonidan chiqariladigan elektronlar tezlashadi, diafragmadan, kondensor linzasida va ob'ektiv linzasidan o'tadigan tutamga aylanib, sezilarli darajada elektronlar manbai tasvirini kamaytiradi, hamda uni namuna yuzasiga fokuslaydi.



4.3-rasm. Rastr elektron mikroskopining printsiptial sxemasi.

Elektron mikroskopning o'lchamlari elektron zondning diametri bilan belgilanadi (diametri kichikroq, mikroskopning o'lchamlari kattaroq), bu elektron optikaga, katod uchi hajmiga, emissiya qiluvchi elektronlarga, elektron nurlarining oqimiga va tezlashtirilgan kuchlanishga bog'liq.

Fokuslangan birlamchi elektron nurlari sinish yuzasiga tekkanda, bir nechta signallar paydo bo'ladi (3.1-rasm) [15]: aks ettirilgan va ikkilamchi elektronlar, katod lyuminesans va rentgen nurlari, ba'zi elektronlar namunadan o'tib ketadi va ba'zilar so'riladi. Fraktagrafiya nuqtai nazaridan ikkilamchi elektronlar va elastiki tarqalgan (qarshi tomonga tarqalgan elektronlar) katta qiziqish uyqotadi.



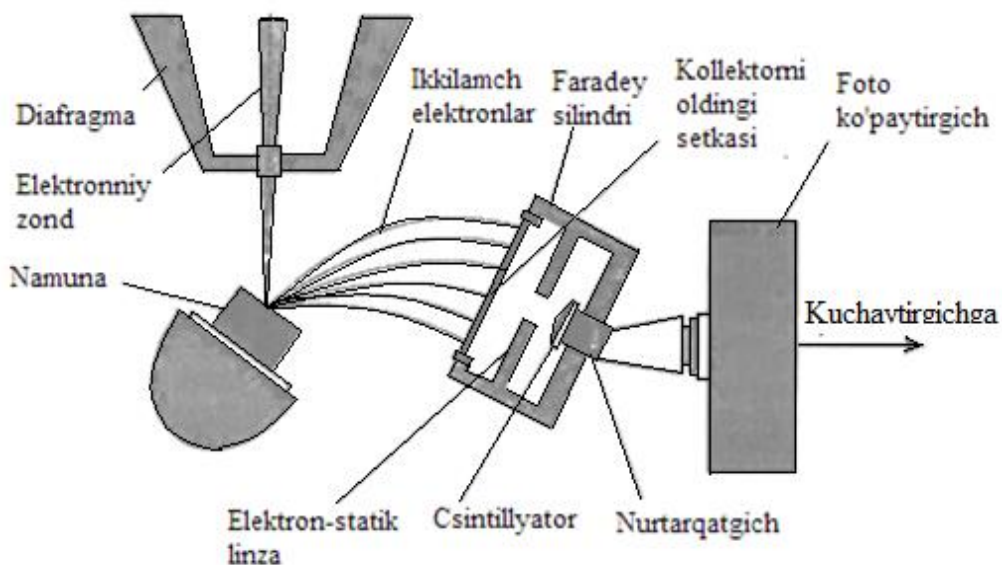
Namuna yuzasini tark etadigan elektronlar detektor yoki kollektor tomonidan tutib olinadi. Tegishli signal kuchaytiriladi va elektron nurli naychaning yoruqligini nazorat qilish uchun ishlatiladi. Bu nuqta elektron zond bilan o'zaro aloqada namunadagi analiz qilingan nuqtada paydo bo'ladigan signalning intensivligini aks ettiradi. Rasmni ko'rish generatorini elektron mikroskop ustunidagi chetlanuvchi katushkalarga va qabul qiluvchi elektron naychasining ajratuvchi plitalariga ulash yo'li bilan yaratiladi. Chetlashtirilgan elektron nurlari sinish yuzasida rastr hosil qiladi, bu elektron nurli naychadagi kattaroq kattalashtirishda namoyon bo'ladi. Nuqta pirintsi bo'yicha hosil qilingan tasvirning yorqinligi (kontrasti) har bir daqiqada sinish yuzasidan chiqadigan elektronlar soniga bog'liq ravishda signal bilan modulyatsiya qilinadi. Uzoq vaqt nurdan keyin o'tishi bilan elektron nurli naychalarni qo'llash butun tasvirni vizual ko'rishga imkon beradi.

Fraktografik tadqiqotlarda ikkilamchi va aks ettirilgan elektronlar keng foydalaniladi. Deyarli har doim ikkilamchi tomonga afzallik beriladi, chunki ular eng yaxshi o'lchamni ta'minlaydi va ular namunalarning soyali qismlarini o'rganadilar. Biroq, ayrim qollarda, tasvirning kontrastini yaxshilash uchun, ayniqsa, kichik o'lchamdagi tekis namunalar uchun ruxsat berish tavsiya etiladi. Bu mikroskopning ish uslubini aks ettirilgan elektronlarda qo'llash orqali erishiladi.

Aks etgan elektronlar yuqori energiya, yuqori tezlikka ega va namuna detektorga to'qri yo'nalishdagi traektoriyalar bo'ylab harakat qiladi, natijada «soya» effektlari va o'z navbatida tasvirning yuqori ko'rinishi paydo bo'ladi. Aks etgan elektronlarda ishlash tartibi, piksellar sonini sezilarli darajada pasayishi bilan tavsiflanadi. Aks etgan elektronlarda ishlash rejimi hal qilish imkoniyati sezilarli darajada pasayishi bilan tavsiflanadi. Aks ettirilgan elektronlar 300 A gacha chuqurlikda namunada hosil bo'ladi. Namuna ichida tarqalishi tufayli, aks ettirilgan elektronlarning zonasining samarali diametri elektron zondning diametridan juda katta. Shu bilan birga, ikkilamchi elektronlar 20 dan 50 gacha energiyaga ega. Bu sirt qatlamidan 100 A qalinligi bilan chiqish uchun etarlicha. Shunday qilib, 100 A qalinlikdagi sirt qatlami detektorga etkazadigan ikkinchi darajali elektronlar manbai bo'lib xizmat qiladi. Ushbu ikki va elektron indekslarining generatsiya quduqlari kattaligidagi farq, olingan xal qilish imkoniyatlaridagi farqlarni aniqlaydi.

Detektor tomonidan tutiladigan ikkilamchi va aks ettirilgan elektronlarning nisbiy miqdori detektordagi sozlanadigan kuchlanish bilan tartibga solinadi. Ikkilamchi elektronlarning odatdagi detektori 4.4-rasmda ko'rsatilgan [21]. U setkali Faraday silindridan (ichki maydonni tashqi elektrostatik ta'sirlardan butunlay qimoyalovchi erga ulangan metall ekran) iborat bo'lib, unga (Q250)...(-30)V oraliqidagi siljish

kuchlanishi berilgan. Musbat kuchlanish (past energiya va tezlik bilan) ikkilamchi elektronlarni yiqish uchun xizmat qiladi, lekin aks ettirilgan elektronlarning traektoriyalariga ta'sir qilmaydi. Ya'niy siljish kuchlanishi kuchayib borayotganligi sababli, ko'p sonli ikkilamchi elektronlar ushlanib qoladi. Agar siljish kuchlanishi salbiy bo'lsa, ikkilamchi elektronlar detektorga etib bormaydi va faqat aks ettirilgan elektronlar ushlanadi. Aks ettirilgan elektronlarning detektoriga minimal kirib kelishini, uni tekis elektron traektoriya kollektoriga o'tmagan burchakka burish orqali erishiladi.



4.4-rasm. Elektronlarning ikkilamchi detektor sxemasi

Kollektor panjarasidan o'tgan elektronlar shu darajada tezlashadiki, uni energiyasi stsintillyatorni faollashtirish va yoruqlik hosil qilish uchun etarli darajada kuchayib boradi. Stsintillyatorga ulangan yoritgich yoruqlik nurlanishini fotoko'paytirish qurilmaga uzatadi, u erda elektron nurlarning yorqinligini modulyatatsiya qilish uchun ishlatiladigan elektron nurli signallariga aylanadi. Ikkilamchi elektron detektorini aks ettirilgan elektronlarni (siljitish yo'li bilan va setkadagi siljish kuchlanishni o'zgartirish orqali) to'plash uchun ham foydalanish mumkin bo'lsada, ikkita aloqida detektorni qo'llash yanada samaralidir.

Elektron mikroskopini skanerlashning asosiy maqsadlaridan biri turli xil tashqi yuklarni qo'llashda materiallarni emirilish yuzasining taxlili 4.2-jadvalda [15] yoriqlar tasnifini asosiy xususiyatlarga muvofiq taqdim etiladi. Sinov namunasining yoki muayyan detalning har qanday yoriqlarida halokat nuqtasi, yoriq kelib chiqishi zonasi, yoriq rivojlanish zonasi va dolom zonasi aniqlanishi mumkin. Yoriqning kelib chiqishi sodir bo'lgan yoriqqismi emirilish markazi deb ataladi. Yoriq kelib chiqishi markaziga ulashgan emirilish yuzasi yoriqning kelib chiqish zonasidir. Ilk yorilish manbaidan uzoqda joylashgan yoriqning maydoni



yoriqlar rivojlanish zonasidir. Yoriq rivojlanish zonasi oxir-oqibat ob'ektning chekka qismiga o'tadi.

Darzlar bo'lishi mumkin birlamchi, emirilish markazidan tarqalgan va emirilish yuzasini hosil qiladigan, hamda ikkilamchi darajali, sirt ustida joylashgan sinishdan alohida emirilish markazlaridan tarqalgan. Yoriqning yuzasi siniqlar, chuqurliklar, pog'analar, ariqchalar, tillar va ajralish taroqlari kabi elementlarning mavjudligi bilan tavsiflanadi. Siniqlar struktura elementalari bilan alohasiga qarab bo'lishi mumkin donalarichidagi va donalararo.

Siniqlarni mikrotuzilishini tasvirlash uchun, parchalanish, kvaza parchalanish va mikrobo'shliqlar kabi tushunchalar qo'llaniladi. Parchalanish- bu mo'rt sinishi mexanizmi bo'lib, unda metallning kristallografik tekisliklar (intragranulyar bo'linish) yoki tekis bo'laklari (intergranulyar ajralish) bilan tekislangan yuzalarga bo'linadi. Parchalanish zarracha o'lchamlari bilan mos keladigan qirralarning hosil bo'lgan yoriq yuzasi bilan ajralib turadi va deyarli plastik deformatsiyaning belgilari yo'q.

Kvazaparchalanish - bu donalararo kvazimo'rt emirilish mexanizmi, metallarni tekisliklar bo'yicha ajralishi donalarning kristallografik tekisliklar bilan mos kelmasligi bilan xarakterlaydi. Mahalliy plastik deformatsiyaning zaif belgilari bilan donning kattaligidan kichikroq bo'lgan fasetlardan tashkil topgan halokat yuzasi bilan tavsiflanadi. Donalarichi yoki donalararo yumshoq emirilish mexanizmi mikrobo'shliqlarni birlashishini anglatib, metall oqimini plastik deformatsiyasi davrida metallni kelib chiqishi, o'sishi va mikrobo'shliqlarni birikishini xarakterlaydi. Ushbu mexanizm chuqurlarning turli darajalari va butun yuzaning muqim plastik deformatsiyasiga ega bo'lgan yassi mikrorelefl sinishi yuzasi bilan tavsiflanadi.

## **NAZORAT SAVOLLARI:**

1. Rastr elektron mikroskopning kattalashtirish chegarasi?
2. Rastr elektron mikroskopi qanday qismlardan tashkil topgan?
3. Rastr elektron mikroskopning imkoniyatlari qanday va u qanday aniqlanadi?
4. Namuna qanday tanlanadi va tayyorlanadi?
5. Rastr elektron mikroskopda olingan rasmni tasvir deb atash mumkinmi?
6. Rastr elektron mikroskopda kontrastni qanday va uning fizik ma'nosi qanday?
7. Rastr elektron mikroskopda topografik kontrastni qanday?

## 5-BOB. SKANERLOVCHI ZONDLI MIKROSKOPLAR

Bugungi kunda real ob'ektlar jumladan, metall buyumlar kabi muhim xususiyatlarining aksariyat qismi o'zlarining sirtlarining holati bilan aniqlanadi. Sirt qatlamlarining xususiyatlari ularning nozik (atomik) strukturasi, sirtning atmosfera va qattiq moddalari bilan o'zaro bog'liqligi bo'lgan materiallarning hajmidan sezilarli darajada farqlanadi. So'nggi yillarda sirt qatlamlarini o'rganish materialshunoslikning eng muhim vazifalaridan biri bo'ldi. Ko'plab mutaxassislarning say-harakatlari ushbu muammolarni hal etishga qaratilgan. Sirt hodisalarini o'rganishda olingan bilimlar zamonaviy nanotexnologiya sohasida muvaffaqiyatga erishdi. Yuqorida keltirilgan muammolarni muvaffaqiyatli hal qilish uchun sirtni o'rganish uchun axborot, qulay va qulay usullarni qo'llash juda muhimdir.

So'nggi 10-15 yillarda skanerlash zond mikroskopi (SZM) turli xil tabiiy materiallarni, shu jumladan metallni o'rganish uchun keng qo'llanilgan. Gap skanerlovchi tunnel mikroskopi (STM) va atom kuchi mikroskopi (ASM) [1-6] skaneridan o'tkazish haqida ketyapti. Yuqorida keltirilgan tadqiqot usullarini aniqlash uchun ingliz adabiyotida quyidagi yozuvlar qo'llaniladi: SZM (Scanning Probe Microscopy), STM (Scanning Tunnelling Microscopy), AKM (Atomic Force Microscopy).

STM va AKM usullarining eng muhim afzalligi shundaki, ular o'rganilayotgan materialning sirtining uch o'lchovli tasvirini yaratish uchun juda yuqori sifatdagi echimlarni beradi. Ushbu usullarning umumiyligi juda ko'p va ko'pincha parallel ravishda qo'llaniladi. Skanerlashda zond mikroskopik usullarining eng muhim xususiyati ularning nisbiy arzonligi. Elektron mikroskopi, tunnelli va atomik kuch mikroskopi bilan taqqoslaganda, bu kattalik bir necha barobar arzonlashadi. havoda zond mikroskopida skanerlash usullarini qo'llash alohida ahamiyatga ega. Ushbu holat tadqiqot metodologiyasini keskin ravishda soddalashtiradi.

Skanerlash zondli mikroskopining paydo bo'lishi bilan, ob'ektlar yuzasida alohida atomlarni yoki ularning kichik guruhlarini kuzatish muammosini hal qilish ancha aniq bo'ldi. Bir necha o'n yillar davomida bu haqiqiy emas edi.

Skanerlashda zond mikroskopi paydo bo'lishidan oldin, sirtni o'rganishning asosiy usuli sekin elektronlarni difraksiya usuli (DEM). Elektron nurlarining past energiyasi tufayli o'rganilayotgan ob'ekt yuzasiga tushadigan elektronlar faqat bitta yoki ikkita atom qatlamiga kirib boradi. Bunday zond yordamida olingan ma'lumotlar biz o'rganilayotgan materialning sirt qatlamidagi atomlarning joylashuvi haqida gapirishga imkon beradi. Shu bilan birga, DEM metodi ob'ektning alohida atomlarini to'g'ridan-to'g'ri namoyish etishga imkon bermaydi.

Uning yordami bilan olingan ma'lumotlar ob'ektning ma'lum bir sirt maydoni bo'yicha o'rtacha hisoblanadi.

Zond mikroskopini skanerlash usullari moddalarning strukturasi kabi kichik ob'ektlar bilan alohida atomlarni kuzatish va ishlashga imkon beradi. Ushbu usullarning rivojlanishi sirt hodisalari, materillarning kontsentratsiyalangan holatining fizikasini o'rganishda yangi kashfiyotlar ehtimoli haqida dalolat beradi. Shubhasiz, skanerdan o'tkaziladigan zond mikroskopik usullardan foydalanish nanotexnologiya, shu jumladan materialshunoslik sohasida yanada rivojlanishini ta'minlaydi.

### **5.1. Skanerlovchi tunnel mikroskop**

1986 yilda N. N. Rohrer (Shveytsariya) va G. Binning (Germaniya) fizika bo'yicha Nobel mukofoti oldi. Ushbu olimlarga beriladigan mukofot, materiallarni o'rganishning eng ilg'or usullaridan biri - tunnel mikroskopini skanerdan o'tkazishdagi ajoyib tadqiqotlari uchun berildi. Ushbu qurilmalarning amaliy qo'llanilishi 1981 yilda turli tabiat materiallariga xos bo'lgan sirt hodisalarini o'rganishda yangi yo'nalish uchun asos bo'ldi.

Taniqli ifoda: «Barcha qobiliyatli oddiy» - tunnel mikroskopini skanerlash usuliga to'liq mos keladi. STM harakati printsipli quyida ko'rsatilganidek, juda sodda. Shu bilan birga, ishlab chiqilgan qurilmalarning salohiyati shunchalik ulkanki, mutaxassislar yaqin kelajakda ilm-fanning ta'sirini oldindan taxmin qilishga majbur emaslar.

Tunnel mikroskoplari optik va skanerlash elektron mikroskoplari bilan solishtirganda mutlaqo boshqa printsiplarda ishlaydi. Shunga qaramay, ular o'rganilayotgan sirtning vizual tasvirini olishga imkon beradi. Tunnel mikroskoplarini skanerlashning eng muhim ustunligi - 2 mingdan 30 milliongacha bo'lgan masofa bo'ylab kengaytirishni o'zgartirish imkonini beradi. Mikroskopning rezusi angstromning nisbati. Rezolyutsiyani yaxshilashda asosiy cheklov - bu vibratsiyadir. Muhim vaziyatlar ham - kompaktlik va qurilmalarning kichik vaznlari (kilogramm birliklari). Bugungi kunda, havoda ishlaydigan tunnelli mikroskoplar, maxsus gazli muhitda va juda vakuum sharoitida ishlatiladi.

Ko'p sonli sifatlar tufayli skanerlovchi tunnelli mikroskoplari noyob zamonaviy qurilmalarga tegishli. Birinchidan, ushbu qurilmalar turli xil nuqsonlik turlari kabi kamchiliklarga ega emas. Bu zond mikroskopda linzalarni o'z ichiga olmaydi. Ikkinchidan, mikroskoplar ko'p materiallarga yumshoq rejimlarda ishlaydi. Tasvirni shakllanishida ishtirok etadigan elektronlarning energiyasi odatda kimyoviy bog'lanish energiyasidan kam bo'lgan bir necha elektron voltdagidan oshmaydi. Ko'zga tashlangan tunnel mikroskopi jarayonida

radiatsiyaviy nuqsonlar paydo bo'lmaydi, bu esa ushbu qurilmalarni materiallarni emirilish oldi sinovidan o'tkazish imkonini beradi.

Skannerlovchi tunnel mikroskopi deb ataladigan qurilmalar yaratilishi ikki elektrod o'rtasida tunnel tokining ko'rinishiga asoslangan edi. Ushbu turdagi tok kichik elektrodlar dielektrik - vakuum, gaz yoki suyuqlik bilan ajratilgan bir-biriga yaqinlashganda paydo bo'ladi. Tunnel tokining  $I$  kattaligi elektrodlanga qo'llaniladigan kuchlanish  $U_1$  bilan mutanosib va elektrodlar orasidagi masofaga eksponentsial bog'liqlikda bo'ladi. Past kuchlanish ( $U_1 \ll 1B$ ) va tekis elektrodlar uchun Fovler-Nordxeym tenglamasi to'g'ri:

$$I_t = KU_1 \exp(-A\sqrt{Vt s}) \quad (5.1)$$

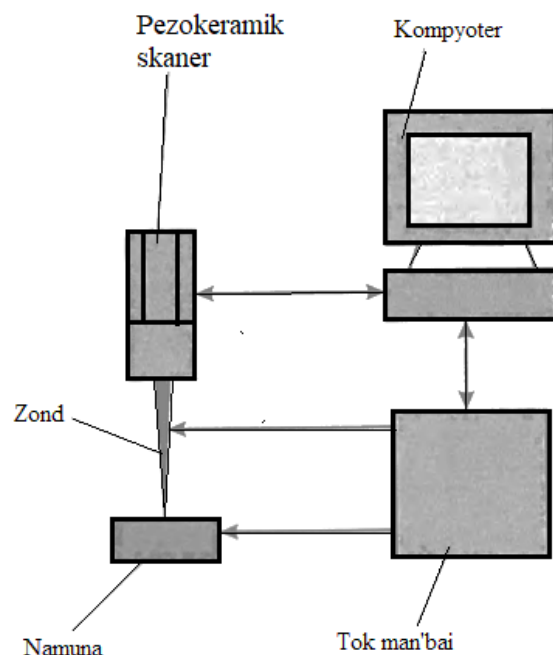
bu erda  $K$  doimiy,  $V_t$ , elektron ishining funktsiyasiga 2nm teng bo'lgan potentsial to'siqning balandligi,  $A$ - proporsionallik faktoridir;  $A \approx 10 \text{ nm}^{-1}$ ,  $\approx B^{-1/2}$ . Namuna va zond o'rtasida nanometr tartibining tunnelning toki uchun ob'ektlar orasidagi masofa bir necha angstrom bo'lishi kerak.

Aytib o'tilganidek, mikroskopni tekshirish usuli tekshirilayotgan ob'ektlarning atomik xal qilish imkonini beradi. Aslida, zond atomlarni emas, balki turli atom energiyasining atomlarning atrofidagi zichligini taqsimlashga imkon beradi. Shunday qilib, skanerlash tunnel mikroskopi ob'ektning sirt topografiyasini emas, balki Fermi darajasida joylashgan sirt elektron strukturasi tasvirini nazorat qiladi. STMda yuqori sifatli tasvirlarni olish uchun zarur bo'lgan shart-sharoit - bu materialning yaxshi elektr o'tkazuvchanligi.

Eng oddiy tunnel mikroskopining sxemasi 5.1-rasmda ko'rsatilgan. Mikroskopning asosiy elementlari o'tkir zond (igna), elektron birlik, monitoring voltaji va tunnel toki, mikroskopni nazorat qilish va olingan ma'lumotlarni yozib olish uchun kompyuterga ega bo'lgan pezokeramik skanerdir.

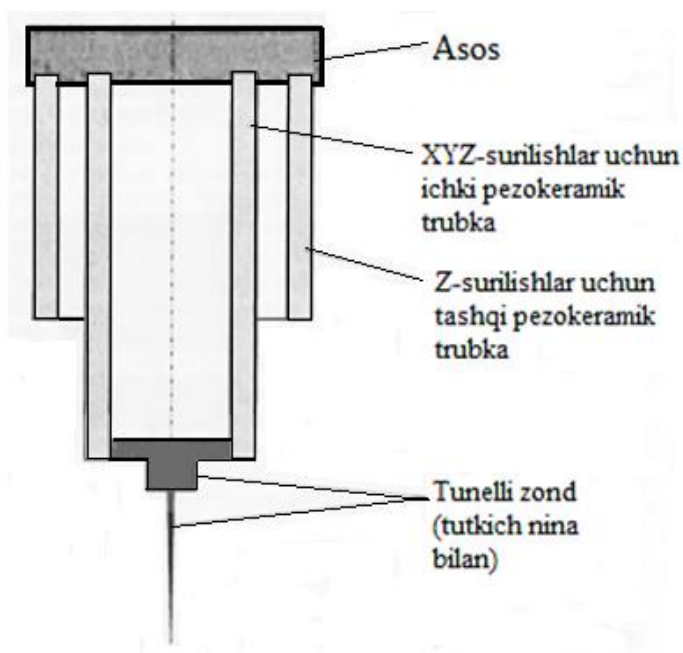
Ko'rinishda tunnelli mikroskoplarni yaratishda uchta tushunchalar amalda joriy etilgan: skanerlash, tunnellash va lokal zondlash. Ushbu fikrning soddaligiga qaramasdan, tunnelli mikroskoplar yuqori texnologiyani amalga oshirish natijasidir. Ularning ishlab chiqarilishi ko'plab texnik muammolarni hal qilish zarurati bilan bog'liq. Barcha ishlab chiqarilgan mikroskoplar, albatta, atomik xal qilishga erisha olmaydi.

Pezo skaneri tunnellash va atom kuchlari mikroskoplarida eng muhim funktsiyalarni bajaradi. Zondni ob'ektning ustidagi istalgan nuqtaga olib borishi ta'milaydi, topografiya va yuzaning elektron holati haqida ma'lumot beruvchi o'lchovlar uchun imkon beradi. Turli xil pezoskaner konstruksiyalari zond ignasini bir necha angstromdan o'nlab mikrometrgacha bo'lgan masofaga ko'chirishi mumkin.



5.1-rasm. Туннели микроскоп блок-схемаси

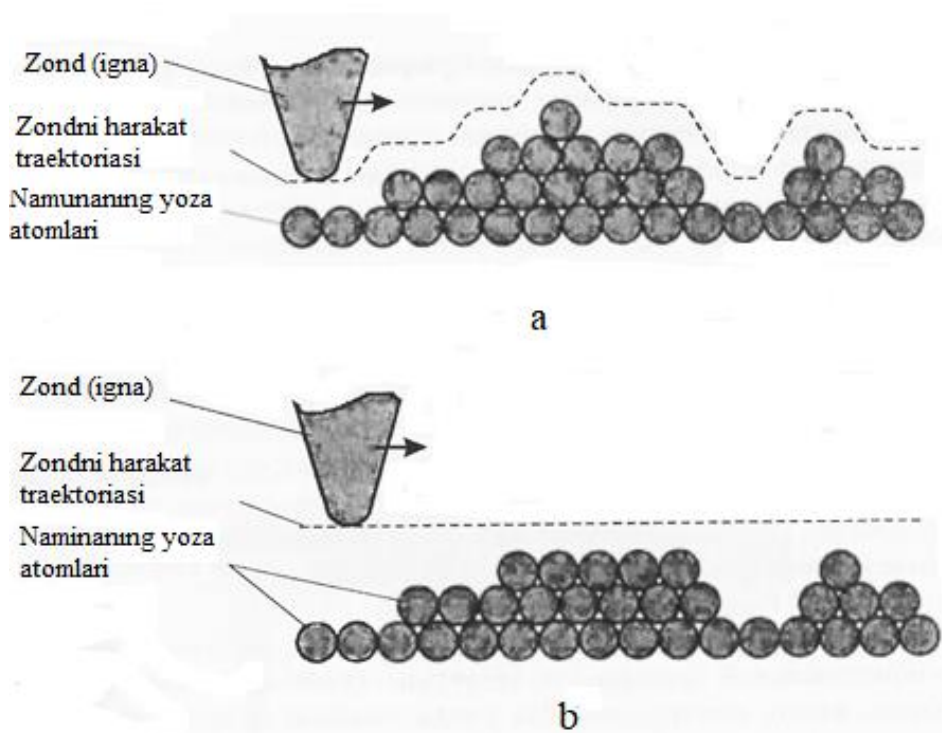
Pezosanner funksiyasini tripod yoki sektsiyalarga bo'linadigan pezotubka tomonidan bajarilishi mumkin. Bu tripod uchta o'zaro perpendikulyar pezokristalli plitalardan iborat. Ignali (zond) tripod ustiga qotiriladi. Zamonaviy qurilmalarda tripod endi ishlatilmaydi. Buning o'rniga uchburchakli pezosanner bor edi, bu tripod bilan taqqoslaganda, yanada ixcham, qattiqroq va yuqori rezonans chastotaga ega. Oxirgi holat ayniqsa, tunnel mikroskoplarini ko'rish uchun muhim ahamiyatga ega.



5.2-rasm. Pezoskanerni tuzilish sxemasi

Truba shaklli pezosakanerning sxemasi 5.2-rasmda ko'rsatilgan. Turli diametrdagi ikkita pezokeramik naychanning foydalanish va dizayni ko'rish oraliqini kengaytiradi va Z - koordinatasidagi issiqlik oqimining ta'sirini pasaytiradi. Pezokeramik trubkaning devor qalinligini kamaytirish bilan o'rganilayotgan sirtning skanerlashda zondni katta siljishini ta'minlash mumkin.

Tunneli mikroskop bilan ishlashda ikkita rejimdan foydalaniladi. Bularning biri quyidagichadir (5.3 a-rasm.). Zond ignasi bir nechta angstrom masofada o'rganiladigan sirtga yaqinlashadi. Bunday holda, igna va ob'ekt orasidagi bo'shliqda nano-amper tartibida tunnel tok paydo bo'ladi. Tunnelning toki kuchli darajada ob'ektlar orasidagi masofaga bog'liq. Agar siz igna gorizontal yo'nalishda (X) harakat qilishni majbur qilsangiz, u holda tunnel tokining doimiy qiymatini ta'minlash uchun ( $I_t = \text{konst}$ ) siz ignani vertikal yo'nalish bo'yicha (Z) sinov joyining profiliga muvofiq harakat qilishingiz kerak. Zondning yo'li ob'ektning haqiqiy yuzasiga teng bo'lishi kerak.



5.3-rasm. Skanerlovchi tunneli mikroskoplar ishini asosiy rejimlari: a-tunnel tokini doimiy ushlab turish; b- namuna ustida xarakatni to'g'ri traektoriyasini ushlab turish

Namuna va zond o'rtasidagi masofani barqarorlashtirish qurilmaning tok manbai sxemasi platasida taqdim etilgan ayta aloqa yordamida amalga oshiriladi. Pezosakanerning Z qismiga etkazib beriladigan kuchlanish miqdori X yo'nalishi bo'yicha kompyuterning ekranida ko'rsatiladigan ma'lumotdir.

Agar skanerlash ko'p qatorda ketma-ket ravishda o'tkazilsa, kompyuterda tekshirilgan yuzaning topografiyasining tavsifi X,Y,Z koordinatalarida ko'rsatiladi. Olingan materiallarning grafik ishlanishi o'rganilayotgan sirt morfologiyasini tasavvur qilish imkonini beradi.

Ko'zga tashlangan tunnel mikroskopining ikkinchi ishlash tartibi Z yo'nalishida qat'iy kuchlanish qiymatini taqdim etishdan iborat. Zondni to'g'ri chiziq bo'ylab gorizontaal tekislikda surish bilan tunnel toki  $I_t$  o'lchanadi.  $I_t$  ning qiymati relef yuzasini grafik rekonstruksiya qilish uchun sanoqli ma'lumot sifatida xizmat qiladi. Ushbu rejim amalga oshirilganda, teskari tekskari aloqa bo'g'ini tunnel toki qiymatini nazorat qilmaydi. Shuning uchun indentorni tekshirilayotgan namuna yuzasiga «botish» ehtimoli oshadi. Bunday rejim tekis- atom yuzalarni tadqiqot qilganda afzaldir.

## 5.2. Atom mikroskopi

Atom energiyasi mikroskopi (AFM) G. Binning, S. quayte va K. Gerber tomonidan 1986 yilda G. Binning va X. Rohrerning fikrlarini hisobga olgan holda kashf qilingan. Atom energiyasi mikroskopning ishlashi va tunnel mikroskopi tamoyillari o'rganilayotgan sirt bilan o'tkir zondning o'zaro ta'siriga asoslangan. Ikkala turdagi qurilmada tasvirni olish uchun zond yuzani skanerlaydi va har bir nuqtasining koordinatalari bo'yicha bir qator ma'lumotlarni olish imkonini beradi. Tunnel mikroskopini skanerlash g'oyasi tunnel tokining elektrodlar orasidagi masofadan eksponentsial bog'liqligini hisobga oladi. Atom energiyasi mikroskopi uchun ajralib turadigan muhimlik - F jismlarining o'zaro masofadagi o'zaro ta'sir kuchiga keskin bog'liqligi. Atom kuchi mikroskopining asosi - zondning atomlari (o'tkir igna) va tahlil qilinadigan ob'ektning kuchli o'zaro ta'siri:

$$F = \frac{C_1}{R^{13}} - \frac{C_2}{R^7} \quad (5.2)$$

bu erda  $C_1$  va  $C_2$  konstantlar.

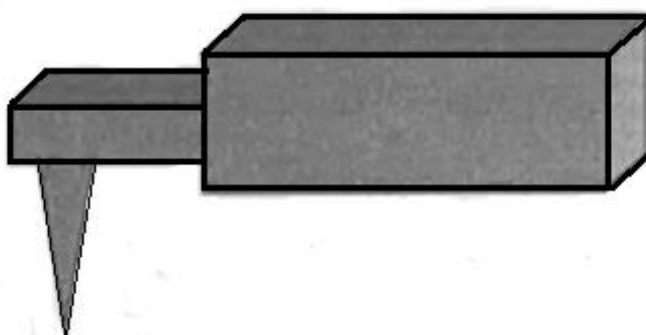
Ushbu tenglamadagi birinchi a'zo kontaktli atomlarning elektron bulutlarini itarishning qisqa muddatli kuchlarini tavsiflaydi, ikkinchisi nisbatan uzoq masofalardagi ob'ektlar orasidagi harakat qiluvchi tortishish kuchlarini tasvirlaydi. Atom- energiyasi mikroskopning kuch-quvvat ta'siri kuchlarning har qanday qarakatiga kamaytirilishi mumkin emas. U doimo murakkab xarakterga ega.

Atom energiyasi mikroskopik usuli metallar, yarim o'tkazgichlar, biologik, kimyoviy ob'ektlarning topografiyasini tahlil qilishga imkon beradi. Tadqiqotlar vakuumda, atmosfera muhitida va maxsus gaz muhitida amalga oshirilishi mumkin. Agar ob'ektlarning yuzasida suyuqlik plenka bor bo'lsa, uni ham o'rganish mumkin.



Oxirgi holat biologiya, tibbiyot va kimyo masalalarini hal qilishda alohida ahamiyatga ega.

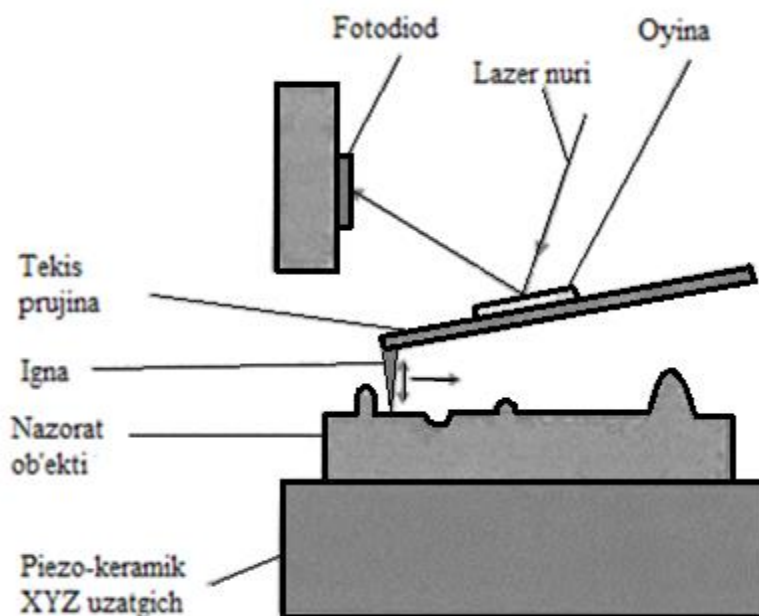
Atomik energiyasi mikroskoplari bilan bir qatorda tunnel tipli mikroskoplarda bo'lgani kabi, ingichka tunnel zond bilan sirtni skanerlash tamoyili qo'llaniladi. Mikrozon - nozik plastinka-ko'pincha kantillovchi (inglizcha «cantilever» dan - konsol, nur) deb ataladigan nazorat. Kontileverning oxiri  $\sim 1 \dots 10$  nm radiusli egri chiziqli o'tkir igna bilan jihozlangan. Kontileverning sxemasi 5.4-rasmda ko'rsatilgan. Iгна turli xil rejimlarda ob'ekt bilan ta'sir o'tkazadi. Ulardan biri patefon ignasini gramplastinga ko'chirish mexanizmiga mos keladi.



5.4- rasm. Atom energiyasi mikroskop sxemasi (kantilevera)

Zond ob'ektning yuzasiga yaqinlashadi va uch koordinatli piezoelektrik XYZ-translator yordamida skanerlanadi. Yuzani ko'rish vaqti odatda bir necha daqiqa. Zamonaviy qurilmalarda tezkor tasvirli yozuvlar bir necha soniya ichida ( $100 \times 100$  mikronli ko'rish maydoni bilan) amalga oshiriladi. Tezlashtirilgan tasvirni yozish muammosini hal qilishda bir in situ tadkikotlarini amalga oshirishga imkon berildi (vaqt shkalasi bo'yicha), bular kristallarini o'sishini tahlil qilish va boshqa shunga o'xshash vazifalarni bajarishda alohida ahamiyatga ega. Zondning vertikal harakatlanishi optik tizim yordamida yoziladi. Ro'yxatga olish printsipi fotodiod bilan o'lchashga va lazer nurlarining yuzasiga qarab yo'naltirilganligi va uning ustida turgan oynada aks ettirilishiga asoslanadi (5.5-rasm). Fotodiod matritsa devorining deformatsiyalari turini qayd etadi (egilish, burish). Fotodiodlar tomonidan qayd etilgan yoruqlik oqimining qayta taqsimlanishi baholanadi va keyin pezo-skanerdan foydalangan holda qayta ishlash tizimining yordami bilan qayta ishlanadi.

Atom energiya mikroskoplarining o'lchamlari gorizontal ravishda  $0,1 \dots 1$  nm va vertikal ravishda  $0,01$  nm. AKM ning xususiyatlaridan biri namunadagi elektr o'tkazuvchanlik talablariga qo'yilmaslikdir.



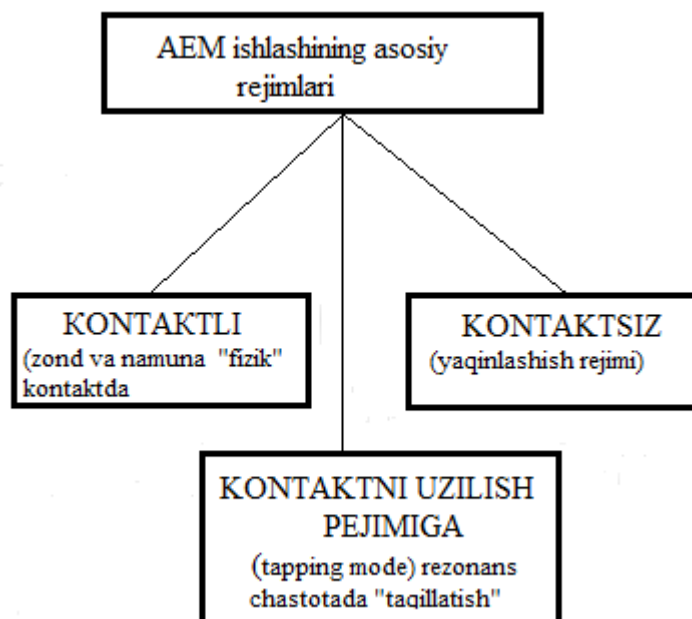
5.5-rasm. Atom energiyasi mikroskop ishlash printsipli

Bir qator jismoniy qodisalardan foydalanib, zamonaviy mikroskoplar faqat nazorat ob'ektlarining topografiyasini tekshirishga emas, balki ikkita ob'ektning (zond va namunalarning) o'zaro ta'sirini o'rganish hamda ishqalanish, elastiklik va amal kuchlarini o'lchash imkonini beradi. Muayyan sharoitlarda, bu usuldan foydalanib, alohida atomlarni ko'chirish, ularni cho'ktirish yoki ularni yuzadan chiqarish mumkin. Atom energiya mikroskoplarining so'nggi xususiyati ushbu qurilmalarni nafaqat tadqiqot uskunalariga, balki uskunalarni qayta ishlashga ham yo'naltirish imkonini beradi. hozirgi vaqtda, bir qator nanotexnologiyalarni amalga oshirishda atom energiyasi mikroskoplaridan foydalanish istiqbolli. Ushbu texnologiyalarning ba'zilari faol rivojlanishda.

Tadqiqot namunasiga zondning uchi yaqinlashishi natijasida ularning o'zaro ta'siri, ularning tabiati (tortishish yoki tirqish) narsalar orasidagi masofa bilan belgilanadi. Bunga qarab zondning ikkita ko'rish tartibi amalga oshiriladi - aloqa va kontaktsiz (5.6-rasm).

Kontakt rejimi – «jismoniy aloqa» rejimida zond uchining ob'ektdan itarilishi kuzatiladi. Bu holatda itarilish konsolning egiluvchanlik kuchi- kantilevera bilan muvozanatlanadi. Konsentratning kuchi uning siljishi bilan aniqlanib, optik tizim tomonidan belgilanadigan, u o'z navbatida lazer, oyna va foto qabul qilgichni o'z ichiga oladi. Teskari bog'lanish tizimi, kantileverni egilishini doimiyligini ta'minlaydi. Usulning kamchiligi kantileverning tekshirilayotgan ob'ekt bilan juda katta bog'lanish kuchidir (masalan,  $\sim 10^{-6}$  N). Konsolning bikirligi shunday bo'lishi kerakki, zond sirt profilini emirmasdan kuzatishi kerak. Kontakt rejimi

skanerlanishini qo'llanishi asosan yuqori darajali qattqlik va mustahkamlikka ega bo'lgan tekshirilayotgan namuna bilan chegaralanadi.



5.6-rasm. Atom energiyali mikroskoplarni asosiy ishlash rejimlari

Polimerlar, biologik narsalar kabi yumshoq materiallarni tadqiq qilishda mikroskopning o'lchamini oshirish uchun intervalgacha aloqa rejimi (tapping mode) amalga oshirilishi mumkin. Ushbu rejimda namunadagi zond kuchi  $\sim 10^{32}$  N ni tashkil etadi. Ushbu rejim rezonansga yaqin chastotali va o'nlab nanometrlarga ega bo'lgan amplitudali tebranishlarda amalga oshiriladi. Kantileverani majburiy mexanik tebranishlarini ta'minlash uchun qo'shimcha pezoelektrik manipulyator qo'llaniladi.

Kontaktni uzilish rejimi amalga oshirilganda kantilevera tebranishlar amplitudundasi o'zgarishlar nazorat qilinadi. Uning qiymati tashqi kuchga bog'liq. Teskari aloqa tizimining yordami bilan amplitudani doimiy o'zgarishini yoki faz tebranishini qo'llab turish mumkin. Ushbu zondni skanerlash rejimining afzalliklari ishqalanish kuchi va lateral (yonbosh) kuchlarning ta'sirini yo'qotishdir.

Mikroskopning kontaktsiz ishlash tartibi Van-der-Vaalsning tortish quvvati kuchidan foydalanishga asoslanadi va vertikal yo'nalishda kantileveraning harakatini aniqlash uchun yanada sezgir detektirlash sxemani qo'llashni ko'zda tutadi. Yuqorida tavsiflangan usullar bilan solishtirganda, kontaktsiz rejim kamroq qo'llaniladi.

Skanerlashda zond mikroskopik usullarini yanada rivojlantirishning istiqbollarini tahlil qilishda, atom energiyasi mikroskopi usuli tunnel mikroskopiga nisbatan ancha jadal rivojlanayotganligini ta'kidlash mumkin. Atomik energiyasi

mikroskopi qisqa vaqt ichida topografiya va materiallarning bir qator muhim xususiyatlarini o'rganish uchun ko'p funtsiyali analitik vositaga aylandi. Fanning turli sohalaridagi ko'plab mutaxassislar AEM usulini yanada rivojlantirish va qo'llash istiqbollari haqida umid bog'lashmoqda. Zamonaviy qurilmalar havo ob'ektlarini, ultra yuqori vakuumda, gaz- suyuqlik oralig'ida, xonada va kriogen haroratlarda, shuningdek materiallar qizdirilganda ham sezishga imkon beradi.

### 5.3. Tunnel va atom mikroskoplar zondlari

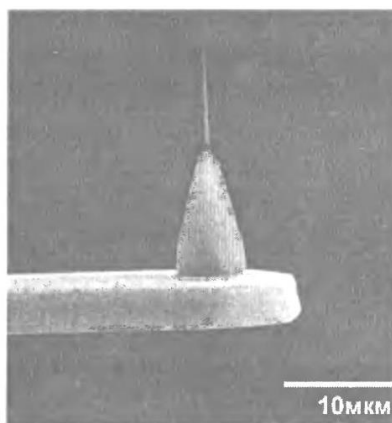
Tadqiqotlar uchun juda kichik asbob –igna tadqim etilgan bo'lib, unga bir nechta aniq talablar qo'yilgan. Iгна materiallari volfram, kremniy, kremniy nitridi  $Si_3N_4$ , platina asosidagi qotishmalar ( $Pt - Ir$ ,  $Pt-Rh$ ).

Zondning funktsiyasini bajaradigan ignalar etarlicha qattiq va shuning uchun juda uzun bo'lishi kerak emas. Egrilikning radiusi va uchining yaqinlashuvi burchagi bilan pasayishi, o'rganilayotgan ob'ektning tasviriga zondning ta'sir darajasini kamaytiradi. Zondning uchi radiusining minimal bo'lishi kerak deb hisoblashadi. Turli texnologik metodlarni qo'llash orqali, zondning uch qismida bitta atom bilan zondlarni olishga erishilmoqda. O'tkir zondning mustahkamligini ta'minlash uchun u katta asosga ega bo'lishi kerak.

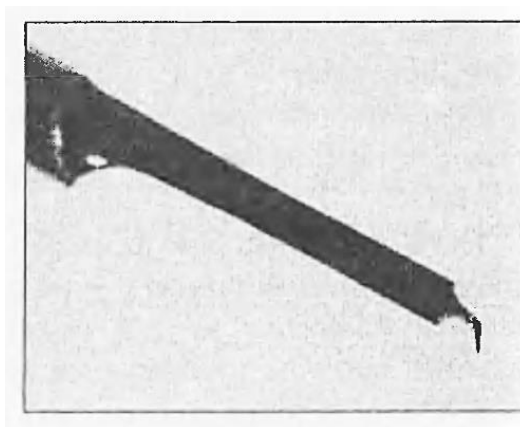
Ultra o'tkir zondlarni olish uchun bug' fazasidan kristallni ustirish va uning keyingi termokimyoviy o'tkirlash texnologiyasi taklif etilgan. Niskerlar (nozik «mo'ylovlar») dan foydalanishga asoslangan ushbu texnologiyada kremniy kristallaridan foydalanilgan. 5.7-rasmda kantileverada kremniyli ultra-o'tkir zond ko'rsatilgan. Uch to'mtoqlanish radiusi  $\sim 3$  nm. Zondning uchida konusning minimal burchagi 2 ... 3 darajaga teng. Ushbu zondning geometriyasi yuqori darajada rivojlangan sirlarni tadqiqot qilish imkonini beradi. Elektrokimyoviy travleniya bilan olingan zondning yana bir konstruktsiyasi 5.8-rasmda ko'rsatilgan.

Hozirgi vaqtda talab qilinadigan geometriyadagi zondlarini olish muammosi asosan hal qilingan. Ba'zi turdagi tunnelli mikroskoplarda mexanik o'tkirlangan yoki kesilgan zondlar ishlatiladi. Ularda o'tkirlikni o'rni ob'ektga eng yaqin bo'lgan atom tomonidan amalga oshiriladi. Shunga qaramay, eng yaxshi natijalarni maxsus o'tkirlangan zondlar olish olinmoqda. Egriligi katta radiusiga ega zondlardan foydalanganda, turli vaqtlarda yuzaning balandliklariga yaqinroq bo'lgan o'tmas ignaning bir nechta qismlarini o'zaro faoliyat ishlashi bilan bog'liq bo'lgan turli xil artefaktlarning namoyon bo'lishi mumkin.

Uchni kerakli geometrik parametrlarga ega bo'lishi juda murakkab texnologik vazifadir. Zondlarni ishlab chiqarish uchun zagotovka sifatida  $\sim 0,2...1,0$  mm diametrli simlardan foydalaniladi. So'nggi paytlarda asosan platina qotishmali simlari ishlatilgan.

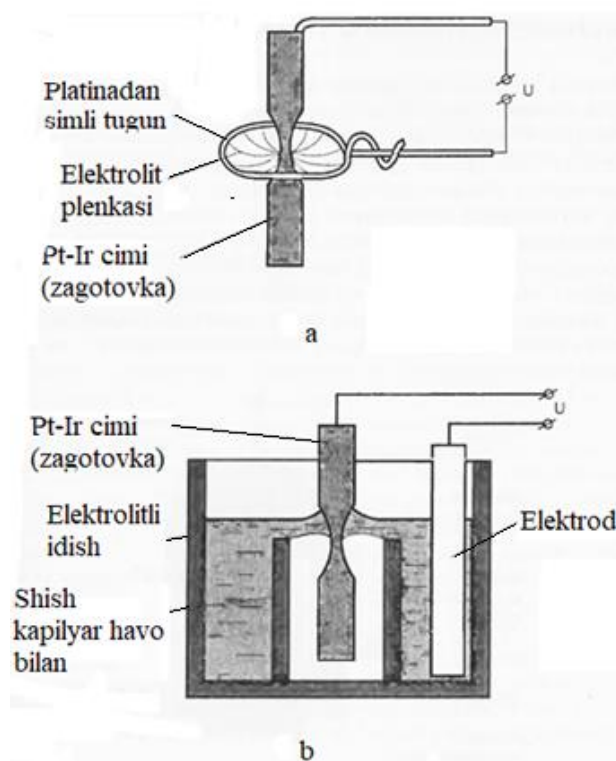


5.7-rasm. Kantileverada kremniyli juda o'tkir



5.8-rasm. Elektroximik travleniya qilish texnologiyasi bilan tayyorlangan volfram simli zond

5.9-rasmda ignalarni elektrokimyoviy charxlashning ikki sxemasi ko'rsatilgan. Ulardan biri,  $Pt - Ir$  qotishmasidan olingan simni simlar tugunida olingan elektrolit plenkasida travleniya qilib olishdir (5.9, a-rasm). Ish qismini atrofida joylashgan tugin antielektrod funksiyasini bajaradi. Simni bir qismi uzunligi taxminan 10 mm bo'lgan, meniskning ostida joylashgan qismi, paychalarining muayyan miqdordagi ingichka qismini buzishini ta'minlaydigan yuk vazifasini bajaradi. O'tkir zondlarni olishning ikkinchi usuli 5.9,b-rasmida ko'rsatilgan. Zagotovkani elektrolitlar bilan to'ldirilgan idishga  $\sim 10$  mm chuqurlikka tushiradi va mahalliy elektrokimyoviy travlenie olib boradi. Simning pastki qismini erib ketishini oldini olish uchun havo bilan to'ldirilgan shisha kapillyarga joylashtiriladi.



5.9- rasm. Ignani elektrokimyoviy charxlash: a- simli tugun yordamida elektrolit plenkasida travit qilish; b- zagotovkani elektrolitli idishga botirib travit qilish

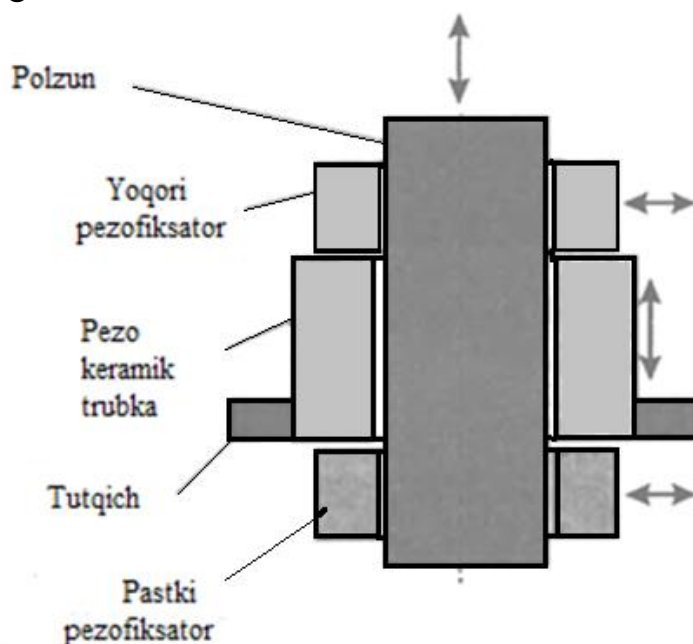
So'nggi yillarda konsentrat ishlab chiqarishda yangi g'oyalar amalga oshirildi. quvvatli, pezo-konstruktsiyalarda kalibrlash vositalari mavjud edi. Olmosga ishlangan zondlar bilan zondlarni ishlab chiqarish yo'lga qo'yildi. Atom energiyasi mikroskop zondlarining uchi sifatida uglerod nanotubalarini ishlatish bo'yicha tadqiqotlar mavjud.

#### 5.4. Pezo-skannerlarni harakatlanishi

Zond mikroskopini ishlatishda muhim texnik topshiriq ushbu zondning bir mikrondan kam masofada o'rganilayotgan yuzaga aniq yondashuvidir. Pezoscannerlarning mikro-harakatlanishi mikrovint yordamida ta'minlanishi mumkin. Zondni avtomatlashtirish odatda kompyuter tomonidan boshqariladigan qadamli dvigatellar tomonidan amalga oshiriladi. Bu val milini burilishning yuzinchi qismiga aylantirish imkonini beradi.

Skannerlovchi zond mikroskopida mexanik ta'minot moslamasidan tashqari, piezoelektrik ta'minot tizimlari ham qo'llaniladi. qurilmapiiezoelektrik motor Inchworm («sudraluchi chuvalchang») tasviri 5.10-rasmda ko'rsatilgan. Bunday

motor pezo-skanerni minimal qadam bilan 1 nm va 0,5 mm/s tezlikda bir necha millimetrga siljishga imkon beradi.



5.10-rasm. Ishchi «Sudraluvchi chervyak» piezoelektrik dvigatel qurilmasi (strelkalar bilan pezokeramik dvigateli elementini mumkin bo'lgan xarakati ko'rsatilgan)

Dvigatelning asosiy elementlari pezokeramik naycha, polzun, pastki va yuqori pezo fiksatorlardir. Pezo skaner polzun ustiga o'rnatiladi. Slaydni pastga tushirish uchun yuqori fiksator siqiladi va trubkadagi kuchlanishni oshiradi, uning uzayishini ta'minlaydi. So'ngra yuqori fiksator qisiladi, pastkisi bo'shatiladi. Trubkadagi kuchlanish asta sekin pasaytiriladi, uni qisqarishiga erishiladi. Shunda trubka pezoskaner mahkamlangan polzunni pastka tortadi. Natijada ketma ket harakatlar natijasida polzun qadamlari bilan kerakli yo'nalish bo'ylab siljiydi. Motorni bir tekis ishlashini ta'minlash uchun uning detallarining yuzalariga juda aniq ishlov berilgan bo'lishi kerak.

### 5.5. Zondli mikroskoplari ishlatishda hosil bo'ladigan nosozliklar

Skanerlovchi zond mikroskoplari yordamida hosil qilingan tasvir sifati asosan tebranish va ovoz izolyatsiyasi tizimi tomonidan aniqlanadi. Binning va Rorer mikroskopning dastlabki tarkibida namunaning titrash izolyatsiyasi muammosi super o'tkazuvchan magnitlangan podves yordamida hal qilindi. Tashqi tebranishlarni kamaytirish uchun, skanerlovchi tunneli mikroskoplarni o'lchov bloklari katta tebranishda izolyatsiya qilingan platformaga o'rnatiladi. Механик titrashlardan himoya qilishda prujina yoki rezina podveskalar himoya qilishi mumkin. Akustik tebranishlarni bartaraf qilishda tovushni so'ndiruvchi



qoplamali metall yoki shisha qobiqlar qo'llaniladi. Metall korpuslarni erga ulash o'lchov tizimini tashqi elektromagnit ta'sirlardan himoyalashga ham imkon beradi. Atomik energiyali mikroskoplari, tunnel mikroskoplaridan farqli o'laroq, past chastotali shovqinlarga nisbatan ko'proq chidamli bo'lib, ko'pincha atomning xal qilish imkoniyatini olish uchun maxsus tebranishdan himoya talab qilmaydi.

## **5.6. Skanerlovchi zondli mikroskoplarni rivojlantirishning istiqbollari**

So'nggi yillarda mutaxassislar sirt qatlamlarining turli xil xususiyatlarini o'rganish uchun juda ko'p original takliflar qilishdi. Ilm-fan va nanotexnologiyaning zamonaviy bosqichining o'ziga xos xususiyati - qoyaning taklifidan real qurilmaga aylantirilishi davridan keskin qisqarish kuzatilmoqda. Ko'pgina uskunalarni tadqiqot uskunalari bozorida xarid qilish mumkin. hozirgi kunda skanerlovchi zond mikroskopi materiallarni o'rganish uchun eng tez rivojlanayotgan usullardan biri hisoblanadi. Ushbu usulning imkoniyatlari juda tez o'sib boradi, natijada o'rganilayotgan ob'ektlarning sirt holati haqida ishonchli ma'lumotni taqdim etadigan yanada murakkab va qulay foydalanish asboblari yaratiladi.

Hozirgi kunda ham skanerlashda foydalaniladigan mikroskoplar, ham skanerlovchi tunnel mikroskopini va hamda atom energiyasi mikroskopik tekshiruv usullarini tatbiq etmoqda. Masalan, misol tariqasida SPM-9500J2 mikroskop turi (Shimadzu) keltirish mumkin. Dastlabki ishlovsiz ushbu qurilmada yordamida metall, yarim o'tkazgich va keramika buyumlari uchun yuzaning topografik xaritasi olinishi mumkin. Mikroskopning qo'shimcha xususiyatlari optik mikroskop, optik-tolali yoritgich, keng G` tor formatli va chuqur skanerlash moslamalari, namunani qizdiruvchi iqlim xonasi, magnit va elektr quvvatli mikroskoplar bilan jihozlangan. Bundan tashqari, qurilma namunalar yuzasida yopishqoqlik kuchini aniqlashga, mikroto'lqinlarni o'lchashga (LFM rejimida lateral quvvatli mikroskopda), zarracha kattaligi taqsimotini tahlil qilishga imkon beradi.

Rossiyada ko'rsatilgan zond mikroskoplari NT-MDN (Moskva) tomonidan ishlab chiqariladi. Ko'pgina ilmiy va ilmiy-tadqiqot laboratoriyalari ushbu kompaniya tomonidan ishlab chiqarilgan mahalliy asbob-uskunalar bilan jihozlangan (5.11-rasm). Solver seriyasidagi mikroskopning surati: Solver Ls berilgan. hozirgi kunda tunnel mikroskopini, atom energiyasi mikroskopini va elektron mikroskopni birlashtirgan juda murakkab tadqiqot komplekslari yaratilgan.



5.11- Solver seriyasidagi Solver Ls mikroskopning umumiy ko'rinishi

Darhaqiqat, biz alohida atomlar, molekulalar va ularning assotsiatsiyalarini (klasterlar) manipulyatsiya asosida nanotexnologiyalarni ishlab chiqish va qo'llash haqida gapiramiz. Bunday jarayonlarning rivojlanishida asosiy vazifa - ob'ektning yuzasi bo'ylab atomlarni tashish jarayonini ishonchli boshqarish. Ushbu muammoni hal etish zamonaviy nanotexnologiya rivojlanishidagi muhim qadamdir.

Ob'ektning sirtini zondning uchi orqali oziqlangan tok impulslari orqali o'zgartirish uchun tunnelli mikroskoplardan foydalanish misollari mavjud. Bunday impulslarning ta'siri ostida mahalliy sirt joylari qizib ketadi va bug'lanadi. Shunday qilib, nanolitografiya texnologiyasi amalga oshiriladi. Nanoolitografiya texnologiyasi atom energiyali mikroskopi yordamida amalga oshirilishi mumkin. Ushbu texnologiya boshqa turlari quyidagilardan iborat, sirtni «sarapanie» (tirnash), elektrokimyoviy litografiya (kimyoviy-mexanik litografi), kimyoviy-mexanik litografiya.

#### **NAZORAT SAVOLLARI:**

1. Skanerlovchi tunnel mikroskopi qachon yaratilgan?
2. Skanerlovchi tunnel mikroskopini ishlash prinsipi?
3. Pezo skaneri tunnellash va atom kuchli mikroskoplarida qanday funksiyani bajaradi?
4. Atom energiyasi mikroskopi kim tomonidan yaratilgan?
5. Atom energiyasi mikroskopida zond qanday?
6. Atom energiyasi mikroskopida qanday metallar tadqiqot qilinadi?
7. Zondni ishlash prinsipi?
8. Kontakli va kontaktsiz rejimlar nima?
9. Zondli mikroskoplarni ishlashdagi asosiy nosozlik qanday?
10. Skanerlovchi mikroskoplarning rivojlanish istiqboli qanday?

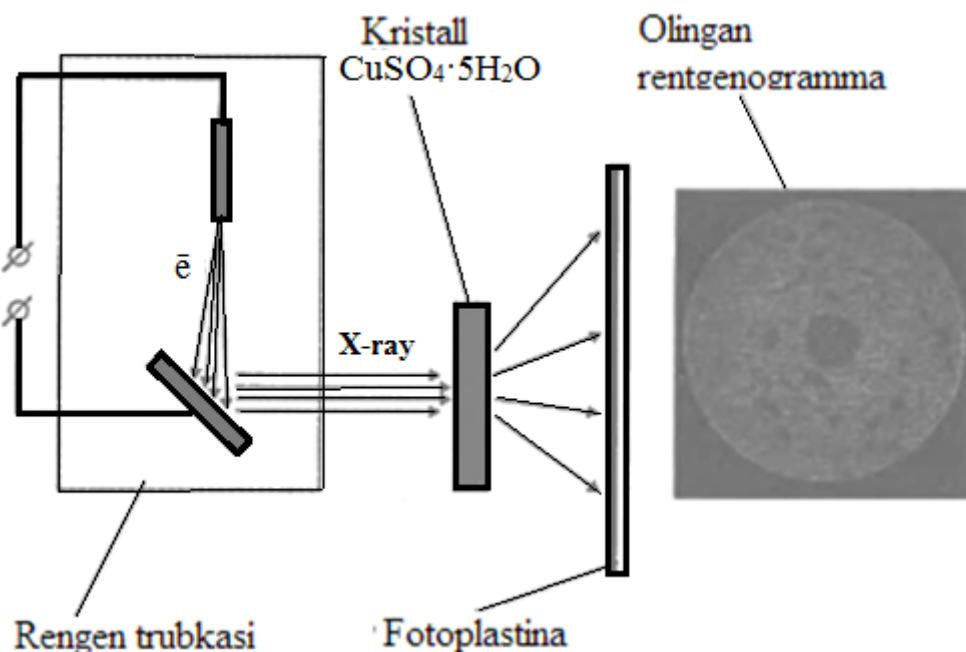
## 6-BOB. MATERIALLAR SIFATINI RENTGEN NAZORATI

### 6.1. Rentgen nuri haqida asosiy ma'lumot

#### 6.1.1. Kirish

Tadqiqot materiallarining jismoniy usullari orasida rentgen nurlaridan foydalanish bilan bog'liq muhim rol o'ynaydi. Ushbu nurlanish nemis fizigi V.K.Rentgen tomonidan 1895 yilda aniqlangan. Uzoq vaqt davomida rentgen nurlarning tabiati noaniq edi. Rentgen nurlarining nima ekanligi aniq emas edi - zarrachalar oqimi yoki elektromagnit to'lqinlarmi. Ushbu yillardagi rentgen nurlarini tabiatini difraktsiya yoki intensiferentsiya bilan tasdiqlash mumkin emas edi. Bu rentgen nurlari uchun barcha moddalarning sinishi indeksining deyarli 1 ga tengligi bilan izoqlanadi (ko'pchilik metallarning ko'pchiligi  $10^{-6}$  gacha bo'lgan miqdorda birlikdan ajralib turadi).

Rentgen nurlarining tabiati haqidagi shubhalarni tugatish Laueni bajargan fizik tajriba bilan (6.1-rasm) amalga oshirildi. «Oq» (polixromatik) rentgen nurlari bilan mis kuporosi kristalli ( $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) nurlanishining natijasi sifatida, birinchi difraktsiya tasviri kristallning orqasiga o'rnatilgan fotografik plastinkada qayd etilgan. Laue o'zi paydo bo'lgan tasvirni darhol izohlay olmadi.



6.1- rasm. Maks fon Laue (1912y.) tajribasi. Mis kuporosikristallida olingan rentgen nurlari difraktsiyasi

Birinchi rentgen tasvirlarni ta'riflash ingliz olimlari Villiamu Genri Bregga (1862-1942) va Villiamu Lorensu Bregga (1890-1972). Laue tajribasini takrorlab, rux ( $\text{ZnS}$ ) yuqori simmetriya kristallari va tosh tuzi ( $\text{NaCl}$ ) oldi.

Rentgenogrammalarda kuzatilgan simmetriyaning tekshirilgan kristallarning simmetriyasiga mos kelishi aniqlandi. Keyinchalik katta Bregg va undan mustaqil ravishda, Moskva universitetining professori Yu.V. Vulf kristalldan o'tayotganda rentgen nurlarining difraktsiyasi tarqalishining oddiy va ravshan izohini oldi. Rentgenostruktura analizining asosiga aylangan formula Vulf-Bregg formulasi deb ataladi.

### **6.1.2. Rentgen nurlarining tabiati va hosil bo'lishi**

Rentgen nurlari elektromagnit nurlanishi bo'lib, to'lqin uzunligi  $10^{-4}$  dan  $10^2$  A gacha (ultrabinafsha to'lqinlar uzunligidan kamroq va  $\gamma$  -nurlarining to'lqin uzunligidan ko'proq). Shuni ta'kidlash kerakki, ko'pchilik kristall materiallarda atomlararo masofalar bir xil tartibga ega, masalan, ferritning kristall panjarasi 2,56 A gacha bo'lgan parametrga ega.

Rentgen nurlari paydo bo'ladi:

- $\gamma$  -nurlanishning bir modda bilan o'zaro ta'sirida;
- ba'zi materiallarning atomlariga tez harakat qiluvchi elektronlarni (yoki boshqa zaryadlangan zarralarini, masalan, protonlarni) tormozlashda. Bunda, energetikaning katta qismi (99% gacha) issiqlik ajralishi bilan birga sekinlashuvga va haqiqiy rentgen nurlarining hosil bo'lishiga faqat kichik bir qismiga (taxminan 1%) sarflanadi.

Shunday qilib, agar yuqori tezlikli elektronlar nurlari metall nishonga yo'naltirilsa, elektronlarning kinetik energiyasining bir qismi ular tomonidan rentgen nurlarning chiqarilishiga sarflanadi. Olingan nurlanish uzluksiz spektrdan (to'lqin uzunliklarining keng diapazonida nurlanish) va unga kiritilgan chiziqli spektrdan iborat. Chiziqli spektr yuqori zichlikli juda yuqori intensivlikdagi (to'lqin diapazonlari) chiziqlaridan iborat.

Yorug'lik nuri bilan taqqoslaganda, doimiy rentgen nurlari spektr oq nurlanish deb ham ataladi. Monoxromatik nurlanish analoglari bo'lgan chiziqli spektr xarakterli spektrning nomini oldi, chunki uning tarkibiy qismlarining (chiziqlari) to'lqin uzunligi anod materialida aniqlanadi. Shunday qilib, rentgen nurlari ikkita turdagi: oq (zich va tormozli) va xarakterlidir.

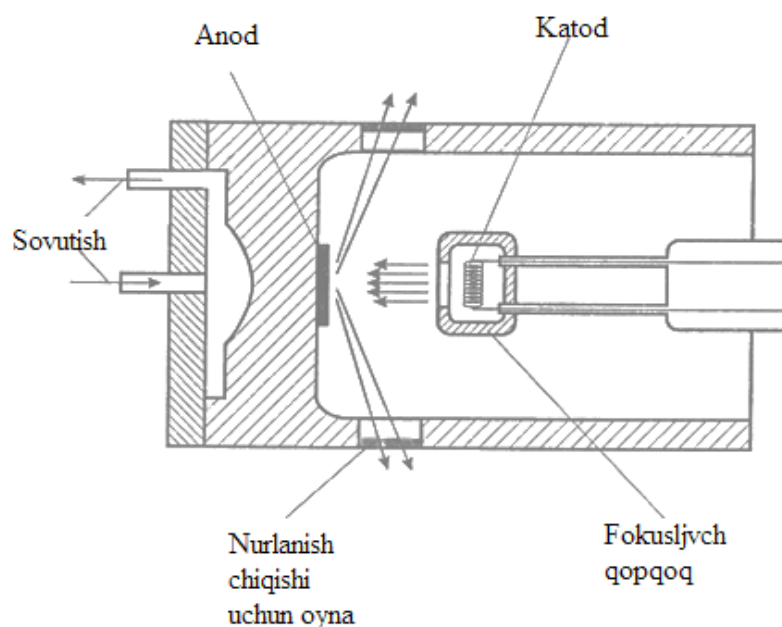
Shuni ta'kidlash kerakki, rentgen nurlarning kirib borish qobiliyati to'lqin uzunligini kamaytirish bilan ortadi. Rentgen nurlarining kirib borishi chuqurligini tavsiflash uchun yarim yutuvchi qatlamning qalinligi tushunchasi qo'llaniladi, bu orqali rentgen nurlanish nurlarining intensivligini ikki barobarga qisqartirganda ( $I=0,5I_0$ ) tabiiy qatlamning qalinligi nazarda tutiladi. Bir qator materiallarning yarim yutish qatlamining qalinligi 6.1- jadvalda berilgan.

**Ayrim materiallarni yarim yutish qalinligi**

| To'liqin<br>uzunligi, A | Qatlamning yarimyutish qalinligi, mm |           |           |        |             |
|-------------------------|--------------------------------------|-----------|-----------|--------|-------------|
|                         | Havoda<br>0°C da va<br>0,1 MPa       | Tsellofan | Alyuminiy | Mis    | qo'rg'oshin |
| 0,1                     | -                                    | 43        | 16        | 2,1    | 0,16        |
| 0,7                     | 4100                                 | 4         | 0,5       | 0,016  | 0,0044      |
| 1,5                     | 620                                  | 1,1       | 0,056     | 0,026  | -           |
| 2,0                     | 260                                  | 0,49      | 0,025     | 0,0071 | -           |

**6.1.3. Rentgen nurlanishining tutash spektri**

Rentgen nurlarining manbai rentgen nurli trubka bo'lib, odatda uni joylashuvi 6.2-rasmda keltirilgan. Ularda nurlanish tez uchib boruvchi elektronlarning elektronlar yo'lida o'rnatilgan anod atomlari bilan o'zaro ta'siri natijasida paydo bo'ladi. Trubka balonida katoddan anodgacha elektronning erkin harakatlanishini ta'minlaydigan yuqori vakuum ( $10^{-5} \dots 10^{-6}$  mm sim. us.) hosil bo'ladi va shuningdek, gaz oqimining paydo bo'lishiga to'sqinlik qiladi. Katod odatda volfram spiraldan iborat bo'lib, emissiya xususiyatlarini kuchaytirish uchun toriy bilan qoplanadi.



6.2-rasm. Struktura taxlili uchun elektron rentgen trubka qurilmasining namunaviy sxemasi

Tormozlanganida anod tanasidan elektron kvant energiya  $h\nu$  ini chiqaradi. Agar barcha energiya kvant hosil bo'lishiga to'g'ri kelsa, u holda

$$h\nu = eV, \quad \text{эВ} \quad (6.1)$$

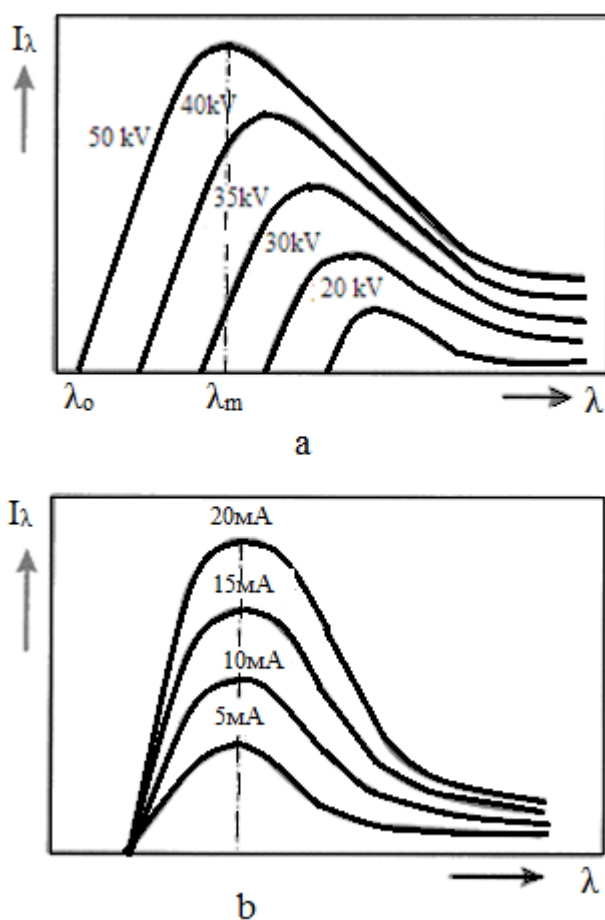
bu erda  $V$  - rentgen trubkasidagi elektrodleri orasidagi potentsial farqi (kV). Berilgan potentsial farq uchun kvant maksimal chastotaga ega

$$\nu_0 = eV/h \quad (6.2)$$

yoki eng kam to'lqin uzunligi

$$\lambda_0 = hc/eV = 12,35/V(\text{эВ}) \quad (6.3)$$

Rentgen nurlarining eng kichik to'lqin uzunligi faqat tezlashtirilgan kuchlanishga boqliq. haqiqiy sharoitda, sekinlashtiruvchi elektronlar energiyasining boshqa qismini  $0$  dan  $eV$  gacha yo'qotadi va kvantlar chiqaradi, hamda rentgen nurlari uzunligi bo'ylab doimiy ravishda uzluksiz berib turadi, ular o'z navbatida tormozlovchi, zich va oq deb ataladi.



6.3-rasm. Uzluksiz spektorni intensivligini taxsimlanishi: a-rentgen trubkasining turli kuchlanishlarida; b-rentgen trubkasi orqali turli tok o'tishida

Uzluksiz emissiya spektrining intensivligi bir qator omillarga bog'liq: rentgen tubkasidagi kuchlanish, anod oqimi, anod materiyasining atom raqami va elektronning anod bombardimon nurlari bilan hosil bo'lgan burchak  $\varphi$  ga.

To'lqinning qalinligi bo'yicha tormozlanish nurlanishining intensivligini taqsimlash egrisi maksimumda  $\lambda_m = 1.5\lambda_0$  C ga teng.

Elektrodlar orasidagi potentsial farqining ortishi bilan tormozlanish nurlanishining zo'riqishi kuchayadi, spektral egri va uning qisqa to'lqin uzunligi chegarasi maksimal to'lqin uzunligiga qarab siljiydi (6.3-rasm). Rentgen difraksiyasida ishchi kuchlanishining yuqori chegarasi odatda 60 kVdir, bu minimal to'lqin uzunligi 0,2 A ga to'g'ri keladi.

Naychadan oqayotgan tokning oshishi bilan nurlanish intensivligi proportsional ravishda oshadi. qisqa to'lqin uzunligi va zichlikdagi maksimal to'lqin uzunligi o'zgarmay qoladi (6.3-rasm).

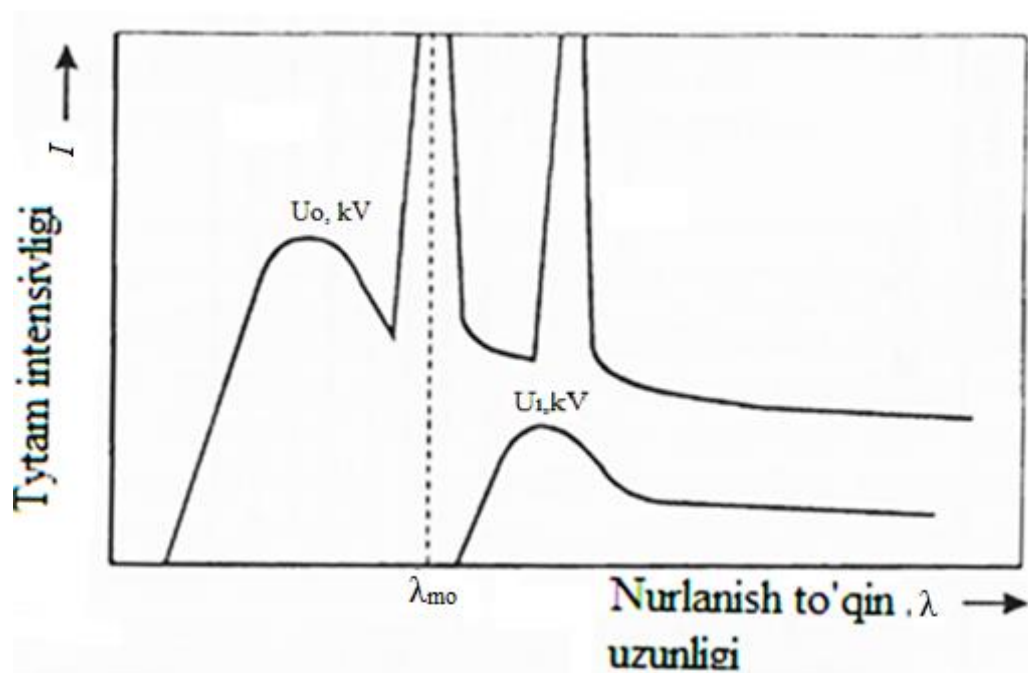
Muayyan to'lqin uzunligiga mos keladigan nurlanish intensivligi anod atomining soniga proportsional ravishda o'sib boradi, ya'ni doimiy rentgen nurlarining eng katta intensivligini olish uchun katta atom raqamli materiallardan anodlardan foydalanish kerak.

#### **6.1.4. Xarakterli rentgen nurlanishi**

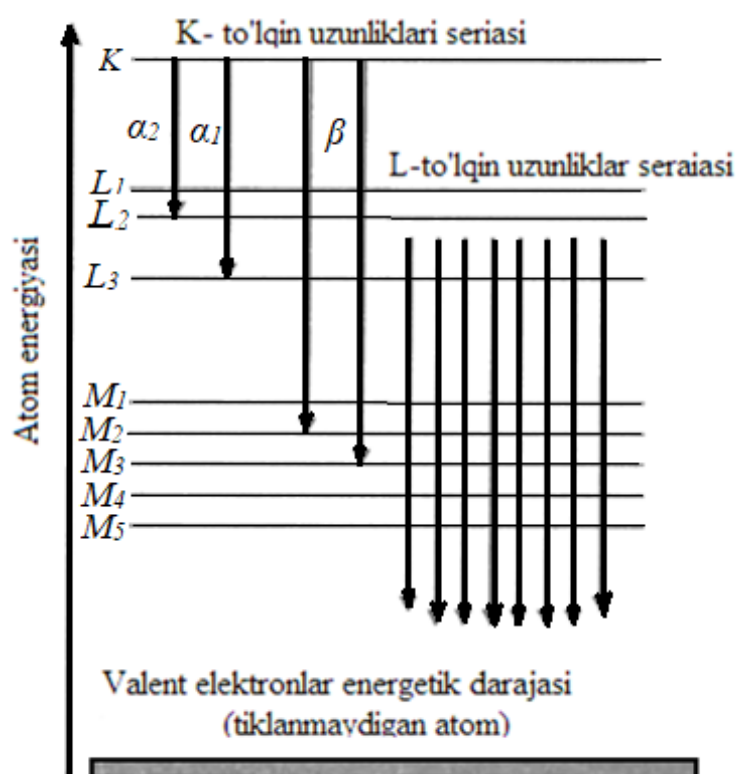
Xarakterli nurlanish moddaning to'qnashuvchi elektroni, ya'ni modda atomlarining ichki qavatlaridan elektronni urganida sodir bo'ladi. Ushbu material uchun ma'lum bir anodning kuchlanishi bilan uzluksiz spektrning fonida sezilarli darajada yuqori chastotali liniya spektri paydo bo'ladi (6.4-rasm). Ushbu kuchlanish uchuvchi elektronning energiyasi elektronni atomning ichki qatlamlaridan biridan urib chiqarish uchun etarlidir. Bunday zarracha qo'zg'algan holatda bo'ladi. Muvozanat holatga o'tish uchun elektron yuqoriroq orbitadan bo'sh orbitaga o'tadi, bunda u ortiqcha energiya rentgen nurlanishi kvanti shaklida chiqaradi. Atomning energiya holati, Bor nazariyasiga ko'ra, diskret bo'lgani uchun, atomlarning bir davlatdan ikkinchisiga o'tishida yuzaga keladigan nurlanish spektri alohida, chiziqli xarakterga ega. Xarakterli spektrning to'lqin uzunligi faqatgina anodli materialga bog'liq.

6.5-rasmda ko'rsatilgan sxemada atomning K- qobiqidagi elektronni urib chiqarilishi atomni qo'zg'alishiga, hamda atomning K-energiya darajasiga o'tishiga olib keladi (o'qlar atom energiyasining o'zgarishini ko'rsatadi). Agar K-qobiqdagi elektron vakansiyani to'ldirish L-qobiqidagi kelib chiqsa, qo'zg'algan atomning paydo bo'lishiga olib keladi. Agar elektron yadrodan uzoqroq qobiqlardan urib chiqarilgan bo'lsa, unda uzoq to'lqin nurlanish paydo bo'ladi, shu jumladan, ko'zga ko'rinadigan yorug'lik.





6.4-rasm. Anod nurlanish spektoriturli kuchlanishlar daintensivlikni taxsylanishi:  $U_o$ - qo'zg'alish potentsiali;  $U_o=12,4/\lambda_{min}$  kV;  $\lambda_{min}$ -ushbu seriya daminimal to'lqin uzunligi (angstremda)



6.5-rasm. Xarakterli rentgen nurlanishi hosil bo'lganda elektronlarni o'tish sxemasi

Amalda, rentgenostrukturaviy tahlilda K-seriya ko'p ishlatiladi. U to'rtta spektral chiziqdan iborat:  $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$ . Bu chiziqlarning to'liq uzunliklari  $\lambda_{\alpha_1} > \lambda_{\alpha_2} > \lambda_{\beta_1} > \lambda_{\beta_2}$  ketma – ketliklarida joylashtiriladi.  $K\alpha_1/K\alpha_2=2/1$  liniyalarining zichlik darajasi va nishon materialining tartib raqamiga bog'liq emas.  $\frac{K\alpha_1}{K\beta}$  nisbati davriy jadvaldagi element pozitsiyasiga bog'liq.

Taxmin qilinishicha,  $I_{\alpha_1} : I_{\alpha_2} : I_{\beta_1} : I_{\beta_2} = 100 : 50 : 20 : 4$ .

L va M seriyasining har biri ko'p sonli chiziqlarni o'z ichiga oladi, ammo ularning deyarli barchasi tarqoq bo'lib, rentgen trubkasi va havoga so'riladi. Ushbu liniyalardan foydalanish faqat katta seriya raqami (masalan, volfram) bo'lgan materialdan ishlab chiqarilgan anoddan foydalanish mumkin.

Xarakterli spektrning intensivligi rentgen trubkasida kuchlanish kuchayadi va tok u orqali o'tadi. Shu bilan birga, bu fon (oq) nurlanishining intensivligini oshiradi, shuning uchun kuchli rentgenostrukturaviy taxlilda oldini olish uchun rentgen tekshiruvchi amaliyotida 3,5...4 Uq dan oshmaydigan ishchi kuchlanishi qo'llaniladi.

#### 6.1.5. Rentgen nurlarni tarqalishi. Nurlanish filtirlari

Rentgenstrukturaviy tahlil qilish paytida monoxromatik nurlanishni qo'llash tavsiya etiladi. Xarakteristik nurlanishning keraksiz komponentlarini olib tashlash uchun turli usullar qo'llaniladi. Ushbu usullardan biri selektiv singdiruvchi filtrlardan foydalanishni o'z ichiga oladi. Filtrni ishlatish, keraksiz komponentning zichligini fon darajasiga kamaytirish imkonini beradi.

Filtrning ishlashini tushuntirish uchun rentgen nurlarining modda bilan qanday aloqasi borligini tushunish kerak. Bir moddadan o'tib ketuvchi rentgen nurlari ikkita omil tufayli o'z intensivligini yo'qotadi. Birinchidan, to'g'ridan-to'g'ri absorbsiya tufayli, ya'ni rentgen nurlari energiyasini atomlarning kinetik energiyasiga aylantirishi va elektronlarning o'z qavatlaridan quvib chiqarilishi. Ikkinchidan, ikkinchi darajali rentgen nurlarining tasodifiy chiqarib yuborilgan kvanti paydo bo'lishida yorqin energiyaning tarqalishi tufaylidir.

Rentgen nurlarining modda tomonida singish qonuni quyidagi tenglama bilan tavsiflanadi:

$$I = I_0 e^{-\left(\frac{\mu}{\rho}\right)\rho x} \quad (6.4)$$

$\tau/\rho$  va dispersiyalash koeffitsienti  $\sigma/\rho$  dan foydalaniladi. Temirga qaraganda atomik soni katta bo'lgan og'ir elementlar uchun ( $M_{Fe}=26$ ), tarqalishning nurlanish singishini umumiy qiymatiga qo'shgan qissasi kichikdir. Shuning uchun, yalpi

singish koefitsienti  $\mu/\rho$  haqiqiy singish koefitsienti  $\tau/\rho$  ga teng deb o'ylasak bo'ladi.

Haqiqiy singish koefitsienti  $\tau/\rho$ , rentgen nurlari to'liq uzunligi bog'liq va nishon materiali atom raqamiga juda bog'liq, chunki nurlanish atomlardan fotoelektronlarni urib chiqarish qobiliyatiga bog'liq. Rentgen nurlanishi to'liq uzunligi yalpi yutilish koefitsienti bilan monoton bog'liqlik sohasida  $\tau/\rho$  haqiqiy yutilish koefitsientiga nisbati quyidagi nisban ifodalanadi (y to'liq uzunligining uchinchi kuchiga va nishon materialning atomik sonining to'rtinchi darajasiga proporsional bog'liq):

$$\tau/\rho = Cz^1\lambda^3, \quad (6.5)$$

bu yerda Z-nishon materialning atom raqami,  $\lambda$  – to'liq uzunligi.

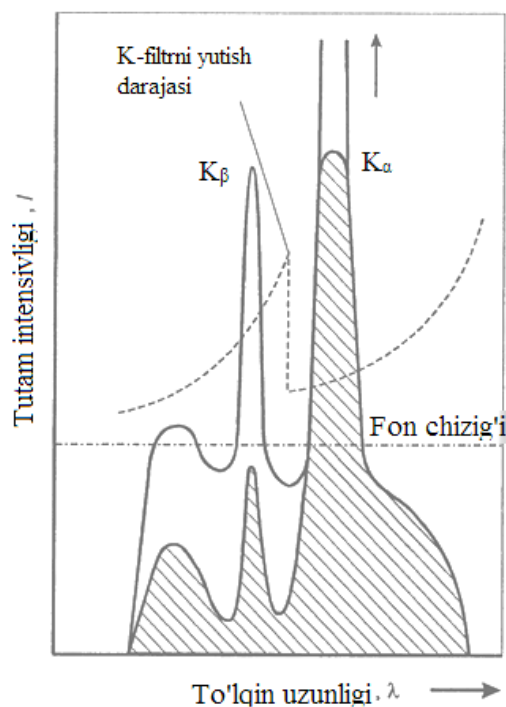
Biroq,  $\mu/\rho$  bog'lanish egrilik chiziqida to'liq uzunligi  $\lambda$  dan keskin sakrashlar bor bo'lib (6.6-rasm), ular konstanta S keskin o'zgarishi bilan bog'liq. Singish koefitsientini keskin o'zgarish nishon atomining muayyan qobiqidan elektronlarni ma'lum to'liq uzunligi bilan urib chiqarish uchun rentgen nurlarining qobiliyatini ko'rsatadi. Shunday qilib, K-sakrash egri chiziqda nishon atomidan K-elektronlarni chiqaradigan nurlanish to'liq uzunligiga  $\lambda_K$  mos keladi.

Davriy tizimning aksariyat elementlari uchun  $\mu/\rho$  qiymati ikkala tarafga sakrash bo'yicha taxminan 5 marta farq qiladi. Bu shuni anglatadiki, nurlanish nurlarining yo'lida o'rnatilgan ba'zi bir moddalarning yupqa bir plastinkasi nurlanish filtri sifatida xizmat qilishi mumkin ekan.  $\lambda_K$  dan uzunroq to'liq uzunligi nurlanish uchun deyarli shaffof bo'lganda,  $\lambda_K$  dan qisqa bo'lgan to'liq uzunligi nurlanishi deyarli butunlay so'riladi (6.7-rasm).

Strukturaviy analizda rentgen spektrining filtratsiyasi istalmagan nurlanish komponentlarni va oq nurlanishning bir qismini siqib chiqarish maqsadida amalga oshiriladi. Yuqorida aytib o'tganimizdek, rentgenstruktura taxlilida K-seriyali nurlanish uchta chiziqli  $\alpha_1, \alpha_2$  va  $\beta$  o'qlari ( $\beta$  komponentlari juda yaqin to'liq uzunliklarga ega, shuning uchun ularni e'tiborsiz qoldirish mumkin),  $\alpha_1$  va  $\alpha_2$  komponentalar ham juda yaqin to'liq uzunliklariga ega va rentgenogrammalar  $\alpha_1, \alpha_2$ -dublet shaklida ko'rinadi.

Odatda rentgenostruktura taxlil amaliyotida  $K_\beta$  nurlanishiga shaffof bo'lmagan  $\beta$ -filtrlari qo'llaniladi.

Filtr materialining to'g'ri tanlanishi (materialning atomik raqami)  $K_\alpha$  chiziqnideyarli sof shaklda tanlashga, ya'ni monoxromatik nurlanishni olishga imkon beradi. Turli materiallarning singish koefitsientlari haqidagi ma'lumotlar



6.7-rasm. Filtrdan o'tishda xarakterli spektorni intensivligini o'zgarishi

ko'pgina ma'lumotnomalarda keltirilgan. Shunday qilib,  $\beta$ -filtr tanlash uchun  $K_{\alpha}$  va  $K_{\beta}$  linyalarifiltrlanayotgan nurlanish o'rtasida oraliq manzilni egallagan materialni tanlash kifoya.  $\beta$ -filtr sifatida eng ko'p ishlatiladigan metallar folgasi olinadi. 6.2-jadvalda  $\beta$ -filtrlarni ishlab chiqarishda ishlatiladigan materiallar ko'rsatilgan. Empirik qoidalar mavjud:

$$Z_{\phi} = Z_A - 1 \quad (6.6)$$

$\beta$ -filtrlarining kamchiliklari quyidagilardan iboratki, ularning hech biri  $K_{\beta}$  - nurlanish va oq nurlarni to'liq singdira olmaydi, ya'ni filtrdan keyin olingan nurlanish monoxromatik emas. Bundan tashqari,  $\beta$ -filtrlari asosiy  $K_{\alpha}$  nurlanish intensivligini sezilarli darajada kamaytiradi, bu usulning hal qiluvchi kuchini sezilarli darajada kamaytiradi. Monoxromatikaga yaqin bo'lgan nurlanish bir nechta  $\beta$ -filtrlar tizimi yoki monokromator kristallari yordamida olinishi mumkin.

Monoxromatik nurni olish uchun monoxromator kristallardan foydalanish ma'lum bir uzunlikdagi rentgen nurlarining bir kristall yuzidan aks ettirilish qobiliyatiga asoslangan. Ikki xil monoxromatorlar ajratiladi: tekis kristalli va egilgan kristalli. Yassi kristalli monoxromatorlar juda zaif nurni (nurlanish intensivligi 10 va 100 marta aks ettirishda kamayadi) va boshlanqich nurlanish zichligi etarli darajada katta bo'lganida foydalanish mumkin. Misol uchun, yuqori rentabellikli magnit-tormozli (sinkrotron) nurlanish yordamida rentgenostruktura

**Integral intensivlik chiziqini  $K_{\beta}/K_{\alpha}=1/500$  nisbatda kichraytiradigan  $\beta$ -filtrlar**

| Anod materiali | $\beta$ - filtrlar             | qalinligi, MM | Zichligi, $\rho$ , g/cm <sup>3</sup> | $K_{\alpha}$ -chiziqni yutilish, % |
|----------------|--------------------------------|---------------|--------------------------------------|------------------------------------|
| Kumush         | Paladiy                        | 0,092         | 0,110                                | 74                                 |
|                | Rodiy                          | 0,092         | 0,114                                | 73                                 |
| Molibden       | Sirkoniy                       | 0,120         | 0,078                                | 71                                 |
| Mis            | Nekil                          | 0,023         | 0,020                                | 60                                 |
| Nikel          | Kobalt                         | 0,020         | 0,017                                | 57                                 |
| Kobalt         | Temir                          | 0,019         | 0,015                                | 54                                 |
| Temir          | Margents                       | 0,018         | 0,013                                | 53                                 |
|                | Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,042         | 0,019                                | 59                                 |
|                | MnO <sub>2</sub>               | 0,042         | 0,012                                | 61                                 |
| Xrom           | Vanadiy                        | 0,017         | 0,010                                | 54                                 |
|                | V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0,056         | 0,019                                | 64                                 |

analizida monoxromator sifatida tez-tez kremniy kristallari (qaytaruvchi tekislik 111) ishlatiladi. Egilgan kristall monoxromatorlar maxsus tasvirga olish sxemasini talab qiladi, biroq ular fokuslangan monoxromatik rentgen nuri tutamiga ega bo'lish imkonini beradi (monoxromator qo'shimcha o'ziga xos to'plovchi linzalarni rolini o'ynaydi).

#### **6.1.6. Rentgen nurlari difraktsiyasi**

Rentgen strukturaviy tahlillari rentgen nurlarining diffuziya va interferentsiyasiga asoslangan bo'lib, materialning kristall panjarasiga to'qri keladi. Ushbu qodisalarni tushunish uchun, avvalo, difraktsiya va interferentsiyaning asosiy tushunchalarini ko'rib chiqamiz.

#### **To'lqin interferentsiyasi**

Bu to'lqinlarning ta'sirlanish hodisasi bo'lib, unda bu to'lqinlarning fazoning ayrim nuqtalarida fazalarining o'zaro kuchayishi va ayrimlarida esa susayishi bu to'lqinlarning fazasini nisbatiga qarab amalga oshadi.

Har qanday to'liq interferentsiyalanishi mumkin: tovushli, elektromagnit va hatto to'liqlar suv yuzasida paydo bo'lishi mumkin. Tabiiy sharoitda kuzatiladigan interferentsiyaga misol kamalak rangli nozik plyonkalar (sovun pufakchalari, suv yuzasidagi benzin yoki suv yuzasidagi yoqlar) shakllanishi hisoblanadi. Amaliyotdan misol keltirilsa, termik ishlov berishda misol - bu metall sirtidagi ranglarning jilolanishi, bu nur interferentsiyasining yupqa oksidli plenkadangi aralashuvi natijasidir.

Yorug'liq interferentsiyasini yupqa tekis parallel plastinkada ko'rib chiqamiz (6.8-rasm). Tassavur qilamiz plastinkaning sindirish ko'rsatgichi  $n_2$  ga teng ekanligi va muxitning sindirish ko'rsatgichi ( $n_2 > n_1$ ). Mayli ikkita monoxromatik nurlar  $S$  va  $S_1$  plastinkaga ustiga tushayati deylik. Nurlarning optik yo'l farqlari quyidagicha bo'ladi:

$$\Delta S = n_2(AD + DC) - n_1(BC) + \lambda/2 \quad (6.7)$$

qo'shimcha yo'lning o'zgarishi  $\lambda/2$  to'liqning fazasi o'zgarishi bilan, plitaning old yuzasidan (optik jihatdan ko'proq zich muhit) qaytgan  $\pi$  qiymatga bog'liq. 6.8-rasmdan ko'radiki,

$$AD = DC = d / \cos(r) \text{ va } BC = AC \cdot \sin(i) = 2d \cdot \tan(r) \sin(i)$$

ya'ni, bizlamiz

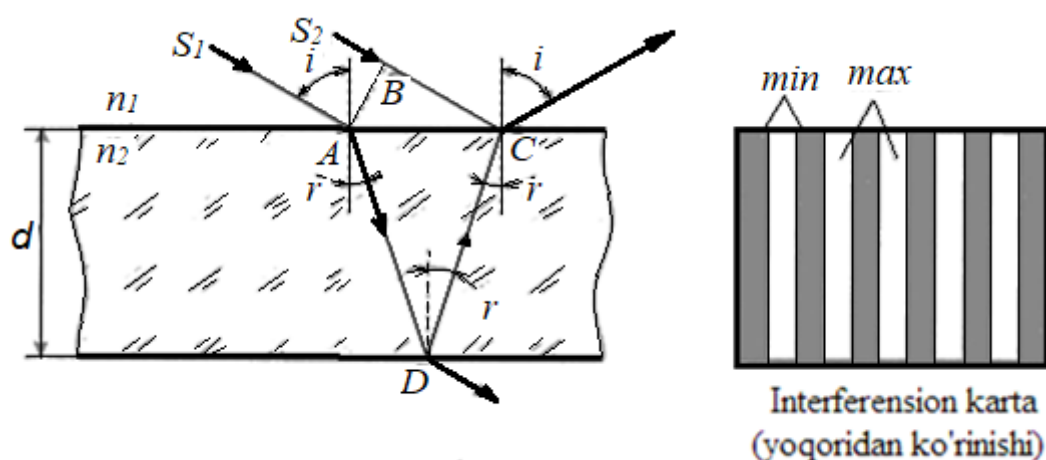
$$\Delta S = 2n_2 d / \cos(r) = 2n_1 d / \sin(r) \cdot \sin(i) / \cos(r) + \lambda/2 \quad (6.8)$$

Nurning sinishi qonuniga asosan

$$n_1 \sin(i) = n_2 \cdot \sin(r) \quad (6.9)$$

Shuning asosida biz

$$\Delta S = 2n_2 d / \cos(r) + \lambda/2 \quad (6.10)$$



6.8-rasm. Yupqa plenkalarda interferentsiya

Yoruqlikning interferentsiyasi nurlarning optik yo'lfarqlari yarim to'lqin uzunliklarining to'liq soni bo'lsa, ya'ni,

$$2n_2d/\cos(r) = m\lambda \quad (m = 0, 1, 2 \dots)$$

Interferentsiya nurlari  $\lambda/2$  ning optik yo'l farqiga ega bo'ladi, ya'ni nurlari antifazda bo'ladi. Bu shuni anglatadiki, nurlar bir-birlarini sindiradi va interferentsion tasvirda minimal bo'ladi. Yo'llar farqida

$$2n_2d/\cos(r) = (2m+1)\lambda/2 \quad (m = 0, 1, 2 \dots)$$

nurlar fazada mos keladi, shuning uchun bu interferentsion tasvirda maksimum kuzatiladi.

Ba'zi bir to'lqin uzunliklari uchun oq nur bilan yoritilganida, maksimal aks ettirish holati, boshqalari esa minimal, shuning uchun plenka rangli ko'rinadi (masalan, suv yuzasida rangli yoq plenkalari).

### **To'lqinlarning difraktsiyasi**

Diferentsiya, to'lqinlar ma'lum bir optik nosimmetrik muhitda tarqalganda, masalan, nurlarda ekranlardagi teshiklardan, shaffof jismlarning chegaralarida va boshqalarda keng tarqalganda kuzatiladigan bir qator hodisalarni anglatadi. Yana tor ma'noda, difraktsiya deganimizda to'lqinlarni to'siqlarga uchraganda egilishi degan ma'noni anglatadi, qaysiki to'lqin uzunligi o'lchamlari bilan o'lchana olinadigan, ya'ni geometrik optika qonunlaridan chetga chiqishdir.

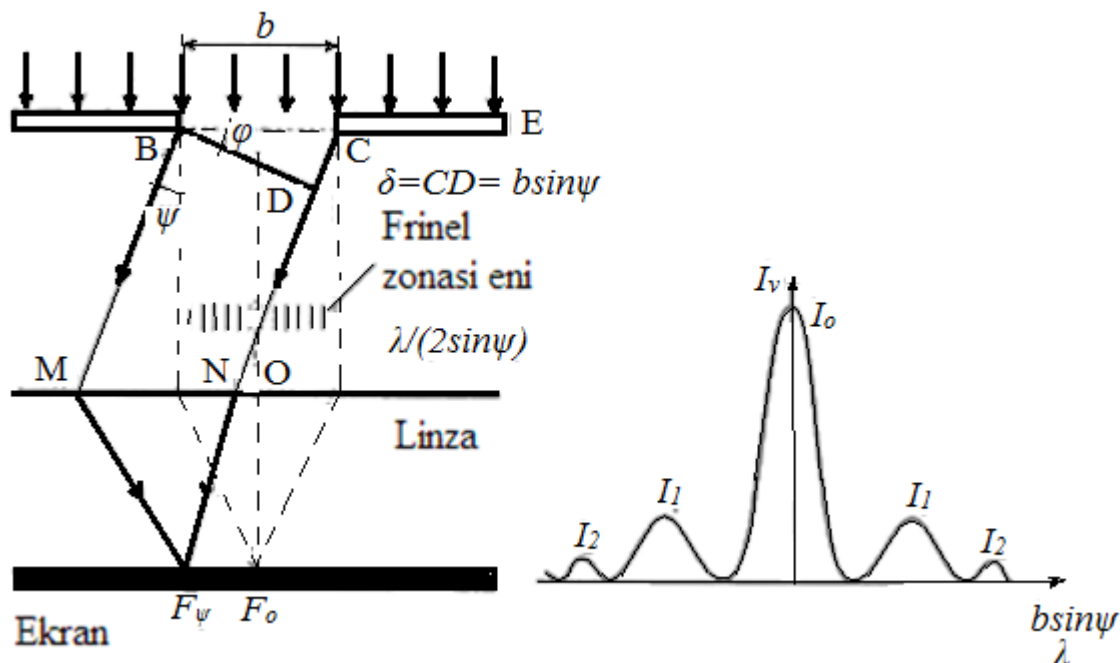
To'lqinlarning to'sqinlik qilish vaqtida to'lqinlarning harakatini tasvirlash uchun Gyuygens-Fresnel printsipli qo'llaniladi: tarqalgan to'lqinning har bir nuqtasi o'zlarining o'zaro bog'liq bo'lgan va nurlanish manbaining asosi bo'lgan ikkilamchi to'lqin manbai hisoblanadi. Ikkilamchi manbalar bir-biriga mos kelmagani uchun, ular tomonidan qo'zg'atadigan ikkinchi to'lqinlar bir-biriga aralashib ketadi. Ikkinchi to'lqinlarning aralashuvi natijasi yo'nalishga bog'liq. Ikkinchi darajali to'lqinlarning

$I_{uk}$  intensivligi to'lqin yo'nalishiga normal bo'yicha maksimal bo'lib, u to'lqin yo'nalishi va normal orasidagi burchak kattalashsa kurilayotgan ikkilamchi to'lqin kamayadi.  $\alpha > \pi/2$  kattaligi uchun  $I_{uk}$  nol aylanadi, ya'ni ikkilamchi manbalardan asosiyga tarqaladigan teskari to'lqin yo'q.

Difraktsiyani ikkita turi mavjud: Frenelning tushayotgan nurlar difraktsiyasi va Fraugoferning parallel nurlarda tarqalishi difraktsiyasi. Boshqacha aytganda, Frenelning difraktsiyasi sferik to'lqinlarning difraktsiyasidir, Fraugoferning bu tekislik to'lqinlarining difraktsiyasidir.



Rentgenostrukturaviy tahlil qilish, ko'pincha parallel nurlari bilan bog'liq bo'lgani uchun, misol sifatida, Fraugofer difraksiyasini tirqishda ko'rib chiqamiz. Monokromatik yorug'likning parallel chiziqli, odatda, shaffof bo'lmagan ekran  $E$  ga tushadi, qaysiki unda tor tirqish  $BC$  kesilgan bo'lib, u doimiy eni  $b$  va uzunlikdagi  $L$  ga teng (6.9-rasm).



6.9-rasm. Tor tirqishda Fraungofer difraktsiyasi

Gyuygens-Fresnel printsipligiga muvofiq, bo'shliq nuqtalari to'lqinlarning ikkinchi manbasi hisoblanadi. Agar nurning yoriqdan o'tishi paytida chiziq markazi tekisligida o'rnatilgan ekranda ko'rinadigan yorug'lik tarqalishi qonuni kuzatilsa, yorug'lik manbai tasvirini olgan bo'lar edi. Shu bilan birga, yorug'likning tor bo'lagidan ajralib ketishi sababli, displeyda difraktsiya maksimal tizimi kuzatiladi - yorug'lik manbai yorug'lik manbaining yorug'lik manbai bilan ajralib turadi.

$F_\psi$  linzasining yon tomonida,  $OF_0$  optic o'qiga  $\psi$  burchak bilan tushayotgan barcha parallel nurlar yiqiladi. Tirqishdan shu yo'nalishdagi  $BM$  va  $CH$  oxirgi optik nurlar yo'l farqlari teng (sinishi ko'rsatkichi birga teng deb olinadi).

$$\delta = |CD| = b \cdot \sin \psi, \quad (6.13)$$

$BC$  tirqishni qobirqalariga parallel bo'lgan polosa ko'rinishidagi Frenel zonalariga ajratamiz. Polosalar enini  $\lambda / (2 \sin \psi)$  teng deb olamiz, chunki zona oxiridan o'tkazilgan optik nurlar farqi  $BM$  ga parallel, hamda  $\lambda / 2$  teng. Berilgan yo'nalishdagi barcha zonalar xuddi shu tarzda yorug'lik chiqaradi. har bir juft qo'shni zonalar yorug'lik interferentsiyasi natija tebranishlari amplitudasi nolga tengdir, chunki bu zonalardan bir xil amplitudadagi tebranish chaqiradi, lekin qarama qarshi fazalidir. Shunday qilib,  $F_\psi$  nuqtasida intenferentsiyalar natijasi

tirqishga nechta Frenel zonalari mos kelishi aniqlanadi. Agar zonalarning soni teng bo'lsa, ya'ni.

$$b \cdot \sin \psi = \pm 2m\lambda/2 \quad (m=1,2 \dots), \quad (6.14)$$

$U$  holda difraktsiya minimumi (nurning to'liq yo'qolishi) mavjud. Formulaning (6.14) o'ng tomonidagi minus  $\psi$  burchak ostida tarqaladigan yoruqlik nuriga to'qri keladi va fokusda jamlanadi, u esa  $F_\psi$  optik o'qiga simmetrik.

Agar zonalar soni toq bo'lsa, ya'ni.

$$b \cdot \sin \psi = \pm (2m+1) \lambda/2 \quad (m=1,2 \dots), \quad (6.15)$$

bunda bir Fresnel zonasining ta'siriga mos keladigan maksimal difraktsiya kuzatiladi. Mning qiymati eng katta difraktsiya tartibini ifodalaydi.

$\Psi=0$  yo'nalishda nol tartibdagi eng intensiv maksimal kuzatiladi, chunki  $F_\psi$  nuqtada tirqishning barcha uchastkalari tomonidan hosil bo'lgan tebranishlar bir fazada sodir bo'ladi.

Xuddi shunday tasvir to'liqlarning difraktsion panjaraga, eng oddiy holatda, bir xil kenglikdagi va bir-biriga parallel tirqish tizimi bo'lgan difraktsiyasi bilan olingan. har bir tirqish uchun difraktsion tasvirlarni bir-birining ustiga qo'yib chiqiladi va umumiy difraktsion tasvirni hosil qiladi.

Difraktsiyani uch o'lchamli panjarada ham kuzatilishi mumkin. Fazoviy yoki uch o'lchamli, difraktsion panjara deb optik jihatdan bir xil bo'lmagan muhit, bir xil emasligi vaqti vaqti bilan barcha uchta koordinatalarini o'zgarishi natijasida takrorlanishga aytiladi. Shuni aytish kerakki, bu ta'rif bo'yicha barcha kristall materiallar to'g'ri keladi, bunda bir tekislik rolini atom, molekula va ionlarni vaqti bilan joylashishi o'ynaydi.

Difraktsiyani kuzatish shartining ifodasi

$$\lambda < 2 d_{max}, \quad (6.16)$$

bu erda  $\lambda$  to'liq uzunligi,  $d_{max}$  - bu fazoviy panjaraning eng katta parametri. Uzunroq to'liq uzunligi bo'lgan to'liqlar panjara orqali o'tib ketadi yoki difraktsiyadan holi bo'lmaydi. Kristall strukturalar uchun bunday sharoitni rentgen nurlanishi qoniqtiradi, qaysiki shu usulga rentgen taxlili asoslangan.

### **Atomlar tomonida rentgen nurlarini singdirilishi**

Rentgen kvantining nurlari atom tutamning elektr maydoniga tushganda elektronlarga ta'sir ko'rsatadi va har biriga tebranish harakati harakat beradi. Xuddi shunga o'xshash tarzda titraydigan har qanday zaryad elektromagnit nurlanish manbai bo'lib, ya'ni birlamchi rentgen nurlanishining bir qismini o'ziga singdiruvchi elektron uni o'zlashtira boshlaydi. Bundan tashqari, ikkilamchi nurlanish to'liqining uzunligi asosiy qism bilan bir xil. Elektronning nurlanishi

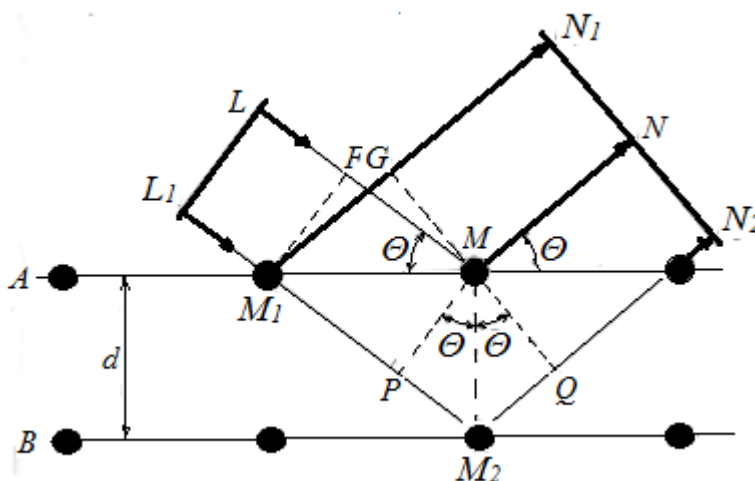
barcha yo'nalishlarida sodir bo'ladi, ya'ni birlamchi nurlanish tarqaladi. Atomning nurlanishi elektronlarining butun majmuasini elektromagnit to'lqinlarning yagona manbai deb hisoblash mumkin. Yoruqlikdagi yoruqlikning difraktsiyasi bilan taqqoslash oson kechadi - rentgen nurlanishning difraktsiyasida, ikkilamchi to'lqinlarning manbalari bo'lgan kristalli moddalarning davriy ravishda joylashgan atomlari, optik nosimmetrikliklar rolini o'ynaydi.

Atom majmuasidan tarqaladigan barcha to'lqinlarning superpozitsiyasi difraktsion nurlanish umumiy to'lqinini hosil qiladi. Kristall to'lqining ayrim yo'nalishlarda, o'rganilayotgan alohida atomlar boshqa yo'nalishlarda qo'shilgan to'lqinlar o'zaro bir-birini so'ndiradi. Shu yo'l bilan olingan difraktsiya tasvirlari kristallning ichki strukturasi haqida ma'lumot beradi.

### Vulf-Bregg qonuni

Moskva universitetining professori *Y.V.Vulf* va ingliz fiziklari otasi va o'qli *Bregg* tomonidan bir-biridan mustaqil ravishda kristall orqali rentgen difraktsiya o'tishida sodir bo'lish hodisasiga oddiy va tushunarli izohlar berildi.

Agar atomlarning termal tebranishlarini e'tiborsiz qoldiradigan bo'lsak, unda kristall bir-biridan  $d$  bir xil masofada joylashgan parallel tekisliklardan tashkil topgan oiladan iborat deb qarash mumkin (6.10-rasm). Ushbu oilaning atomik tekisliklari soni katta va kristallda sinishi yo'qligi taxmin qilinadi.



6.10-rasm. Vulf-Bregg qonuniga xulosa

Kristallga parallel tutamli  $\lambda$  uzunlikdagi monoxromatik rentgen nurlari kristall atom tekisligiga nisbatan  $\theta$  siljish burchagii bilan tushayotgan bo'lsin. Parallel tutamning nurlari atom tekisligidan  $\theta$  burchak ostida qaytadi.  $D$  nurlari orasidagi yo'l farqi bir xil tekislikdan (masalan,  $L_1$  va  $L_2$  nurlari, 6.10-rasm) aks etadi va nolga teng ( $D = M_1G - MG$ ), ya'ni, bu nurlar bir xil fazada. Kristall kristall

qalinligiga kirib, nurlar parallel atom tekisliklarini q burchak qarshi oladi. Xuddi shu burchakda aks ettirilgan parallel nurlar, ular o'rtasidagi o'zaro  $D$  yo'l farqqi qarab, bir-birlarini kuchaytiradi yoki zaiflashtiradi. 6.10-rasmda qo'shni atom tekisliklardan qaytgan nurlar orasidagi yo'l farq  $PM_2$  va  $QM_2$ , bo'laklarning yig'indisiga teng ekanligini anglatadi, bundan tashqari:

$$PM_2 = QM_2 = d \cdot \sin \theta, \quad (6.17)$$

Shunday qilib, interferentsion maksimum faqatgina quyidagi vaziyatda kuzatiladi degan xulosaga kelish mumkin

$$n\lambda = 2d \sin \theta, \quad (6.18)$$

bu erda  $n$  - parallel tekisliklardan aks ettirilgan yo'l farqiga mos keladigan to'lqin uzunliklarining sonini ko'rsatadigan aks ettirish tartibi;  $\lambda$  - to'lqin uzunligi;  $d$  - oraliq masofa;  $\theta$  - nurlarning aks etishi burchagi.

(6.18) tenglik Vulf-Bregg formulasi deb ataladi. Tadqiqotlarda ko'rsatilgandek Vulf-Bregg formulasi juda yuqori aniqlik bilan amalga oshiriladi (garchi u «atom tekisliklari» dan rentgen nurlarining aks эттирилиши to'g'risida atylab noto'g'ri jismoniy asos bilan olingan). Faqat juda aniq o'lchovlar bilan bu formuladan cheklanish, bu esa kristalli rentgen nurlarining sinishi bilan bog'liq.

Vulf-Bregg formulasidan shuni ta'riflash kerakki, difraktsiya maksimumining  $\theta$  burchaklarini eksperimental o'lchash yo'li bilan quyidagilar mumkin:

a) oraliq masofa  $d$  ma'lum bo'lsa, ushbu maksimumlar uchun mos keladigan to'lqin uzunligini aniqlash;

b) agar difraktsion maksimumiga mos keladigan  $\lambda$  to'lqin uzunliklari ma'lum bo'lsa, tekisliklararo  $d$  masofani aniqlash.

### LAUE nisbati

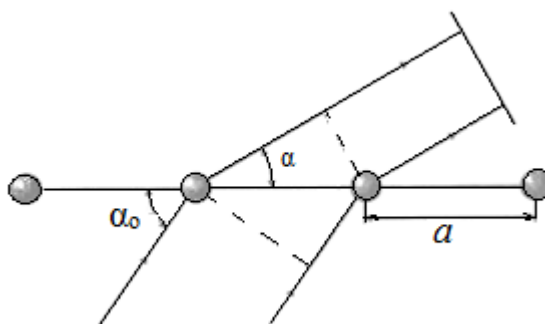
Kristalli panjaradagi rentgen nurlarining difraktsiyasi nurlarning yarimyalitiroq ko'zgular tizimidan aks etganiga o'xshaydi, biroq o'lchamli optik aks ettishidan farqli o'laroq, bu uch o'lchamli muntazam atom strukturasida sodir bo'lishini ta'kidlash kerak. Difraktsiya aslida qanday ro'yobga chiqishini tushunish uchun Laue aks etishi paydo bo'lgan sharoitlarni ko'rib chiqish lozim.

To'lqinlarning o'zaro kuchaytirilishi uchun sharoitlar (ya'ni difraktsiya maksima uchun shartlar) oddiy geometrik konkraktsiyalardan olinishi mumkin (6.11-rasm). qo'shni nurlarning yo'l farqi  $a(\cos \alpha - \cos \alpha_0)$  bilan aniqlanadi. Difragraf rentgen nurlarining to'lqinlari fazada mos kelishini ta'minlash uchun (ya'ni, bir-birlarini kuchaytirishi) ularning harakatlanishidagi farq to'lqin uzunliklarining to'liq soniga teng bo'lishi kerak, ya'ni  $h\lambda$ . Agar difraktsiya uch o'lchamli atom panjara ustida bo'lsa, unda har bir yo'nalishda xuddi shunday tenglama yozish

mumkin. Moddalarning elementar yacheykasiga mos keladigan uchta asosiy yo'nalish uchun yozilgan tenglamalar «Laue» sharti deb ataladi:

$$\begin{aligned} a(\cos\alpha - \cos\alpha_0) &= h\lambda \\ b(\cos\beta - \cos\beta_0) &= k\lambda, \\ c(\cos\gamma - \cos\gamma_0) &= l\lambda \end{aligned} \quad (6.19)$$

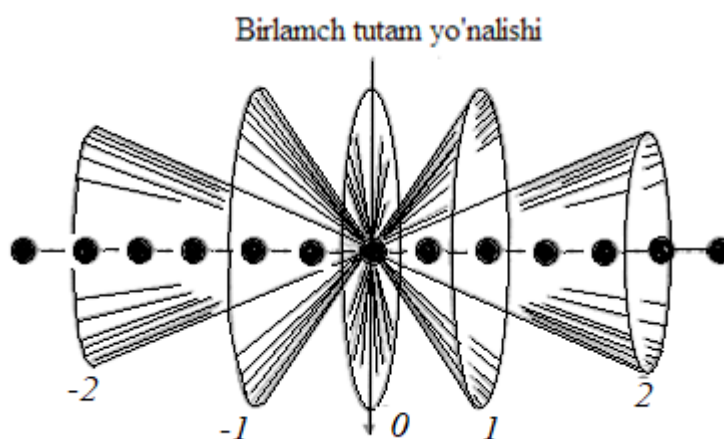
Ushbu tenglamalarda  $h$ ,  $k$  va  $l$  koeffitsientlari atomlarning seriyasidagi nurlarning aks ettirilishiga mos keladi.



6.11-rasm. Laure nisbatini tushintiruvchi to'liqlarini super xolat sharti

Har qanday tenglama (6.19) atomi bilan mos keladigan qator bo'ylab joylashgan bir o'q bilan konusning sirtini tasvirlaydi. Ushbu konusning ustki qismidagi yarim burchak  $q$  (birinchi tenglama uchun) teng bo'ladi.

Shunday qilib, biron bir yo'nalishdagi nurlanish yo'nalish uchun bir nechta atom atrofida konuslar tizimi hosil bo'ladi (6.12-rasm). Konuslarning har biri ma'lum bir tartibning difraktsiyalashgan nurlari to'plamidir.

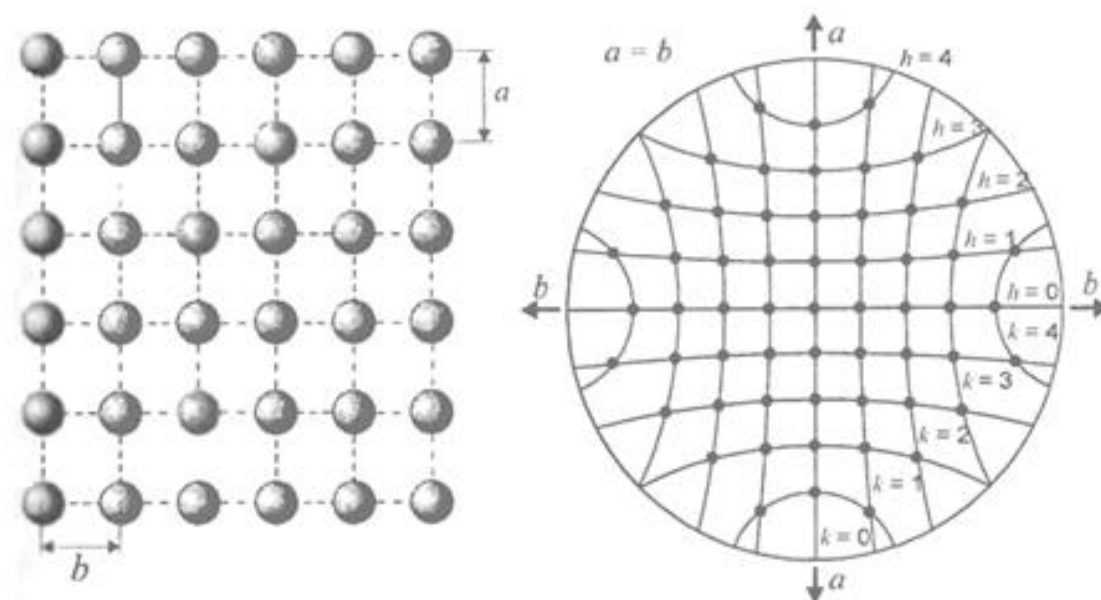


6.12-rasm. Bir qator aks etuvchi atomlarni hosil qiluvchi diffuzli konuslar

Nurbilan atomlarning tekis panjarasini yoritganda rentgen nurlari konusning ikkita tizimi qosil bo'ladi. 6.13-rasmda tekis kvadrat panjara bo'yicha ajratilgan rentgen nurlarining stereografik tasviri ko'rsatilgan. Uch o'lchamli atom

tarmoqining difraktsion tuzilishi konusning uchtatizimining kesishishi bilan aniqlanadi.  $a$ ,  $b$  va  $c$  o'qlari atrofidagi konusning uchta tizimi umumiy Laue tenglamalaridagi o'zgaruvchan qiymatlar bilan umumiy tenglamaga (umumiy kesishuv liniyasi) ega bo'ladi.

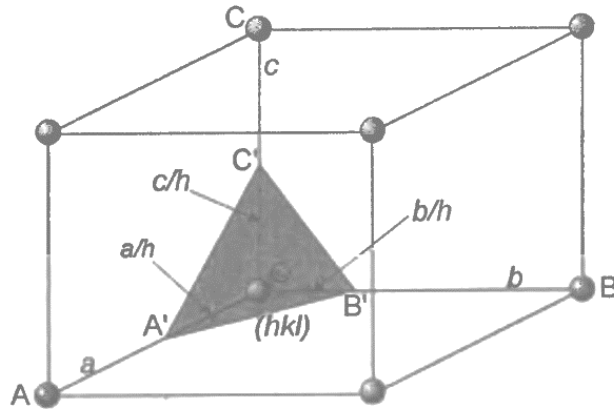
Shuning uchun, difraktsiya tasvirida difraktsiya maksimumlarining oxirgi sonlari mavjud bo'ladi.



6.13-rasm. Nurlarning stereografik proeksiyasi atomlarning ikki o'lchovli kvadratli cetkasi

$hkl$  koeffitsientlarining to'plamini farqlash chiziqlarining yo'nalishi difraktsiyalashgan tutam indeksleri deb atash mumkin. Ushbu ko'rsatkichlar, Miller indekslaridan farqli o'laroq, qavslar ichiga kiritilmagan va umumiy omil mavjudligi bilan farq qilishi mumkin.

$hkl$  ko'rsatkichlari to'g'ridan-to'g'ri aks ettiruvchi tekislik ( $hkl$ ) bilan bog'liq, ya'ni Laue munosabatlari Vulf-Bregg aks etishi bilan bog'liq bo'lishi mumkin. Buni isbotlash uchun fazoviy panjarani (6.14-rasm) ko'rib chiqamiz, chunki unda rentgen nurlari difraktsiyasi sodir bo'layapti. Biz farq qiladigan yoritgich indeksleri  $hkl$  deb hisoblaymiz. Bu shuni anglatadiki, bu yo'nalishda difraktsion nurlarning o'zaro kuchayishi, ya'ni uch tizim konusining kesishuvi ( $OA$  -  $h$ -konus bo'ylab,  $OB$ - $k$ -konus bo'ylab va  $OC$  -  $l$ -konus bo'ylab o'tadi). Shunday qilib,  $A$  nuqtasi bilan tarqalgan rentgen nurlari to'lqining fazasi,  $O$  nuqtasida tarqalgan to'lqinning fazasi,  $h$  faktoriga ko'ra, ya'ni,  $A$  va  $O$  nuqtalarida farqli bo'lgan nurlarning o'zgarishlar farqi  $2\pi h$ .



6.14-rasm. Kristalning birlik hujayrasidagi akslantirish tekisligi (hkl)

Keling,  $a/h$  masofasidan bo'lgan  $A'$  nuqtasini ko'rib chiqamiz. Ushbu nuqtaning koordinatalari quyidagilar:  $1/h, 0, 0$ . Bu nuqtada tarqalgan nur, O nuqtada diafragirlangan nur to'liq uzunligi davridan yana bir davr o'zib ketadi, ya'ni uning fazasi  $2\pi$  bo'ladi. Xuddi shunday, biz  $B'$  va  $C'$  nuqtalarini olamiz.  $A', B'$  va  $C'$  nuqtalaridagi tarqalgan nurlar sinfazada bo'ladi. Ko'rinishlardan ma'lumki, bu nuqtalar Miller indekslari ( $hkl$ ) bilan kristallografik tekislikda yotadi va ushbu tekislikning barcha nuqtalari bir xil fazada nurlanishni aks ettiradi. Shunday qilib, kristalli panjaradagi rentgen nurlarining difraktsiyasi atom tekisliklar tizimida o'z aksini ifodalaydi.

Shuni ta'kidlash kerakki, aks etgan nurlar tutami indekslar va tekislikning Miller indekslari bir xil emas. Miller indekslari umumiy omilga ega emas va difraktsiyalashgan nur indekslari uchun bunday cheklov yo'q. Umumiy faktor  $n$  Birinchi tartibli aks ettirishni ifodalash uchun foydalaniladi va ularga aks ettiruvchi tekislik bilan bir xil ko'rsatkichlar beriladi. Shunday qilib, tekislikdan (110) birinchi aks etish 110, ikkinchi tartib 220, uchinchi 330 va boshqalar qayd etiladi. Xatoliklarni oldini olish uchun, difraktsion reflekslarning ko'rsatkichlari qavssiz yoziladi.

Difraktsion reflekslarini hisoblashning bunday usuli difraktsion sharoitlarni hisobga olishni ancha osonlashtiradi. Ushbu soddalashish, tekislikdan ( $hkl$ ) zichlikdagi navbatning yaqqoligi  $1g^n$ -dan bir-biridan tekislik tizimidan birinchi tartibni aks ettirishga teng (tekisliklararo masofa bir birlik sifatida olinadi). Agar tekisliklarning ( $hkl$ ) orasidagi masofa  $d$  ga teng bo'lsa, unda tassovur etilayotgan tekisliklar oilasining ichki tartibini aks ettiradigan  $n$ -tartibli masofa  $d'=d/n$  bo'ladi, ya'ni, Vulf-Bregg tenglamasi

$$A = d / \sin \theta, \quad (6.20)$$

## **Aks etishning intensivligi va reflekslarni so'ndirish**

Laue interferentsion funktsiyalari va Vulf-Bregg formulasi materialning kristalli panjarasida atomlarning joylashishi to'g'risida ma'lumot beradi. Rentgen nurlarining aks ettiruvchanligini o'lchash materialning ichki tuzilishi haqida ma'lumot olishning yana bir kuchli usuli hisoblanadi. Rentgenogrammalarda difraktsion maksimumining intensivligi va kengligini o'zgartirish orqali, misol uchun, qotishmalarni qattiq eritmaning tarkibi, mikro va makro, kuchlanishlar, donaning kattaligi, teksturasini olish mumkin.

Rentgen nurlari kristalli moddadan o'tganda uning atomlari tomonidan tarqatiladi. Tarqatish atom qobiqlarida sodir bo'lib, ular keyinchalik ikkinchi darajali nol rentgen nurlarini manbaiga aylanadi.

Ushbu to'liqlarning intensivligi, aslida, kuzatiladigan difraktsiya tasvirida difraktsiya maksimumining intensivligini aniqlaydi. Rentgen nurlari interferentsiyasining mavjud nazariyasi, ma'lum kristall panjara difraktsiyaning maksimumi uchun intensivlikni hisoblash imkonini beradi. Ushbu nazariyaning matematik apparatining ta'rifi ushbu qo'llanmaning doirasidan tashqaridadir va u hisobga olinmaydi. Aks ettish intensivligiga ta'sir qiluvchi asosiy omillar berilishi kerak.

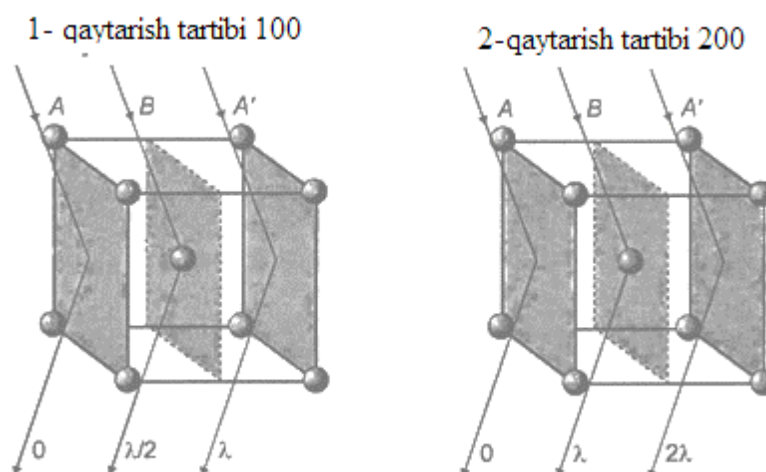
### **Strukturaviy omil**

Birinchidan, misol tariqasda rentgen tutamini XMK- panjara atomik tekisligidan aks ettishini muhokama qilaylik (6.15-rasm). Fikrlashning birinchi tartibli aks ettishdan ko'rib chiqaylik. A tekislikdan aks etadigan to'liq bir to'liq davrda (ya'ni, bitta to'liq uzunligi)  $A'$  tekislikdan aks ettgan to'liqindan o'zib ketadi. V tekisliklari ham aks etadigan tekislikdir. Bundan tashqari, agar yacheykaga kirgan barcha atomlar bir xil atomga ega bo'lsa, u holda bu atom tekisligi A va  $A'$  tekisliklari bilan bir xil bo'ladi. Sezishimiz mumkinki, bu tekislik A va  $A'$  tekisliklari orasidagi yotadigan bo'lsa, unda aks ettirilgan rentgen nurlanishi yarim davrga A tekislikidan aks ettgan to'liqining va yarim parcha vaqti  $A'$  tekislikidan aks etadigan to'liqning orqasida holadi. Natijada, A va V tekisliklarida aks etgan to'liqlar qarama qarshi fazada joylashgan va bir-birlarini so'ndiradi. Xuddi shu tarzda,  $A'$  va  $V'$  ning aks etishi bir-birlarini so'ngdiradi va hokazo. Bu shuni anglatadiki, difraktsiyalashgan nur intensivligining umumiysi nolga teng bo'ladi, ya'ni difraktsion maksimum 100 difraktsion tasvirda bo'lmaydi.

Ikkinchi tartibli refleksning yo'q bo'lib ketishi aks etmaydi, chunki to'liqlar A,  $A'$  va V tekisliklarida aks ettiriladi va sinfaz bo'ladi. haqiqatan ham, ikkinchi aks ettirish tartibi uchun A tekisligidan aks ettirilgan to'liq  $A'$  tekisligidan ikki davrga (ya'ni, ikki to'liq uzunligiga) va V tekisligidan bir to'liq davrgacha (bir uzunlik to'la) aks etgan to'liqindan oldinga chiqadi. Shunday qilib, barcha ko'rsatilgan



to'liqlar bir fazada bo'ladi va bir-birlarini kuchaytiradi. Takidlash mumkinki, bu barcha aks etgan juft maksimumlar uchun o'rinlidir.



6.15-rasm. XMK panjarada to'liq interferentsiyasi

XMK- panjaralarda 001, 003 reflekslari mavjud emas, lekin 002, 004 va hokazo mavjud. Umuman olganda, hajmi markazlashgan kub panjara uchun, 00h tipidagi difraktsion refleks ishtirok etadi, agar  $h$  -juft raqam bo'lsa.  $A$  va  $V$  tekisliklarining tarqalishi qobiliyatlari teng bo'lishi shart emas, chunki ulardagi atomlar boshqacha tartibda yoki boshqa turdagi bo'lishi mumkin. Unda toq reflekslarning so'nishi to'liq bo'lmaydi.  $V$  tekisliklari  $A$  va  $A'$  tekisliklaridan turli masofalarda bo'lsa, xuddi shunday bo'ladi.

Qisman difraktsion refleks  $hkl$  ning intensivligini topish turli xil amplituda va faza aks etgan ko'p sonli to'liqlarni qo'shish vazifasi bo'lib, bir xil to'liq uzunligiga ega. Biror elementar yacheykalarining barcha atomlarining tarqalishi to'liqlarining qo'shilish natijasida strukturaviy omil yoki tarqalishning strukturaviy amplitudasi deyiladi. har qanday kristalli panjara uchun strukturaviy omil analitik ravishda hisoblanishi mumkin. Tarqalishning maksimal intensivligini quyidagi ko'rinishda ifodalash mumkin:

$$I \cong KF^2 (HKL), \quad (6.21)$$

bunda,  $I$ -aks etish intensivligi;  $K$ -koeffitsient;  $F$ -struktura amplituda tarqatishi.  $F^2$  intensivlikni strukturaviy ko'paytirgichi deb ataladi.

Strukturaviy amplektuda  $F$  kompleks funktsiya ko'rinishida yozish mumkin:

$$F(HKL) = \sum_k \Phi_k \exp[2\pi i(Hm_1 + Km_2 + Lm_3)], \quad (6.22)$$

bunda,  $\Phi_k$  –atomni tarqatish qobiliyati;  $HKL$  – aks ettirish indeksleri,  $m_1, m_2, m_3$ - birlik yacheykaning koordinata bazisi. Shu ifodaning trigonometrik shaklidagi ifodasi:

$$F(HKL)=\sum_k \Phi_k [\cos 2\pi(Hm_1 + Km_2 + Lm_3) + i \sin 2\pi(Hm_1 + Km_2 +)] \quad (6.23)$$

Strukturaviy omillarni hisoblashni HMK va YOMK panjara misolida ko'rib chiqamiz.

Shunday qilib, strukturaviy omil strukturaviy amplitudaning kvadratiga teng. Xajmiy markazlashgan panjara bazisini quyidagi ko'rinishda yozish mumkin:

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{pmatrix} \quad (6.24)$$

ya'ni hajmi markazlashgan panjarada ikki tipdagi mavjud: ularning ba'zilari 000 panjara tugunlarida, ikkinchisi  $1/2 \ 1/2 \ 1/2$  da yotadi. Bazaning koordinatalarini (6.23) ifodaga qo'yiladi va kvadratga ko'taramiz. Panjaradagi barcha atomlar bir xil tipda deb xisolaymiz, ya'ni tugunlarni  $F$  ning tarqalishi qobiliyatini qavsdan chiqarib olish mumkin deb hisoblaymiz. Natijada olingan strukturaviy omil quyidagi ko'rinishda bo'ladi:

$$F^2 = \Phi^2 [1 + \cos \pi (h + k + l)]^2 + \Phi_k^2 \sin^2 \pi (h + k + l), \quad (6.25)$$

Agar summa  $(h + k + l)$  toq raqam bo'lsa, difraktsion refleksining intensivligi nolga teng bo'ladi. HMK panjara materialning difraktsiya tasvirida 100, 300, 111, 120 va boshqa reflekslarning aks etishi bo'lmaydi. Shunday qilib, 6.15-rasmda ko'rilgan xol difraktsion tasvirida HMK panjara reflekslarini so'nishining xususiy holat.

Yoqlari markazlashgan panjara xolida bazis quyidagi ko'rinishda bo'ladi:

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \\ 1/2 & 0 & 1/2 \end{pmatrix} \quad (6.26)$$

Bu degani, YOMK panjarada to'rtta atom turi mavjud: ularning ba'zilari 000 panjara tugunlarida, ikkinchisi  $1/2, 1/2, 0, 1/2, 0, 1/2, 0, 1/2, 1/2$ , da yotadi. Formulaga bazis koordinatalarini struktura omiliga uchun qo'yib quyidagiga erishamiz:

$$F^2 = \Phi^2 [1 + \cos \pi (H + K) + \cos \pi (H + L) + \cos \pi (K + L)]^2 \quad (6.27)$$

Ko'rinib turibdiki, agar  $(hkl)$  aralashtirilgan bo'lsa, ya'ni aks etish indeksida juft va toq koeffitsient mavjud bo'lsa, unda strukturaviy omil nolga aylanadi va difraktsiya maksimal miqdori yo'qoladi. Shunday qilib, YOMK panjara blokida 111, 200, 220, 311 indikslar aks ettiriladi va indikslar 100, 110, 210, 211 va boshqalar aks etmaydi.

Yuqoridagi misollardan shuni aniq aytish kerakki, strukturaviy omilni hisoblashda faqat atomlarning asosiy koordinatalari va atomlarning tarqalish kuchi

hisobga olinadi. Strukturaviy omil birlik yacheykaning hajmiga va shakliga bog'liq emas. Difraktsion tasvirdagi maksimal miqdordagi reflekslar primitiv panjarali moddalarga ega bo'ladi. Atomlarni joylashtirishga bog'liq bo'lgan qo'shimcha reflekslarning paydo bo'lishi mumkin emas. qo'shimcha simmetriya elementlarining mavjudligi ularning yo'qolishi (to'liq yoki to'liq bo'lmagan) tufayli reflekslarning sonini kamaytiradi.

Ayrim hollarda rentgenogrammada qo'shimcha reflekslar paydo bo'lishi mumkin. Misol uchun, qotishmalarda superstrukturlarning hosil bo'lishida qattiq eritma buyurtma berilganda, panjara usti hosil qilish bilan bog'liq "qo'shimcha" aks ettirish tekisligi paydo bo'ladi. Bundan tashqari, qo'shimcha maksimumlarni paydo bo'lishiga moddada kovalent kimyoviy bog'lanishlar olib kelishi mumkin. Ma'lumki, atomlarning elektron bulutlarini bir-biriga qo'shib qo'yishi natijasida kovalent kimyoviy birikma hosil bo'ladi, ya'ni atomlar orasidagi elektronlar zichligi ortib boruvchi zonaning paydo bo'lishiga olib keladi. Ba'zi hollarda ushbu hududlarda «qo'shimcha reflekslar» shakllanishi bilan rentgen nurlari difraktsiyasi ham yuz beradi. Kimyoviy birikmalarning kovalentligi bilan bog'liq bunday maksimum ko'rinishi, masalan, olmosda kuzatilgan.

### **Atom ko'paytirgichi**

Bu omil atomlarning atom rentgen strukturaviy taqlilida ishlatiladigan rentgen nurlanishining uzunligi bilan mutanosibligi borligi bilan bog'liq. Natijada, atomning elektron bulutining turli qismlari tomonidan tarqalgan to'lqinlar fazada bir-biridan farq qiladi va shuning uchun bir-birini siqib chiqadi. Natijada, atom tomonidan tarqalgan to'lqinning amplitudasi har doim atomning elektronlari tomonidan tarqalgan to'lqinlarning amplitudalari yig'indisidan kamroqdir.

### **Haroratning ko'paytmasi**

Chunki atomlarning elektronlari doimiy termik harakatda va moddaning atomlari va molekulalari bilan birga umumiy intensivlikni aks ettirilishini pasayishiga olib keladi. haroratning yanada oshishi ham intensivlikni aks ettirilishini kamaytiradi.

### **Lorents ko'paytirgichi**

Interferentsiya funktsiyasi (6.21) ifodasi  $10^{-5}$  sm gacha bo'lgan kristallar uchun amal qiladi. Aslida rentgen strukturaviy tahlillari juda katta hajmdagi kristallar bilan ishlanadi. Biroq, haqiqiy kristallar har doim mozaikdir, ya'ni ular bir-biriga nisbatan kichik burchakka uchragan bloklardan tashkil topgan. Tadqiqotlar shuni ko'rsatdiki, haqiqiy mozaik kristall faqat Bregg burchagida emas, balki ma'lum bir burchakka diapazonda tarqaladi  $[\theta - \delta; \theta + \delta]$ . Bunday Vulf-

Bregg qoidasidan chetga chiqish kristallning moslashuvchanligi, rentgen nurlarining monoxromatiklikdan chetlanishi va kristalldagi rentgen nurlarning sinishi tufayli sodir bo'ladi.

### **Yutilish omil**

Rentgen nurlanishi modda tomonidan yutilishi bilan bog'langan, bu ham aks etish intensivligini pasayishiga olib keladi.

### **6.2. Rentgen apparatlari. Rentgen nurlarini qayd etish va uning intensivlikni o'lchash**

Rentgen nurlarini qayd etish uchun ionlash, fotografik, elektrofotografik va luminesants usullari qo'llaniladi.

Ionlash uslubi rentgen nurlarining intensivligini o'lchash chiziqli bilan chegaralangan nisbatan kichik hududda o'lchash imkonini beradi. Bu usul hozirgi vaqtda rentgen-nurlarini difraktsion tahlil qilish va rentgen tekshiruvlarida ham keng qo'llaniladi. Usulning asosiy ustunligi shundaki, u sizning intensivliklaring aniq nisbati va difraktsiya maksimumining profilini, ya'ni aslida, eng aniq eksperimental natijalarni olish imkonini beradi. Usul rentgen nurlarining o'tishi davomida gaz molekularining ionlash fenomeniga asoslangan.

Elektr maydonini jadallik bilan bosqichma-bosqich oshirib, tekis, bir kondensatorso qasidagazni ionlash jarayonini ko'rib chiqamiz. U kondensator plitalari orasidagi potentsial farqi. Kondensator plitalari orasidagi potentsial farq  $U$  tomonidan aniqlangan maydon kuchlanishini oshirish bilan (6.16-rasm), ionlarning tezligi ortadi va rekombinatsiyasiz tegishli elektrodning ioniga erishish ehtimoli ortadi, bu esa elektrondagi elektr tokining paydo bo'lishiga olib keladi.  $U_2$  rekombinatsiyalanishi ahamiyatsiz bo'lganda, ionlash oqimi to'yinganlikni oshiradi. Shunga mos ravishda,  $U_1$  va  $U_2$  o'rtasidagi oblastga to'yingan oblast deyiladi.  $U_1 > U_2$  kuchlanishlarida, ionning tezligi gaz molekularining ionlashishi uchun bir-biriga zid ravishda (zararli ionlanish boshlanadi) etarli bo'ladi. Shu bilan birga tok gaz deb ataladigan kuchlanish tufayli, kuchlanishning oshishi bilan chiziqli ravishda o'sib boradi. Gaz kuchaytirish koeffitsienti  $10^2 \dots 10^4$  bo'lishi mumkin.

$U_2$  va  $U_3$  oraligidagi oblast to'liq proportsionallik oblasti deb ataladi.  $U > U_3$  mutanosibatda proportsionallik buziladi. Nihoyat,  $U > U_4$  uchun, fotonning kamida bitta ion juftini hosil qilish uchun etarli bo'lgan energiyaga ega bo'lgan elektrodlar orasidagi o'tishda, kuchli razryad paydo bo'ladi. Bu oblast teng impulsar oblasti deb ataladi, ya'ni turli energetik ionlashtiruvchi zarralar o'tishi bir xil tok impulsari paydo bo'lishiga mos keladi. Kuchlanishning yana ortishi mustaqil

razryadni paydo bo'lishiga olib keladi, ya'ni kondensatorni ishdan chiqishiga olib keladi.

Shunday qilib, rentgen nurlarining ionlashtiruvchi ta'siri ularni qayd etish uchun ishlatiladi. Bu holda, gazning turli oblastlarida ishlaydigan qurilmalar qo'llaniladi:

**1. Ionlash kameralari.** To'yinish rejimida ishlaydi. Tok to'yinganligi elektrodning shakliga, ular orasidagi masofaga bog'liq va vaqt birligida hosil bo'lgan ionlar soniga qarab белгиланади:  $i_{нас} = eN_i$ . Shunday qilib, ionlash tokining kattaligini o'lchab, rentgen nurlanishining intensivligini aniqlash mumkin. Bunday qurilma sxemasi 6.17,a -rasmida ko'rsatilgan. Kamera korpusidan ajratilgan uchta elektrodga ega bo'lib, ular sterjen shaklida tayyorlangan. Ulardan biri o'lchovchi (A) va ikkita himoya (V). O'lchovchi elektrodi kondensator vazifasini bajaradi va o'lchash qurilmasiga ulanadi. himoya elektrodleri elektr maydonlarining bir xilligini ta'minlaydi va o'lchash elektrodleri chegarasida chekka ta'sirini yo'qotadi. O'lchanadigan tutam tirqish  $F_1$  orqali o'tadi va kameraning o'qi tomon yo'naltiriladi. O'lchov elektrodleri va kamera tanasi ilgari aytib o'tilgan kondensatoridir. Ionlash toki nurlanish intensivligiga proportsional bo'lgan o'lchash электродида пайдобо'ladi. Korpus odatda latundan tayyorlanadi va fon nurlanishidan himoyalalanish uchun tashqaridan qo'rg'oshin qoplanadi.

**2.Proportsional hisoblagichlar.**Proportsional hisoblagichlar to'liq mutanosiblik sohasida ishlaydi. Bunday qurilma sxemasi 6.17,b-rasmida ko'rsatilgan. qurilma korpusi duralumin bo'lib, u katoddir. Anod ingichka volfram sim shaklida tayyorlanadi, unga taxminan 2 kVt quvvat beriladi. Ishlash vaqtida taymer argon-metan aralashmasi bilan to'ldiriladi. Kirish va chiqish oynalari katodning yon yuzasida joylashgan.

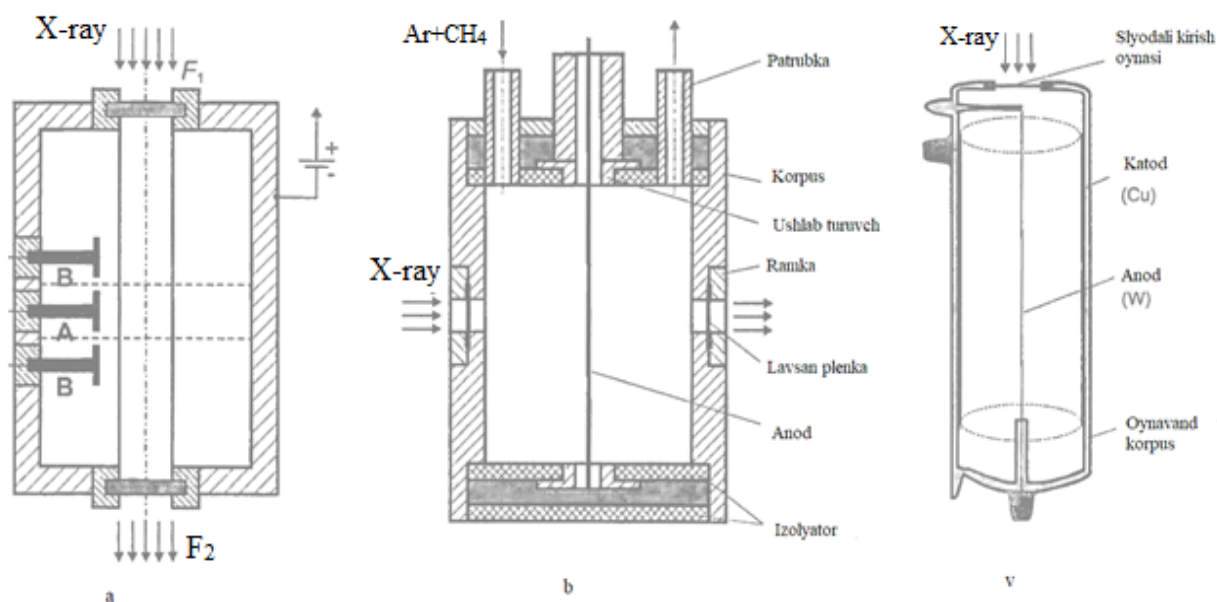
Yuqorida aytib o'tilganidek, proportsional hisoblagichlar gazni kuchaytirish sharoitida ishlaydi. Kvant ionlashtiruvchi nurlanish ularga kirib qolganda, bu kvant energiyasiga proportsional bo'lgan elektrodlerde impuls paydo bo'ladi. Diskriminatorlardan foydalanib biz ma'lum bir energiya bilan kvantga mos keladigan impulslarni ajratib chiqarish mumkin, masalan, rentgen  $K\alpha$  liniyalarini.

Proportsional hisoblagichlar sezgirliги juda yuqori. Shunday qilib, ular yordamida berilliydan boshlab engil elementlarning xarakterli nurlanishlarini qayd etishimiz mumkin.

**3. Geyger hisoblagichlar.** Ushbu qurilmalar teng impulslar sohasida ishlaydi (Geyger oblasti). Geyger hisoblagichi 6.17,b-rasmida ko'rsatilgan. Elektrodlar orasidagi ma'lum bir kuchlanishda, ionlash tokining impulslarining amplitudasi doimiy qiymatga etadi va ionlashtiruvchi zarrachalar turiga bog'liq emas. Ushbu ishlash rejimi, yuqorida aytib o'tilganidek, teng impuls zo'riqish oblasti deb nomlanadi. Agar kvantli nurlanish kvant hisoblagichga tushsa, elektron ko'chki

paydo bo'lib, ionizatsiya oqimining paydo bo'lishiga olib keladi. Geyger hisoblagichlarining samaradorligi koeffitsient bilan birgalikda o'qiladigan kvant sonining hisoblagichdan o'tgan kvant soniga nisbati bilan belgilanadi. Odatda gaz-to'ldirgich sifatida kuchli yutuvchi noyoba gazlari - argon, kripton, ksenon kabilar ishlatiladi.

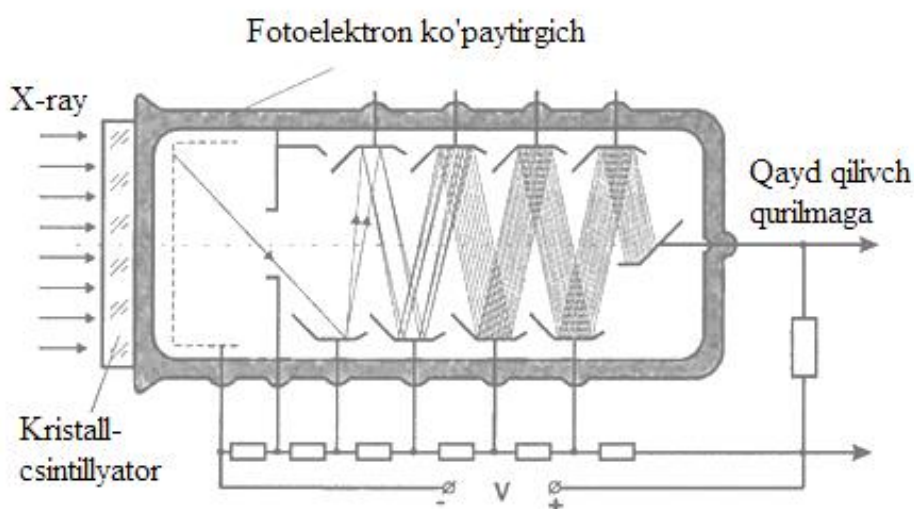
**4. Sintillash hisoblagichlari.** Eng keng tarqalgan va murakkab vositalardir. Ushbu kurilma sxema 6.18-rasmda ko'rsatilgan. Sintillashni hisoblash- shaffof luminesants kristalli (sintillator) va fotomultiplier naychadan (PMT) iborat. Sintillator sifatida taliyning kichik aralashmalari bilan NaI yoki KI monokristallari qo'llaniladi. Kristallga tushgan rentgen nurlari kvanti kristallni harakatga keltiradigan fotoelektrni chiqarib oladi, uning yo'lidagi atomlarni ionlashtiradi, tezlikni yo'qotadi. qo'zg'algan atomlar nurlanadi, ko'rinadigan kvantlar yoki ultrabinafsha nurlarini chiqaradi. Bir kvant nurlanishi o'zidan bir necha yuz fotonni chaqmoqini paydo qiladi. Fotoko'paytirgich katodiga tushgan chaqmoq, undan fotoelektronlarni urib chiqaradi, keyinchalik FEU ko'payadi va chiqishda impulsi tokini chaqiradi, u o'z navbatida yuklanish qarshiligida impuls kuchlanishini keltirib chiqaradi. Sintillashtirish hisoblagichlarining xususiyati - zarracha energiyasi va hisoblagichning chiqishida kuchlanish impulsining amplitudasi, ya'ni amplituda analizatorlaridan foydalangan holda, kvantdan ma'lum energiyadan impulslarni chiqarib olishdan iborat.



6.17-rasm. Rentgen nurlarini qayd etuvchi asboblari:

a- ionli kamera; b-proportsional hisoblagich; v- Geyger hisoblagichi

**5. Yarim o'tkazuvchi hisoblagichlar.** Yarim o'tkazgichli tranzistorlar triod chiroqlarning analoglari bo'lgani uchun, yarim o'tkazgich hisoblagichlari proportsional hisoblagichlarga o'xshaydi. Zaryadlovchilarning roli elektronlar va teshiklar o'ynaydi, nurlanishlarning kvant miqdori hisoblagichga p-n-o'tish orqali amalga oshiriladi. Bunday hisoblagichlarning amplitudali o'lchamlari proportsionallarga qaraganda taxminan 5 baravar yaxshiroqdir. hisoblagichlar magnit maydonga nisbatan sezgir emas. hisoblagichlarning kamchiliklari orasida katta miqdorda nurlanish yig'ish xususiyatlarining o'zgarishi va past haroratlarda ishlash zarurligi ham mavjud.



6.18-rasm. Stsintillyatsion hisoblagich qurilmasining sxemasi

**Surat uslubi** kino yoki fotografik qog'ozga rentgenogrammalarni tushirishga asoslangan. Maxsus juda nozik yuqori sezgirlikdagi plenkalardan foydalaniladi.

**Elektrofotografik** usulkserografiyaga asoslangan. Rentgendefektoskopiya asosan ishlatiladi.

**Luminesants usuli** rentgenogrammalarni lyuminafor qatlami bilan qoplangan eranlarda vizual kuzatish hisoblanadi. Bu usul shuningdek, intensivlikni miqdoriy o'lchash uchun ham foydalaniladi. Asosan defektoskopiya ishlatiladi.

Rossiyada rentgen analiz uchun asboblari ishlab chiqaradigan korxona - "Burevesnik" ilmiy-ishlab chiqarish birlashmasi (Sankt-Peterburg). Mahsulotlarining namunasi sifatida DRON-4-13 umumiy maqsadlar uchun difraktometrlar (6.19-rasm) yuqori aniqlikdagi va tezkor ekspluatatsiyaga qaratilgan. Ushbu qurilmada quyidagi ishlar bajarilishi mumkin:

- materiallarning sifat jihatlari va miqdoriy tahlillari;
- kristallitning o'lchamlarini aniqlash;
- makro va mikrokuchlanishlarni aniqlash;
- teksturalarni tahlil qilish;

- materialning doimiy kristall strukturasi va elementar yacheyka hajmini aniqlash.



6.19-rasm. Umumiy foydalanishdagi rentgen difraktometri DRON-4-13

Zamonaviy qurilmalar radiograflar hisobini avtomatlashtirish imkonini beruvchi kompyuter bilan jihozlangan.

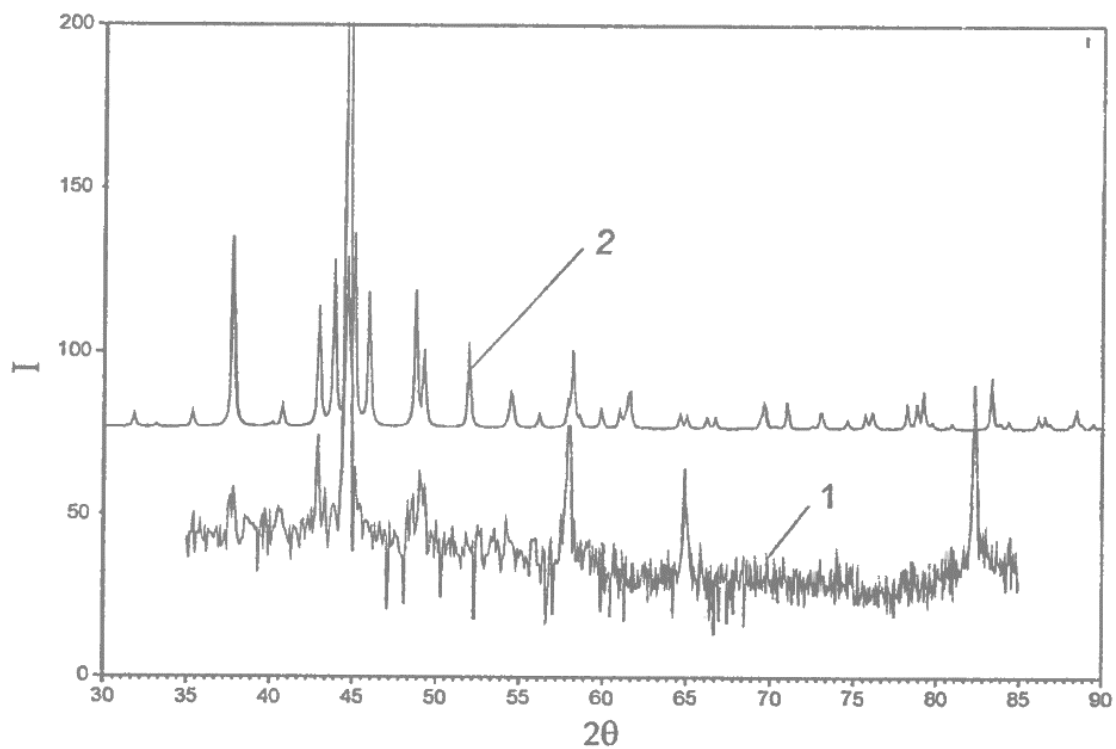
### 6.3. Rentgenogrammalarning ko'rsatkichlari

Bir difraktsiya tasvirni qayd etishning ionlash usuli yordamida olingan odatda, bir difraktsiya tasviri 6.20-rasmda ko'rsatilgan. Difraktsion tasvirlarni qayd etishda qo'llaniladigan asboblardiffraktometrlar deb ataladi.

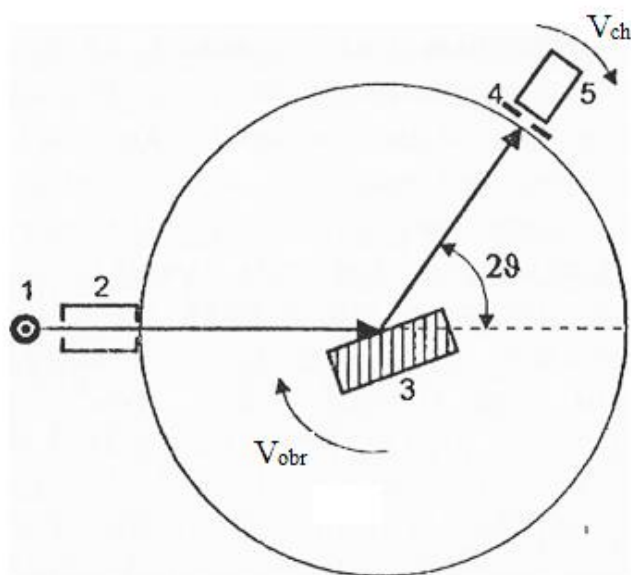
Umumiy maqsadlar uchun standart diffraktometrlar bo'yicha, tadqiqot Bregg-Brentano sxemasiga muvofiq o'tkaziladi (6.21-rasm). Yassi namunali 3 rentgen nurlarining ajraladigan tutami bilan nurlanadi. Namuna monolitik yoki kukunning bir qismi bo'lishi mumkin. Namuna 3 va detektor 5 gonometrning umumiy vertikal o'qi atrofida gorizontalktekislikda vektorli tezlik ko'rsatkichi

$V_{cy}=2V_{o\delta p}$  bilan avtomatik ravishda aylanadi. Bu holda detektor difraktsion tasvirning intensivligini ketma-ketlikda aks etadigan turli burchaklarda o'lchaydi. Detektor o'qishlari gonometrning aylanish burchaklari oldindan belgilangan diapazonda qayd etiladi va detektorning aylanishi bilan bir vaqtda harakat qiladi. Natijada, difraktogramming o'zgarishi - bu difraktsion tasvirning intensivligi qarama-qarshi tomonga bog'liqligini ko'rsatadi(6.22-pacm).

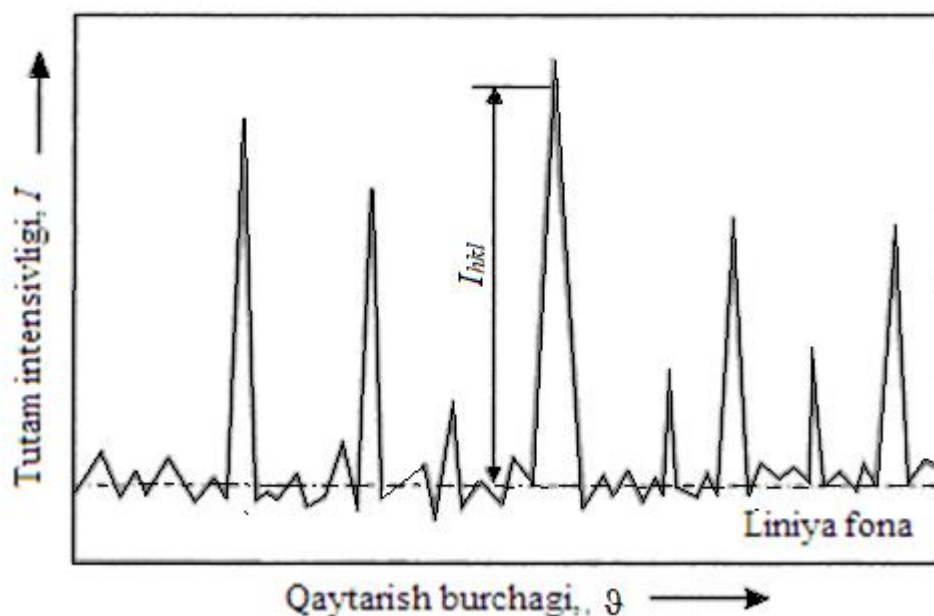




6.20-rasm. Evtektoidgacha bo'lgan namuna eksperimental difraktogrammasi (1) va sementitni teoretik difraktogrammasi (2)



6.21-pasm. Rentgen difraktometrining sxemasi:  
1-rentgen trubka fokusi; 2- kalibrlovchi tirqish; 3-namuna;  
4-detektor tirqishi; 5-detektor



6.22-Difraktogrammaning umumiy ko'rinishi

Rentgenogramma bo'yicha har bir pik - interplyar masofa  $d$  bilan bir nechta tekisliklardan ( $hkl$ )  $n$ - tartibining aksi. Vulf-Bregg tenglamasiga ko'ra, interplanarmasofa  $d_{hkl}$  mo'q keladigan difraktogramma pikidagi tepalikning holati  $n$  burchagi va radiatsiya to'liqin uzunligi  $\lambda$  bilan nisbati bilan bog'liq

$$\sin\theta = n\lambda/2d, \quad (6.28)$$

$$d_{hkl} = d/n = \lambda/2\sin\theta. \quad (6.29)$$

Rentgenogramma olinadigan xarakterli nurlanishning to'liqin uzunligi ( $\lambda$ ) ma'lum miqdorga ega bo'lganligi sababli, tekisliklararo masofalarni aniqlash muammolari rentgenogrammaning barcha yo'nalishlari uchun  $n$  burchaklarni topish uchun kamayadi. har qanday burchakka  $n$  mo'q keladigan  $d_{hkl}$  tekisliklararo masofalarining qiymatlari eng keng tarqalgan nurlanish uchun o'rnatiladi. Shunday qilib, rentgenografiya difraktsion maksimumlarning xolatini ( $\theta$  yoki  $2\theta$  burchagi) va intensivligini (rentgenogrammada balandlik) ifodalaydi. Chiziqlarning nisbiy intensivligi va rentgenogrammada aniqlangan tekisliklararo masofalar moddaning rentgen xarakteristikasi deb ataladi. Xar bir kimyoviy birikmadan rentgenogrammada o'zining chiziqlar tutami tashkil topadi. Bundan tashqari, xuddi shu modda turli xil modifikatsiyalarda bo'lishi mumkin, bu esa rentgen nurlari bilan ham o'rnatiladi, ya'ni

$\alpha$  - ba  $\gamma$ -temir, masalan, turli xil rentgen xususiyatlariga egabo'ladi. Shu moddaning juda kuchli chiziqlarni reper deyiladi. Namunadagi ushbu fazaning tarkibi kamaysa, ular oxirgi yo'qoladi. Reperlar hali ham sezilarli bo'lgan

moddaning minimal miqdori o'zgarishlari faza tahlilining sezuvchanligini aniqlaydi. Sezuvchanlik ko'plab omillarga bog'liq bo'lib, ular orasida moddaning atom raqami, kristall panjaraning turi,urning to'lqin uzunligi, fon darajasi, aniqlangan faza va butun aralashmaning assimilyatsiya koeffitsientlarining nisbati qayd etiladi. Usulning sezuvchanligi, shuningdek, moddaning kristalli panjaradagi struktura qisqarishlari va nuqsonlarning mavjudligiga bog'liq. Mikrodefektlarning mavjudligi interferentsion chiziqlarining kengayishiga olib keladi va shuning uchun usulning sezgiriligini pasaytiradi, chunki surkalgan chiziqlarni aniqlash qiyinroq, keskinroqqa ko'ra.

Usulning sezuvchanligi namunalarni to'g'ri tayyorlaganda oshadi. Tasvirga olishdan avval analiz qilinadigan kukunlarni ifloslikdan kimyoviy tozalashni amalga oshirish maqsadga muvofiqdir. Po'lat va qotishmalardan tayyorlangan shliflar kimyoviy yoki elektrokimyoviy travleniya qilish namunaning sirtini karbidlar yoki intermetallar bilan boyitishga imkon beradi, chunki o'ziga yarasha travitel tanlanganda matritsa eriydi va ikkinchi fazaning zarralari holadi. har bir kimyoviy modda, masalan, qotishmada faza, o'zining kristall panjarasiga ega. Atom tekisliklarini tashkil etuvchi majmuasi, panjarani xosil qiluvchisi o'zining faqat shu panjaraga xarakterli tekisliklararo  $d_{hki}$  masofasiga ega.

Tadqiqot ob'ekting tekisliklararo masofalarini bilish, shu bilan birga, kristalli panjarani tavsiflash va ko'p hollarda modda yoki fazani aniqlash imkonini beradi. Turli moddalar uchun oraliq masofalar uchun ma'lumotlar maxsus ma'lumotnomalarda mavjud.

Sifat fazasini tahlil qilish uchun ko'pincha ASTM (American Society for Testing Materials) kartotekadan yoki yanada non kartotek ICDD (International Center of Powder Diffraction) foydalaniladi. Sifat fazasini tahlil qilish uchun amerikaliklar uchun sinov materiallari (ASTM) yoki Xalqaro tozalash ditsribyutsiyasi markazi (ICDD) qo'llaniladi. ICDD kartasi fayllari ko'p sonli nashrlar shaklida va elektron ma'lumotlar bazasi ko'rinishida tarqatiladi, bu esa rentgenogrammlarni indekslash jarayonini sezilarli darajada soddalashtiradi. Kartotekaning rentgenogrammalari, odatda, har bir modda uchta kuchli chiziq bilan ajralib turadigan ko'rsatkichga ega, ulardan tekisliklararo masofa  $d_1$ - chiziqi eng qizg'in,  $d_2$ -chizig'i ikkinchi,  $d_3$ -chizig'i uchinchi intensivlikdir. Kartotekadagi kartalar muayyan oraliq masofa bilan tavsiflangan guruhlariga muvofiq joylashgan.

Har bir guruhda, masalan,  $d_1=2.29...2.25\text{\AA}$ , guruhlari kartalar  $d_2$  qiymatining pastligi bilan kichik guruhlariga ajratilgan. Agar ma'lum bir kichik guruhdagi bir necha moddalar bir xil  $d_2$  qiymatiga ega bo'lsa, kartalar kamayib boradigan  $d_3$  qiymatiga qarab ajratiladi. Shunday qilib, ko'p hollarda bir fazali materialni aniqlash uchun rentgenogrammaning mos yozuvlar bosqichlariga mos keladigan

| 48-501 ★                                                                                                                                                                                                              |     |      |        |     |      |      |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|------|--------|-----|------|------|
| <b>Ca<sub>0.55</sub>Al<sub>11</sub>O<sub>17.05</sub></b><br>Calcium Aluminum Oxide                                                                                                                                    |     |      |        |     |      |      |
| <b>Rad. λ Filter d-sp Guinier</b><br><b>Cut off Int. Densitometer Ilcor. Ref.</b><br>Van Hoek, J. et al. <i>Solid State Ionics</i> , 45 93 (1991)                                                                     |     |      |        |     |      |      |
| <b>Sys. Hexagonal S.G. P6 /mmc(194)<sub>3</sub></b><br><b>a 5.5902 b 22.455 c A C 4.0169</b><br><b>α β γ Z 2 mp</b><br><b>Ref. Ibid.</b><br><b>D<sub>x</sub> 3.233 D<sub>m</sub> SS/FOM F30=82(.009,43)</b>           |     |      |        |     |      |      |
| Integrated intensities. Sodium β-alumina crystals were treated in a CaCl <sub>2</sub> melt for periods of 15 minutes at 900 °C. The ratio of salt to β-alumina was 10:1. Also called: calcium β-alumina. PSC: hP57.20 |     |      |        |     |      |      |
| dA                                                                                                                                                                                                                    | Int | HKL  | dA     | Int | HKL  |      |
| 11.26                                                                                                                                                                                                                 | 100 | 002  | 1.824  | 2   | 002  | 121  |
| 5.61                                                                                                                                                                                                                  | 50  | 004  | 1.8058 | 1   | 004  | 122  |
| 4.84                                                                                                                                                                                                                  | 1   | 010  | 1.7778 | 1   | 010  | 123  |
| 4.73                                                                                                                                                                                                                  | 2   | 011  | 1.7509 | 1   | 011  | 1110 |
| 4.44                                                                                                                                                                                                                  | 30  | 012  | 1.6459 | 6   | 012  | 0210 |
| 4.06                                                                                                                                                                                                                  | 10  | 013  | 1.6265 | 2   | 013  | 0113 |
| 3.664                                                                                                                                                                                                                 | 5   | 014  | 1.6138 | 3   | 014  | 030  |
| 2.96                                                                                                                                                                                                                  | 2   | 016  | 1.604  | 3   | 016  | 0014 |
| 2.807                                                                                                                                                                                                                 | 5   | 008  | 1.5975 | 1   | 008  | 032  |
| 2.795                                                                                                                                                                                                                 | 25  | 110  | 1.5895 | 30  | 110  | 127  |
| 2.711                                                                                                                                                                                                                 | 2   | 112  | 1.5605 | 18  | 112  | 0211 |
| 2.674                                                                                                                                                                                                                 | 60  | 017  | 1.5549 | 3   | 017  | 1112 |
| 2.502                                                                                                                                                                                                                 | 50  | 114  | 1.551  | 8   | 114  | 034  |
| 2.428                                                                                                                                                                                                                 | 6   | 018  | 1.5329 | 6   | 018  | 028  |
| 2.421                                                                                                                                                                                                                 | 6   | 020  | 1.4819 | 10  | 020  | 036  |
| 2.407                                                                                                                                                                                                                 | 45  | 021  | 1.4755 | 3   | 021  | 129  |
| 2.366                                                                                                                                                                                                                 | 16  | 022  | 1.4187 | 3   | 022  | 1210 |
| 2.303                                                                                                                                                                                                                 | 2   | 023  | 1.4059 | 25  | 023  | 0213 |
| 2.246                                                                                                                                                                                                                 | 10  | 0010 | 1.3977 | 75  | 0010 | 220  |
| 2.239                                                                                                                                                                                                                 | 25  | 116  | 1.3871 | 8   | 116  | 222  |
| 2.223                                                                                                                                                                                                                 | 12  | 024  | 1.3564 | 8   | 024  | 224  |
| 2.131                                                                                                                                                                                                                 | 35  | 025  | 1.3371 | 20  | 025  | 0214 |
| 2.033                                                                                                                                                                                                                 | 50  | 026  | 1.3218 | 2   | 026  | 133  |
| 1.9322                                                                                                                                                                                                                | 20  | 027  | 1.3091 | 1   | 027  | 226  |
| 1.833                                                                                                                                                                                                                 | 10  | 028  | 1.2384 | 8   | 028  | 137  |

6.23-rasm. ICDD baza ma'lumotlar kartochkasi

tekisliklararo masofalarni aniqlash kifoya. Odatda, ICDD karta fayli 6.23-rasmda keltirilgan.

Agar namunada bir nechta kimyoviy birikmalar mavjud bo'lsa, masalan, ko'p fazli qotishmalarni o'rganishda tahlil yanada murakkablashadi. Ko'p fazali tizimning rentgenogrammasi alohida fazalardagi rentgenogrammalarning superpozitsiyasining natijasidir, bu tizimda bosqichning miqdori bilan proporsional yiqilish intensivligi.

Fazalarni analitik ravishda ajratishdan oldin, oldin rentgenogrammani diqqat bilan o'rganish tavsiya etiladi. Bu holatda, chiziqlar tartibini, ularning kengligini, intensivligini va davomiyligini tahlil qilish orqali fazalarni vizual ravishda ajratishga harakat qilish kerak. Shunday qilib, hajmi markazlashgan kubik faza (K8) rentgenogrammasi bir-biridan taxminan bir xil masofada joylashgan interferentsiya maksima bilan xarakterlanadi, faza YoMK-panjara (K12) - interferentsiya maksimumi bilan bo'linmalar rentgenogrammasi alohida-alohida juftlar va alohida ravishda turadi. Siz chiziqning pozitsiyasiga ham e'tibor berishingiz kerak. Bundan tashqari, birinchi qatorlarning difraktsiya burchagi qanchalik kichik bo'lsa, elementar yacheyka kattaroq va tizimning ushbu fazasining simmetriyasidan pastroq bo'ladi. Interferentsiyaning maksimalligi tabiatni ajratish jarayoniga yordam beradi. Keskin maksimal o'rtacha o'lchamdagi mozaik bloklarga mos kelishi ma'lum. Katta blokli agregatlar nuqta, kichik blok - keng, yo'naltirilgan - nosimmetrik intervalgacha maksimallikni beradi.

### **NAZORAT SAVOLLARL:**

1. X-rayning tabiati va xususiyatlari qanday?
2. Uzluksiz radiatsiya rentgen apparatlarining umumiy qurilmasi.
3. Qurilma va x-ray chiroq uzluksiz nurlanish operatsiya.
4. X-ray impulslarining umumiy qurilmasi.
5. X-nurlari puls nurlanishining apparati va ishlashi.
6. Radiografik nazorat ostida markazlashtirilgan masofa nima?
7. Radiografik nazoratning asosiy parametrlari qanday?
8. Vulf-Bregg qonuni qanday?
9. Vulf-Bregg formulasini ayting.
10. LAUE nisbati nima?
11. Atomlar tomonida rentgen nurlari qanday singdiriladi?
12. Uzluksiz radiatsiya apparatida ta'sir qilish vaqtini qanday aniqlash mumkin.
13. Pulse nazorat qilish parametrlari qanday?
14. Kuchaytiruvchi ekranlarning harakati nima?
15. Rentgenografiya nazorati ketma-ketligi.

## 7-BOB. RENTGENOSPEKTRAL MIKROANALIZ

Zamonaviy materialshunoslikda qo'llaniladigan ko'plab analitik usullar orasida maxsus joy rentgen mikroanalizining usuli bilan ishqol qilinadi [3,15,23]. hozirgi kunda u o'zining o'ziga xos xususiyatlaridan kelib chiqqan holda keng foydalanishga erishdi. Eng muqimi, usulning yuqori joyidir, kichik hajmdagi materiallarni samarali o'rganish qobiliyati. Bunday vazifalar zamonaviy materialshunoslikka xosdir. Rentgenspektral mikroanaliz usullari (RMA) turli qotishmalarni o'rganish, ajratmalarning alohida turlarini o'rganish va alohida dona yuzasida kimyoviy elementlarning taqsimlanishini baholashga imkon beradi. hozirgi vaqtda ushbu uslub tribologiya, qoplama jarayonlarini o'rganish, kukunli kompozitsiyalarni yaratish, qatlamli va tolali kompozitsion materiallarni ishlatishda qo'llaniladi. Ushbu usul kimyoviy elementlarning taqsimlanish xususiyatini har qanday yo'nalishda tahlil qilingan ob'ektning ma'lum bir joyida tezkor va aniq baholash imkonini beradi.

Adabiyotlarda topilgan «elektron zondli mikroanalizatorlar», «elektron mikroskop» yoki «elektron zond» atamaları 0,1-0,3 mm gacha diametrli qattiq namunadagi sirdagi rentgenospektr analizi uchun mo'ljallangan asboblarni ko'rsatish uchun ishlatiladi.

Elektron zond mikroanalizatorlarni yaratish rentgen spektroskopiyasi va elektron optikasida texnik o'zgarishlar sintezi natijasida yuzaga keldi [3,23]. 30-yillarda elektron optikasining rivojlanishi elektronli mikroskoplarning yaratilishiga olib keldi va bu erda elektron nuri tor zondaga qaratildi. Elektron zond mikroanalizi 1947 yilda AQShda patentlangan edi. Birinchi sanoat korxonasi 1958 yilda frantsiyalik «KAMESA» kompaniyasi tomonidan yaratilgan. Keyinchalik, 1960 yilda, «Kembrij Instrument» kompaniyasi namunadagi elementlarning taqsimlanishini tasvirlash uchun elektron zond bilan namunaning sirtini skanerlash uchun tizim bilan mikroanalizatorning loyihasini ishlab chiqdi.

Rentgenospektral mikroanaliz usuli  $\pm 0,001...0,1\%$  oraliqida  $\pm 2...5\%$  sezgirlik bilan xarakterlanadi. Tadqiqot uchun materialning mikrovollari 0,5-0,5 mm va chuqurlikdagi 0,1...5mm bo'lishi mumkin. Zamonaviy mikroanalizatorlar uzunligi 6,548 nm dan 0,06 nm gacha bo'lgan to'lqinlarni baholashga imkon beradi. Ushbu oraliq *K*-seriyali elementlarning bordan molibdenga (*Z* 5 dan 42 gacha) va *L*-seriyasidan ruxdandan urangacha (*Z* 30 dan 92 gacha) chiqaradigan emissiyalarni o'z ichiga oladi [1].

Materiallarning rentgenospektral tahlillari ob'ekt elektron nurlari yoki qattiq rentgen nurlari bilan bombardimon qilinganida xarakterli rentgen nurlarini yozish va tahlil qilishga asoslangan bo'lishi mumkin. Rentgen nurlarini asosiy nur sifatida ishlatishga asoslangan usul fluorestsentli rentgenologik tahlil usuli deb ataldi.

Texnik asboblarning murakkabligi tufayli, bu usul hozir juda kam qo'llaniladi. Ko'pincha elektron nurlarining asosiy nurlanishi sifatida foydalanishga asoslangan rentgen mikroanaliz usuli qo'llaniladi. Ushbu usulning yana bir nomi elektron zond usuli hisoblanadi (elektron zondli mikroanaliz).

Elektron zondli tekshirish uslubining joylashish darajasi ob'ektga tushadigan elektron nurning parametrlariga bog'liq. Ob'ektni bombardimon qilishda elektron nurni ta'sirida bir nechta hodisa ro'y beradi. Bu hodisalarning tahlili ikkilamchi va aks ettirilgan elektronlarni, xarakterli va tormozlangan nurlanish, elektronlarni yutish, OJE- elektronlar, ultrabinafsha, ko'rinadigan va infra qizil nurlanishni qayd etishdan kelib chiqadi. Belgilangan signallarning manbalari o'rganilayotgan ob'ektning ayrim sohalari. Bu maydonlarning o'lchami elektron nurlari energiyasiga va tahlil qilingan kimyoviy elementning atom soniga bog'liq. Nurlanish hududning o'lchami rentgen mikroanalizatorining hal qilish imkoniyatini aniqlaydi.

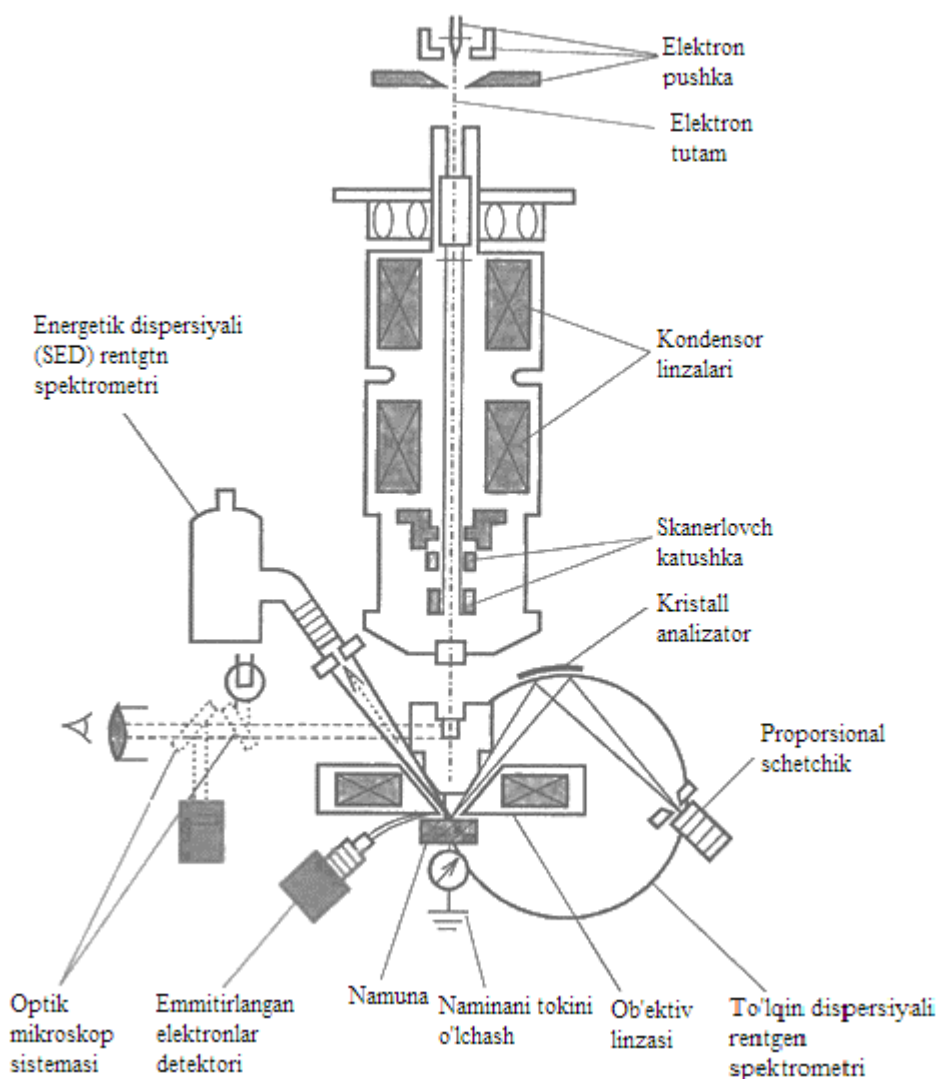
Rentgen mikroanaliz usulini qo'llashda emissiya rentgen spektrlarini ro'yxatdan o'tkazish va tahlil qilish kerak. Rentgenli emissiya liniyalari «xarakterli» deb ataladi, chunki chiziqli to'lqin uzunligi atomlar bu liniyani chiqaradigan kimyoviy elementni xarakterlaydi. Atomning ichki elektronlari emissiyaga olib keladigan o'tish jarayonida ishtirok etganligi uchun rentgen chiziqlarining to'lqin uzunligi deyarli ob'ektning fizik yoki kimyoviy holatiga bog'liq emas [2-3].

Atomlarning ichki energetik darajalari orasidagi elektron o'tishda rentgen nurlari liniyalari paydo bo'ladi. har qanday bunday o'tish, agar ichki bo'shliq ichki yoki boshqa darajada yaratilgan bo'lsa, ya'ni ichki qobiqlarning elektronlaridan biri atomdan tashqarida chiqarilsa sodir bo'ladi. Atomlarning ichki elektron qobiqlari elektronlar va rentgen nurlari bilan ushbu tirqishning «kritik energiyani uyg'onishi» Es yuqori energiya bilan ionlashtirilishi mumkin. Es qiymati, elektronning ichki darajasidan atomning birinchi bo'shatilgan darajasiga qadar ko'tarilishi uchun sarflanadigan energiyaga tengdir. Amalda spektr kristalli spektrometrlar yoki energiyadispers detektorlari tomonidan qayd etiladi.

Rentgen mikroanalizatorining diagrammasi 7.1-rasmda keltirilgan. qurilmaning asosiy qismlari elektron-optik sxema (elektromagnit pushka, elektromagnit linzalar, elektron nurni fokuslovchi), rentgen spektrometrlari, yoruqlik mikroskopi (masalan namunani tanlash uchun).

Elektronlarning manbai bo'lib, V-tipidagi volfram katodli elektron pushka xizmat qiladi. Intensiv termoelektron emissiya olish uchun katod elektr toki bilan 2700 K haroratgacha qizdiriladi. Katodga manfiy (10...30 keV) potentsial uzatiladi. Tezlashtirilgan maydonda elektronlar erga ulangan anod plastina orasidagi teshikdan o'tadi. Elektromagnit linzalardan foydalangan holda, elektron nurlari

o'rganilayotgan namunadagi sirt ustida tor zondga fokuslanadi. Elektronlar qizdirish



7.1-rasm. Rentgen mikroanalizator sxemasi

cho'lg'amidan to namunagacha bo'lgan masofani elektronlar tarqalib ketmasligi va volfram simni oksidlanmasligi uchun yuqori vakuumda bosib o'tadi.

Elektron manbaining samarali diametri  $\sim 100$  mikrondir. Elektron-optik tizim namuna sirtidagi manba tasvirini qisqartiradi, bir necha yuz marta kamaytiradi, odatda ikkita linza tizimi yordamida olinadi.

Zondni skanerlash tizimi namunaga muvofiq, trubka ekranda elementning taqsimlanishini tasvirlaydi. Elektron zondni og'dirish arrasimon tebranishlar generatoridan energiya oluvchi elektromagnit katushkalar yordamida amalga oshiriladi.

Mikrotaxlil usulining sezgirliги asosan xarakterli rentgen-nurlarini yozish tizimiga bog'liq. Zamonaviy asbob-uskunalar ikkita asosiy rentgen spektrometrlari



bilan jihozlangan. To'liqlarni dispersiyalash spektrometri (TDS) o'rganilayotgan ob'ekt tomonidan ishlab chiqarilgan xarakterli rentgen nurlanishining to'liq uzunligini o'lchashga asoslangan. Energiya dispersiya spektrometri (EDS) rentgen energiyasini nazorat qiladi. Bu spektrometrlarning individual xususiyatlari har xil (7.1-jadval) [15].

Mikrorentgenanalizatorlarda bir birini to'ldiruvchi ikki analizatorlar qam qo'llaniladi. Mikrotaxlil kimyoviy elementlarning turli darajalari aniq aniqlanishi bilan amalga oshirilishi mumkin. Ba'zi hollarda sifat tahlil etarli bo'lib, qanday element mavjudligi yoki yo'qligi faktini aniqlash kifoyadir. Kristalli-analizator barcha diapazonlarida harakat qilib burchaklarining aks ettishin xarakterli rentgen nurlanishini spektrga yoyadi. To'liq uzunligini intensivlik piklarini bilgan xolda, olingan spektrogramlarda ob'ektning elementlar tarkibi aniqlanadi.

Yuqori sifatli mikrotaxlil shuningdek, singigan elektronlardagi ob'ektning yuzasini yoki elementining xarakterli rentgen nurlanishini o'rganish orqali amalga oshirilishi mumkin. Bu odatda energetik dispersiya spektrometrlari yordamida amalga oshiriladi.

7.1-Jadval

**Uslubda ishlatiladigan spektrometrlarning solishtirma xususiyatlari  
mikrotaxlili**

| Xarakteristikasi                          | Energiya dispersiyasi<br>spektrometrlari (TDS) | To'liq dispersiyasi<br>spektrometrlari<br>(TDS) |
|-------------------------------------------|------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| Imkoniyati, eV                            | 150                                            | 10                                              |
| Qattiq burchak, sr                        | -0,01                                          | -0,001                                          |
| Detektor samaradorligi, %                 | ~ 100 (3...15 keV uchun)                       | 30                                              |
| Engil elementlarni aniqlash<br>imkoniyati | Z=10 va ko'proq                                | Z=4 va ko'proq                                  |
| Aniqlik, %                                | 1...5                                          | 1...5                                           |
| Shovqinning shovqin darajasi              | 20... 100                                      | 200...2000                                      |
| Olingan ma'lumotlar                       | Bir vaqtda barcha<br>elementlar bo'yicha       | Davom etishi                                    |
| Taxlil davomiyligi                        | Minutlar                                       | Minutdan soatgacha                              |
| Konstruktiv bajarilganligi                | Oddiy                                          | Murakkab                                        |

Tasvir rentgen nurlari yordamida olayotganda kristall-analizator va hisoblagich avvaldan taxlil qilinadigan kimyoviy elementning xarakterli nurlanishining aks ettish burchagiga oldindan moslanadi. Katod nurlari trubkadagi elektron nurining yorqinligi tekshirilayotgan sirt tarkibidagi elementning

taqsimlanishiga bog'liqdir. Shunday qilib, tanlov ekranda tahlil qilinayotgan elementning nurida ob'ektning tasviri olinadi.

Ob'ektdagi elementning tarkibi natijada olingan tasvirdagi yorug'likning yorqinligi bilan baholanishi mumkin. Elementning yuqori tarkibi bo'lgan namunalar tasvirning yuqori yorqinligiga mos keladi. Aks etish burchagini o'zgartirib, tadqiqotchini qiziqtirayotgan yana bir elementning xarakterli nurlarda sirtini tasvirni olish mumkin. Ushbu tahlil usuli siz kimyoviy elementlarning yuzaga taqsimlanish xususiyatlarini namoyish etishi, kerakli faza qaysi fazalarni topishini aniqlash, ularning konsentratsiyasining joylarini aniqlash uchun imkon beradi. Ba'zi hollarda zondni namunadagi yo'nalishlardan birida harakatlantirish foydali bo'ladi. Etarli darajada sekin skanerlash bilan siz trubka ekranda tanlangan yo'nalishda elementning tarqatish egri chizig'ini olishingiz mumkin.

Zamonaviy qurilmalar kompyuter bilan jihozlangan va mikroanalizni etarlicha aniqlik bilan amalga oshirilishi mumkin. Tahlil qilinayotgan ob'ektdagi kimyoviy elementning konsentratsiyasi rentgen spektrining mos keladigan chizig'i intensivligi bilan aniqlanadi. Rentgenospektral chizig'ining intensivligi va elementning konsentratsiyasi murakkab tarzda nisbati namunaning tarkibiga bog'liq [2-3]. Shu sababli, elektron-zondli mikroanalizda namuna tarkibiga qarab tuzatishlar kiritiladi. Ushbu tuzatishlar yordamida, namunadagi chiziqlarning intensivligi nisbatlari va tahlil qilingan elementlarning konsentratsiyasida mos yozuvlar qayta hisoblab chiqiladi.

Agar  $C_0$  etalondagi elementning konsentratsiyasi ma'lum bo'lsa, unda «to'g'rilanmagan konsentratsiyani» hisoblash mumkin:  $C$ :

$$C = C_0 (I / I_0), \quad (7.1)$$

bu erda  $I$  va  $I_0$  namunadagi va etalondan olingan rentgen chiziqlarining intensivligi. «Matritsa effektlari»  $F$  ni tuzatish faktori yordamida hisobga olinadi. Bir namunadagi elementning haqiqiy konsentratsiya tengdir

$$C = C (F / F_0), \quad (7.2)$$

bu erda  $F_0$  —etalon uchun tuzatish kattaligini belgilaydi.

Tuzatish omillari quyidagi jarayonlarni hisobga oladi:

- namunadan chiqishda xarakterli nurlanishning yutilishi;
- xarakterli chiziqlarning intensivligi, ularning spektrining boshqa satrlari bilan, shuningdek uzluksiz spektrlarning fluorestsentik qo'zg'alishi tufayli;
- birlamchi nurlanish elektronlarining bir qismini teskari tarqalishi natijasida intensivlikni yo'qolishi;
- nishondagi elektronlarning sekinlashishi natijasida rentgen qo'zg'alish samaradorligi o'zgarishi («to'xtash kuchi» atom raqamiga bog'liq).

Barcha samaralar quyidagi omillar yordamida hisobga olinishi mumkin:  $F_a$  (absorbsiya),  $F_f$  (fluorestsentsiya),  $F_b$  (teskari soʻrilish) va  $F_s$  (modda toʻxtatish xususiyati). Jami tuzatish ushbu omillarning mahsulotiga tengdir:

$$F = F_a \cdot F_f \cdot F_b \cdot F_s, \quad (7.3)$$

Rentgenospektral tahlilni amalga oshirishda oʻlchovlarning aniqligi juda katta darajada oʻrganilayotgan ob'ektlarni sirt tayyorlash sifatiga bogʻliq. Tirnashlar va qirilgan chiqqlar tahlil qilinadigan kimyoviy elementlarning kontsentratsiyasida xatolarga olib keladi. Shuning uchun, tekshiriladigan ob'ektlarda tekis yuzalarni olish uchun jilvirlanadi va silliqilashtiriladi. Ishlov berish jarayonida oʻrganilgan narsalarning bir qismi boʻlgan kimyoviy elementlarni oʻz ichiga olgan abraziv moddalarni ishlatish mumkin emas. Ob'ektni kimyoviy travleniya qilish sirt qatlamining tarkibiy oʻzgarishlariga olib kelishi mumkin.

Shuning uchun odatda oʻrganilgan shliflarning sirtini travleniya qilishga yoʻl qoʻyilmaydi. Ayniqsa mikroanalizga gʻovak namunalarni tayyorlash qiyinchiliklarni keltirib chiqaradi, chunki abraziv zarralar teshiklarni toʻldiradi va shu bilan oʻlchash xatoligini keltirib chiqaradi. Ushbu tadqiqot usulini bajarishda, ifloslantiruvchi materiallarni teshiklardan olib tashlash muhim vazifa hisoblanadi. Tadqiqot ob'ektlari uchun zarur boʻlgan muhim talab issiqlik va elektr oʻtkazuvchanligini etarli darajada ta'minlashdir.

#### **NAZORAT SAVOLLARI:**

1. Rentgenospektral mikroanaliz usullari qanday?
2. Elektron zond mikroanalizatorlari qachon yaratildi?
3. Materiallarning rentgenospektral tahlillari nima asoslangan?
4. Elektronlarning manbai boʻlib qanday pushka xizmat qiladi
5. Rentgen mikroanalizatori qanday tuzilgan?
6. Elektron manbaining samarali diametri qancha?
7. Kristall-analizator nima uchun ishlatiladi?
8. Rentgenospektral tahlilni amalga oshirishda oʻlchovlarning aniqligi qanday?

## **8-BOB. ATOM SPEKTRAL TAHLIL QILISH**

### **8.1. Kirish**

Ma'lumki, ko'plab gidroksidi va gidroksidi metallar tuzlarining gazgorelkasi alangasiga kiritishi bilan turli xil ranglarning yorqin nurlari kuzatiladi. Bundan 100 yililgari fizik Kirxgof va kimyogar Bunzenturli metallar berilgan spektrlarni o'rganish uchun spektroskopni qo'llashgan. Ular bir xil metallning har qanday tuzini alangasiga shu metallni kiritish har doim bir xil spektrning paydo bo'lishini aniqladilar. Bir vaqtning o'zida spektrda bir nechta metall tuzlarining alanga aralashmasiga kiritilganda ularning barcha chiziqlari paydo bo'ladi. Shunday qilib, bir modda kimyoviy tarkibini aniqlashni yangi usul - spektral tahlil aniqlandi.

Kirxgof va Bunzen, har bir metall spektrining qat'iy ravishda o'zgarmasligini aniqladi. Shuning uchun, ayrim namunalardagi spektrlarning qizil va ko'k hududlarida yangi begona chiziqlarni topgach, ular noma'lum metallarning aralashmalarining mavjudligi bilan ularning tashqi ko'rinishini tushuntirdilar. Darhaqiqat, ikkita yangi gidroksidi metallarni ajratish mumkin bo'ldi. Shunday qilib, rubidiy va seziiy spektral tahlil yordamida aniqlangan.

Ulardan keyin boshqa tadqiqotchilar spektroskopik usul bilan yana to'rtta yangi elementni topdilar: talliy, indiy, galliy va geliy. quyosh spektrini o'rganishda geliy birinchi marta kashf etildi. Jami 24 ta yangi elementni ochishda bu usul ishlatilgan.

Hozirgi kunda faqat metallarni emas, balki muayyan sharoitlarda har bir elementning doimiy spektrli yoruqlik chiqarishi aniqlangan. Nurlanishning manbai neytral yoki ionlangan atomlardir. Xuddi shu elementning turli birikmalari bir xil spektrni beradi. Turli elementlarning spektridagi individual chiziqlar tasodifiy ravishda mos kelishi mumkin, lekin umuman, har bir elementning spektri uning doimiy va qat'iy individual xususiyatidir. Bu moddalarning kimyoviy tahlili uchun spektrlardan foydalanishga imkon beradi.

Spektral analizda atomlar yoki molekulalarning emissiya va yutish spektrlarini o'rganish asosida moddaning kimyoviy tarkibini tahlil qilishning fizikaviy usuli tushuniladi. Bu spektr atomlar va molekulalarning elektron qobiqining xususiyatlari, molekulalarning atom yadrolarining tebranishini va molekulalarning aylanishini, shuningdek, atom yadrolarining massa va strukturasini energiya darajalariga nisbatan ta'siri bilan belgilanadi. Bundan tashqari, ular atomlar va molekulalarning atrof-muhit bilan o'zaro ta'siriga bog'liq. Shunga ko'ra, spektral analizda rentgen nurlaridan radio to'lqinlariga keng to'lqin uzunliklar qo'llaniladi.

Atomik spektr analizi uslubiga bag'ishlangan birinchi ishlar XIX asr o'rtalarida paydo bo'lishiga qaramasdan, bu usul uzoq vaqt davomida tahlil qilingan materiallarda kimyoviy elementlarning sonini aniqlash uchun yaroqsiz

deb topildi. 1925 yildan beri V.Germax ishlari asosida miqdoriy spektral tahlillar amalga oshirildi. Rossiyada spektral tahlil usuli 1929 yilda Moskvada Butunittifoq mineral xom ashyo institutida A. K. Rusakov tomonidan amalga oshirildi. Birinchi mahalliy stiloskoplar va stilometrlar Moskva davlat universitetida ishlab chiqilgan va ishlab chiqarilgan.

## 8.2. Nurining tabiati haqida. Nurning xususiyatlari

Nurning elektromagnit to'liqin tabiatiga ega ekanligi ma'lum. Nurning xarakterli xususiyati atomlar va molekulalarning elektromagnit to'liqlarning alohida guruhlarda chiqarilishidir. To'liqlarning har bir guruhi bir-biriga tarqaladi va zarrachalarga xos xususiyatlarga ega. Mikroorganizmning boshqa zarralari bilan taqqoslaganda, u foton deyiladi. Nur turli xil moddalar bilan ta'sirlanganda, foton, albatta, zarracha kabi harakat qiladi. Misol uchun, fotonning bir qismini so'rib olish aniqlanmadi. Fotonni tashkil etuvchi to'liqlarning butun guruhi doimo butunlay so'rilib, butun energiyasini ta'minlaydi. Foton energiyasi barcha to'liqin guruhidagi elektromagnit maydonning umumiy energiyasidir. U faqatgina tebranish chastotasiga ( $\nu$ ) bog'liq:

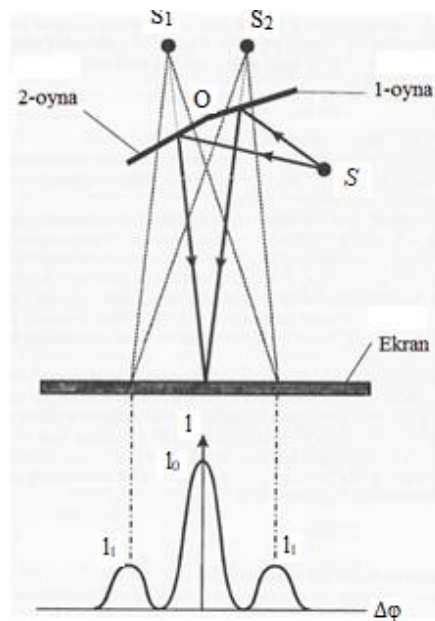
$$E = h\nu, \quad (8.1)$$

bu yerda  $h=6.62 \cdot 10^{-34}$  Дж·с -Plank doimiysi.

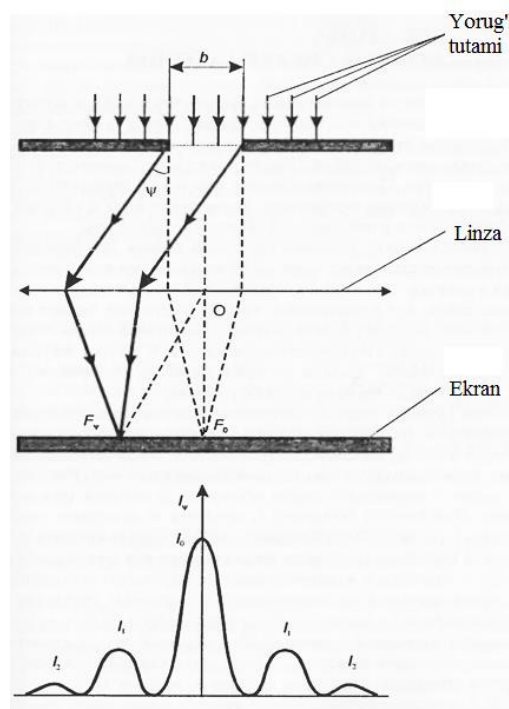
Turli fotonlar tashkil qiluvchi to'liqlar guruhlarini deyarli bir-biriga ta'sir qilmaydi, shuning uchun har bir fotonning harakati boshqalardan mustaqil ravishda hisoblanishi mumkin.

Shunday qilib, nurni o'rganayotganda, ikkala to'liqin va zarracha tushunchalari bir vaqtning o'zida ishlatiladi. Yorug'likning tarqalishi to'liqin nazariyasi asosida ko'rib chiqilishi kerak, chunki har foton to'liqlar guruhidir. Fotonning bir butun sifatida harakatlanishi to'liqlarning tarqalishi bilan to'liq aniqlanadi. Bir modda tomonidan nurning emirilishi yoki emissiya qilinishini o'rgansak, aksincha, foton energiyasi asosiy rolni o'ynaydi va yorug'lik tushunchasini zarrachalar oqimi sifatida ishlatish yaxshiroqdir.

Nurni ikki muhit chegarasiga tushishida yorug'likni sinishi va aks ettirish hodisalari ro'y beradi. qaytish oddiy qonunga amal qiladi: tushish burchagi aks ettirish burchagiga tengdir. Tushuvchi va aks etgan nurlar bir xil tekislikda yotadi. Singan nurlar ham tushgan nurlar bilan bir tekislikda yotadi. Tushish va sinish



8.1-rasm. Nur aralashuvi:  $S, S_1, S_2$  - nur manbalari;  $I$  - intensivlik



8.2-rasm. Yorug'likning tor tirqishdan o'tishi bilan farqlanadi:  
 $b$  - yaroqli kengligi;  $I$  - intensivlik

burchaklaridagi sinuslarning nisbati bu ikki muhit uchun doimiy qiymatga ega va sinishi ko'rsatgichi " $n$ " deb ataladi.

$$n = \frac{\sin i}{\sin r} \quad (8.2)$$

bunda,  $i$  - tushish burchagi,  $r$  - sinishi burchagi.

Yorug'likning muhim xususiyati uning dispersligidir - muhitdagi yoruqlik fazasining tezligi  $t$  yoki to'lqin uzunligi  $\lambda_0$  ga bog'liqligi.

Xuddi shu manbadan chiqqan ikki nur fazoda bir nuqtada uchrashsa, u holda yorug'lik interferentsiyasi sodir bo'ladi, bu o'zaro nurlarni kuchaytirilishi yoki susayishi bilan ifodalanadi (8.1-rasm). Nurni katta bo'lmagan teshiklardan o'tib ketganda uning difraktsiyasi kuzatiladi, ya'ni bir xil muhitda asl yo'nalishdan nurning chetlanishi kuzatiladi (8.2-rasm).

### 8.3. Atom tarkibi. Atom emissiyasining spektrlari

Atom yadrosi musbat zaryadlangan, uning asosiy massasi zich joylashgan va elektronlar yadro atrofida aylanadi. Umuman olganda, atom neytral, yadroning zaryadlanishi va barcha elektronlarning umumiy zaryadlari tengdir. Elektronlarning soni turli elementlarning atomlari uchun farq qiladi. D.I. Mendeleev davriy sistemadagi elementning tartib nomeri yadro zaryadini qandayligi va qancha elektron mavjudligini ko'rsatadi.

Atom yadrosi ichki energiyasi juda yuqori. Yadroni qo'zg'algan xolatga o'tishi uchun, hatto eng yaqin darajaga o'tish uchun o'nlab, yuz minglab va millionlab elektronvolt kerak bo'ladi. Zarrachalar kinetik energiyasi bir necha o'nlab elektronvolt dan iborat yorug'lik manbalarida, atomlarning yadrosi har doim normal holatda qoladi. Shuning uchun yadrolarning tuzilishi va ularning energiya darajalari e'tiborga olinmaydi. Tashqi elektronlarning yadroga bog'lanish energiyasi birlik yoki o'nlab elektronvolt hisoblanadi.

Optik zonadagi chiziqli spektrlarning paydo bo'lishiga olib keladigan energiya sathlari tizimi butunlay atomning elektronlar harakatiga bog'liq. Atomdagi har bir elektron aniq bir xolatga ega,  $n, l, m, s$  kvant raqamlari bilan xarakterlanadi. Asosiy kvant raqami  $n$  elektronga tegishli bo'lgan qobiqning sonini belgilaydi.  $n$ -sonli har bir qobig' uchun turli orbital kvant raqamlari bo'lgan bir necha elektronlar mumkin:  $l = 0, 1, 2, 3, \dots, n-1$  (bu raqamlar qiymatlari ramziy ma'noda  $s, p, d, f, \dots$ ). Magnit kvant miqdori  $m$  magnit maydon yo'nalishi bo'yicha orbitali momentlarning proektsiyalarining aniq qiymatlari bilan ajratilgan elektron holatini belgilaydi:  $m = \pm l, \pm(l-1) \dots 0$ .  $l$  ning har bir qiymati  $2l + 1$  qiymatlari  $m$  uchun va shuning uchun elektronning turli holatlari mumkin. Bundan tashqari, har bir elektron elektronning  $1/2$  ( $S = +1/2$  ёки  $S = -1/2$ ) ga teng bo'lgan spin-kvant soni bilan xarakterlanadi. Pauli printsipiga ko'ra, atomning ikki yoki undan ortiq elektroni bo'lishi mumkin emas, ularning barcha kvant soni bir xil.

Bir elementning barcha atomlari ichki energiya qiymatining bir xil qiymatiga ega. haqiqatan ham, har bir atomning bir darajadan boshqasiga o'tishi vaqtida faqat

bitta foton chiqadi va har bir spektr chizig'i bir xil elementning turli atomlari tomonidan tarqalgan bir xil fotonlarning katta soni bilan hosil bo'ladi.

Ma'lum bir ichki energiyaga ega atomning holati odatda oddiy energiya darajasi deb ataladi. har qanday spektral chiziq (bir xil energiyaga ega fotonlar) atomlar bir energiya holatidan ikkinchisiga o'tishganda paydo bo'ladi.

Atomlarning spektridagi har bir spektral chiziq to'liq uzunligi  $\lambda$  va intensivlik, aniqrog'i, nurlanish ehtimoli bilan tavsiflanadi. Spektral chiziqlardagi to'liq uzunliklari va nurlanish ehtimoli atom sistemasi xususiyatlar bilan aniqlanadi. Atom energiyasini o'rganish Bor chastotasi qoidasi bilan aniqlanadi:

$$h\nu = h\frac{c}{\lambda} = E_2 - E_1 \quad (8.3)$$

bunda,  $E_1$  va  $E_2$ - atom sistemasi energiya qiymati ( $E_1 < E_2$ ),  $h$  –Plank doimiysi,  $\lambda$  –to'liq uzunligi ba  $\nu$  –nurlanish chastotasi.

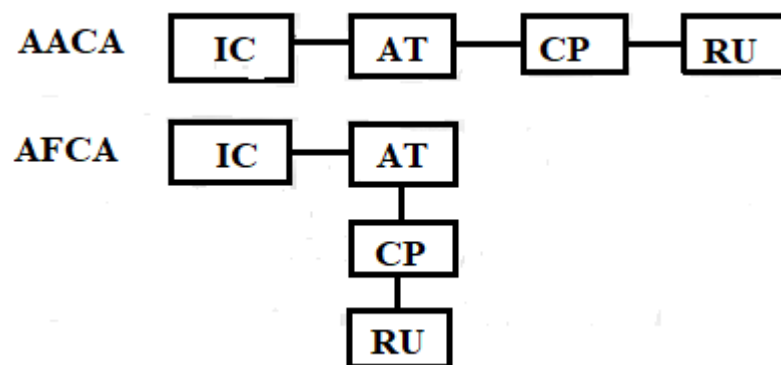
Agar atomning har bir energiya darajasining qiymati ma'lum bo'lsa, unda bu elementning atom spektridagi har qanday chiziqlarni topish oson. O'tgan asrda ko'plab elementlar uchun [termov] raqamlari to'plami topildi. To'plamdagi har qanday ikki raqamning farqi ushbu elementning spektridagi chiziqlardan birining chastotasiga mos keladi. Shubhasiz, bu raqamlar atom energiyasi darajasi hisoblanadi.

#### **8.4. Atom spektral tahlillarni o'tkazuvchi asboblar uchun nur manbalari**

Atomik spektral tahlilni amalga oshirayotganda, tahlil qilingan elementlarning atomlari tomonidan emissiya, absorbsiya yoki optik nurlanishning floresents jarayonlari nazorat qilinishi mumkin. Shunga muvofiq atomik emissiya (AECA), atomik absorbsiyon (AACA) va atomik floresents (AFCA) spektral tahlillari ajratib ko'rsatilgan. AESA usuli juda elementli tahlil hisoblanadi. AACA va AFCA o'rganilgan materiallarni tahlil qilishning yagona elementli usullari. Ushbu turdagi atomik spektral analiz uchun ishlatiladigan qurilmalarning blok diagrammasi 8.3-rasmda.

Spektral qurilmalarning asosiy elementlaridan biri nur manbai. Spektral analiz usuliga qarab, yorug'lik manbalarini belgilash boshqacha. Atom emissiyasi spektr analizini amalga oshirishda yorug'lik manbalari namuna bug'lanish funktsiyasini bajaradi, atomizatsiya va namunaviy elementlarning atom spektrini qo'zg'atadi.





8.3-rasm. Atomik emissiya (AFCA), atomik assimilyatsiya (AACA) va atomik floresans (AFCA) spektral taxlillari uchun ishlatiladigan spektral qurilmalarning blok diagrammasi: IC nur manbai, CP spektral qurilma, RU yozuv qurilmasi, AT atomizator

Atom-absorbtsion taxlil qilish usulida yorug'lik manbai aniqlanadigan elementning spektr chiziqlarining mos tayanch nurlanishni hosil qiladi. Namunani atomizatsiyalash va parlantirish atomizatorida sodir bo'ladi. Yorug'lik manbasida hosil bo'lgan elementning tayanch nurlanishi atomizatorida olingan namuna atomlariga o'xshash atomlar tomonidan so'riladi [10].

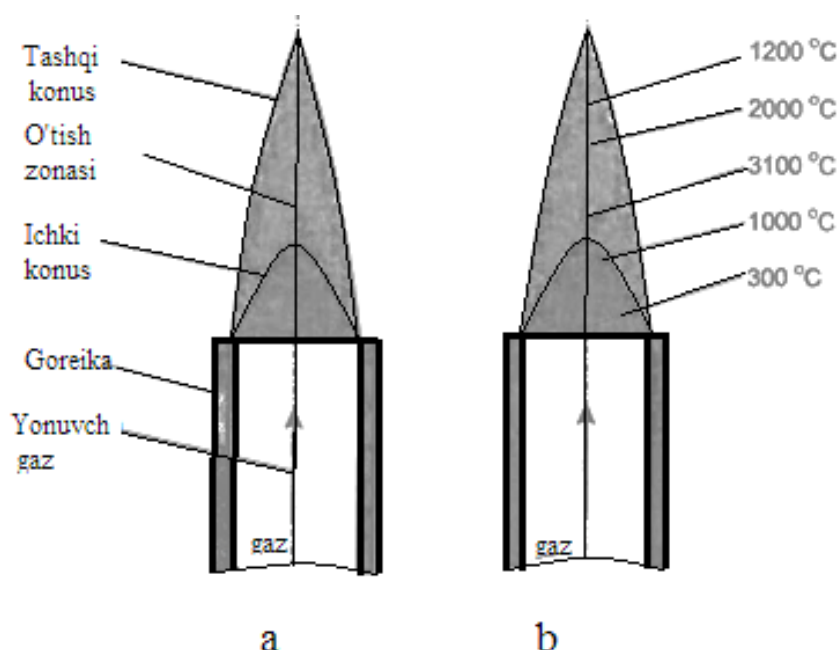
AACA usulini qo'llash orqali nazorat qilinadigan qiymat atomizator ichidagi yorug'likning absorbtsiyasi sababli tayanch nurlanish  $I_0$  ning intensivligi kamayadi. Analitik liniyaga qo'shimcha ravishda, AACA usulida ishlatiladigan lampalar ham aniqlanadigan element tomonidan so'rilmaydigan boshqa spektral chiziqlar chiqaradi. Analitik chiziqni ushbu usulda ajratish uchun monoxromator qo'llaniladi va u bitta chiqish teshigiga ega.

Atom-fluorestsent tahlil qilganda, yorug'lik manbai muayyan namunadagi elementlarning atomlarining fluorestsent selektiv qo'zg'alishini ta'minlaydi. Namunaning bug'lanishi va atomizatsiyasi atomizatorida amalga oshiriladi (8.3-rasm).

Har xil spektral analizlarni amalga oshirishda analitik alanga, eyli razryad, uchqun razryad, sho'la razryadi, plazmatronlar, lazerdan yorug'lik manbalari sifatida foydalanish mumkin. Tahlilning turli usullarida qo'llanilishining ayrim xususiyatlari quyida muhokama qilinadi.

Analitik alanga yondirgichda yonadigan gazda yoki havoda yonuvchi suyuqlikning bug'i yonishi natijasida hosil bo'ladi. Analitik alanganing strukturasi 8.4,a-rasmda ko'rsatilgan. Silindrli yondirgichdan foydalanilganda, olingan alanga konusning shakliga ega. Buning sababi shundaki, trubani chiqib ketadigan gaz

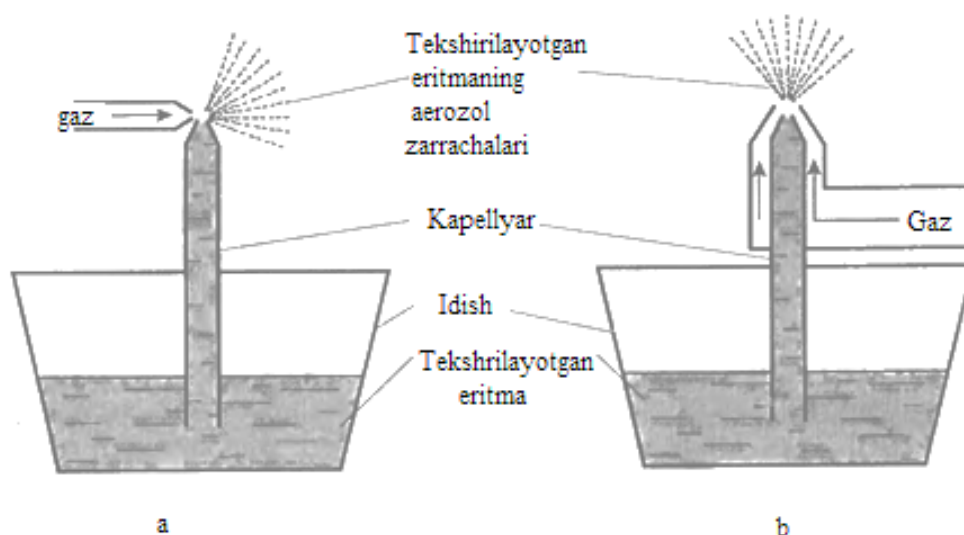
tezligi yaqin devor zonasida minimal va o'qda maksimal darajada bo'lishi. Alangada ichki konus, oraliq zona va tashqi konus paydo bo'ladi.



8.4-rasm. Analitik alanga (a) strukturasi va atsetilen-kislorod alangasining o'qi bo'yicha temperaturani taqsimlash (b)

Analitik alanganing asosiy parametrlari harorat bo'lib, uning xususiyatlarini qo'zg'aluvchi spektrli element chiziqlari nuqtai nazaridan belgilaydi. Atsetilen-kislorod alangasini o'qi atrofidagi haroratni taqsimlanishi 8.4,b-rasmda ko'rsatilgan. Maksimal harorat (3100° C) oraliq zonada etib boradi. Ushbu alanga zonasida tahlil qilingan elementlarning spektr chiziqlarini qo'zg'atish uchun eng samarali hisoblanadi. Alangada erishilgan haroratlarda gidroksidi metallarning, tseziy uchun 1,38 eV va natriy uchun 2,1 eV, magniy uchun (4,34 eV) bariyga (2, 24 eV) rezonans spektral chiziqlarini qo'zg'alish energiya bilan uyg'otishga imkon beradi.

Alangani ishlab chiqarishni ta'minlaydigan yondirgichlar odatda eritmalarning spektral tahlilini o'tkazish uchun ishlatiladi. qizdirish zonasiga qorishmalarni etkazib berish uchun turli xil purkash tizimlari qo'llaniladi. 8.5-rasmda tahlil qilinadigan qorishmalarni pnevmatik purkovchi burchakli va kontsentrik turlari taqdim etilgan. Kapillyarning yuqori qismidagi gaz oqimi bilan ta'hil qilinayotgan eritma idishga tushirilganda, u kapillyar bo'ylab ko'tariladi va kichik aerosol zarralarini hosil qilish bilan purkaladi.

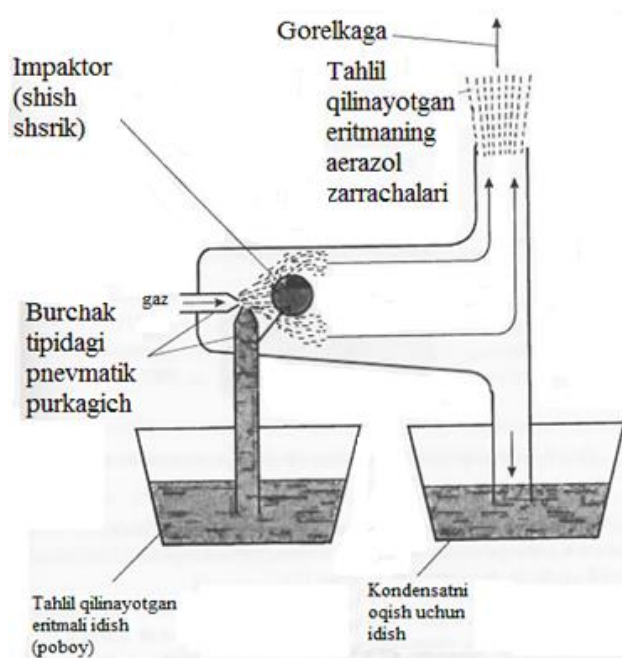


8.5-pacm. Eritmalarni burchakli (a) va konsentrik (b) pnevmatik purkagich turlari

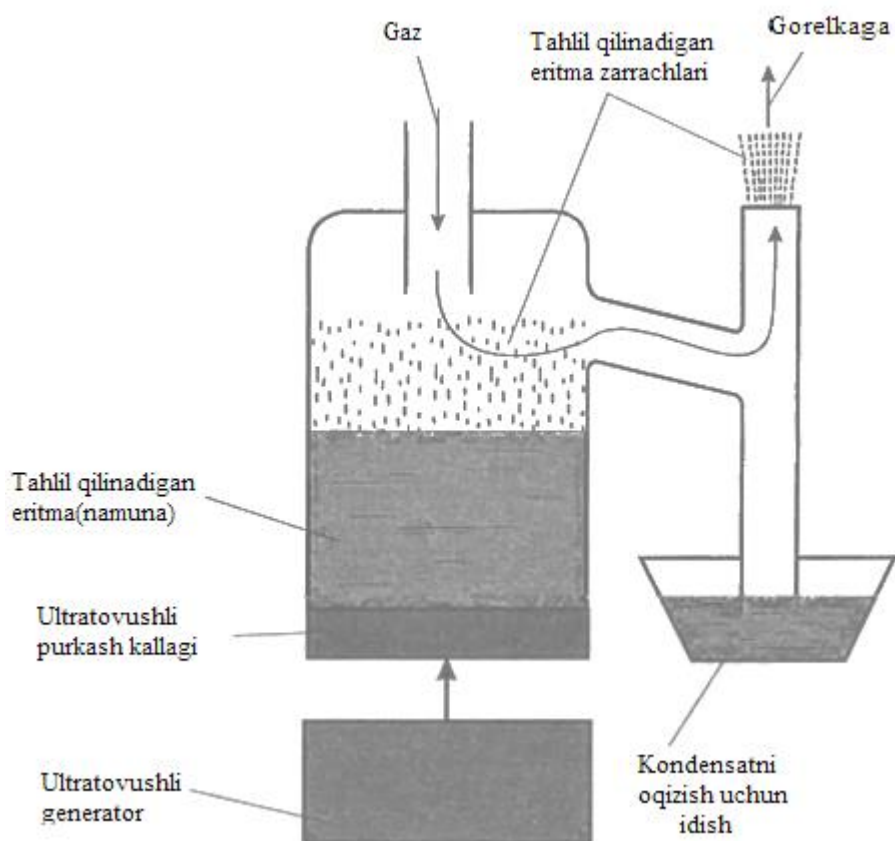
Yondirgich alangasiga aerosol zarralari bilan gaz aralashmasini etkazib berish har xil turdagi purkash xonalari yordamida amalga oshiriladi. Purkaladigan materialning sifatini yaxshilashda muhim omil bu aralashmaning zarrachalar hajmini kamaytirishdir. Zarrachalar hajmining kichraytirilishi shunchalik samaraliroq bo'ladiki, tahlil qilingan materialning yondirgich alangasida atomizatsiyasi va spektral chiziqlar intensivligi ancha yuqori bo'ladi. 8.6-rasmda pnevmatik burchakli purkagich bilan jihozlangan "atomayzer" purkagich kamerasi taqdim etilgan. Aerosol zarrachalarining hajmini kamaytirish uchun purkagich xonasiga qo'shimcha element – sharik ko'rinishidagi impaktor kiritilgan. Purkagich kamerasida hosil qilingan kondensat trubka bo'ylab maxsus idishga oqib o'tadi. Aerosol zarralarini yanada samarali darajada kamaytirish uchun ultratovushli purkash kameralar qo'llaniladi. (8.7-rasm). Spektral qurilmalarda yorug'lik manbai sifatida ishlatiladigan analitik alanganing o'ziga xos xususiyati past fon nurlanish darajasi [10].

Spektral analiz asboblari ishlatiladigan yorug'lik manbalarining yana bir turi yoy razryadi hisoblanadi. Analitik qurilmalarda  $\sim 5...50 \text{ A/sm}^2$  oralig'idagi tok zichligi bilan 15 dan 70 V gacha kuchlanish tushiriladi [10].

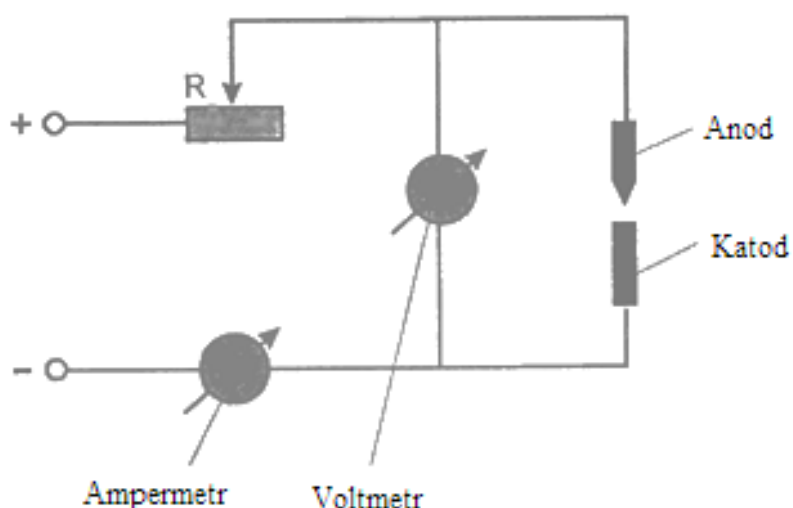
Spektral analizni amalga oshirishda odatda uglerod elektrodleri bilan domiy tok ishlatiladi, bu esa inert gazlar va galogenlardan tashqari deyarli barcha elementlarning emissiya spektrlarini qo'zg'atishga imkon beradi. Uning elektr sxemasi 8.8-rasmda ko'rsatilgan. Sxemaning asosiy elementlari - o'zgaruvchan qarshilik  $R$ , voltmetr  $V$ , ampermetr  $A$ . Yoyni ta'minlash doimiy tok manbasidan amalga oshiriladi. O'zgaruvchi qarshilik  $R$  yoy razryadidan o'tuvchi tok kuchini rostdash va barqarorlashtirish uchun xizmat qiladi.



8.6-rasm. Purkagichli kamerada burchakli pnevmatik purkagichni taxlil qilinayotgan eritma bilan



8.7-rasm. Purkagichli kamerada ultratovushli purkagichni taxlil qilinayotgan eritma bilan .



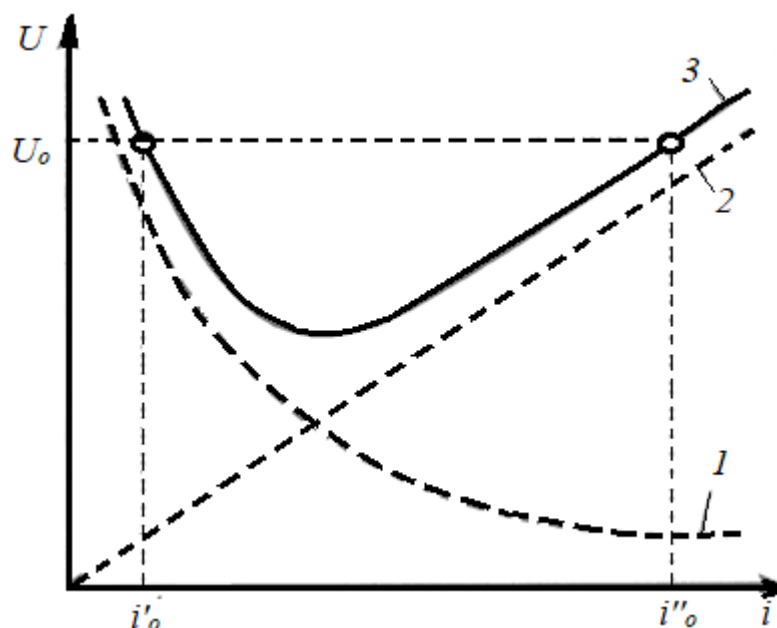
8.8-rasm. Doimiy tok yoyining elektr sxemasi

Doyimiy tokli ballast qarshilikli  $R$  yoyning volt-amperli xarakteristikasi 8.9-rasmda keltirilgan. Bu xarakteristika (yaxlit chiziq) yoyli razryadning volt amper xarakteristikalar va qarshiliklar  $R$  yig'indisi bo'lib, tasvirda punktir chiziqdir.  $U_0$  kuchlanishida yoy razryadi tok oqimlar  $i'_0$  va  $i''_0$  ga to'g'ri keladigan ikki rejimdan birida yonadi.  $U_0, i'_0$  rejim barqaror hisoblanmaydi. Ish tartibi  $U_0, i''_0$  parametrlariga mos keladi.

Yoy razryadi  $i$  ballast qarshilik  $R$  ning tok kuchi quyidagi tenglik ifodasi bilan aniqlanadi:

$$i = \frac{U_0}{R + r_d} \quad (8.4)$$

bu erda  $U_0$  -berilgan kuchlanishning qiymati;  $r_d$ —yoy qarshiligi.



8.9-rasm. Yoy razryadi (1), ballast qarshiligi (2) va yoy razryadini ballast qarshiligi bilan volt-amper xarakteristikasi

Yonayotgan yoyning beqarorligi yoy razryadi qarshiligi  $r_d$  ni o'zgarishi bilan bog'liq, masalan, elektrodni kuyishi va katod dog'i joyini o'zgartirishi. Yoydagi tok kuchini o'zgarishi quyidagi bog'lanish bilan ifodalanadi:

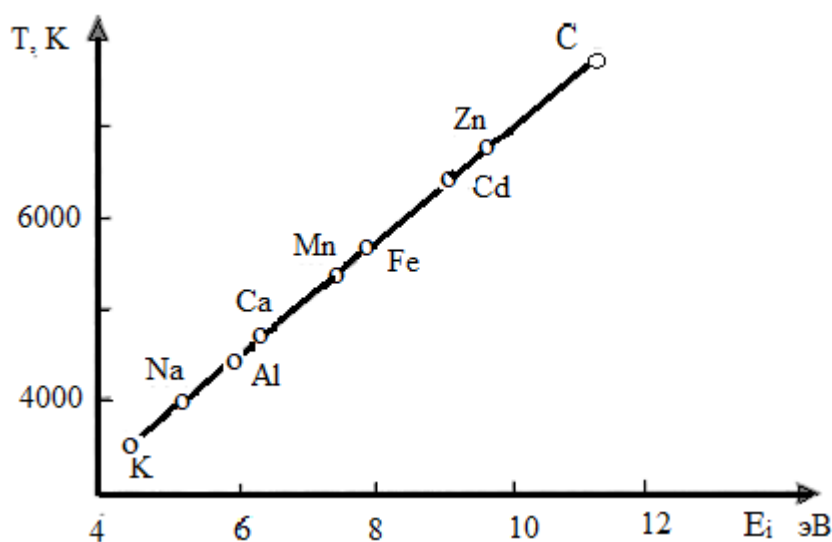
$$\Delta i = \frac{U_0}{(R+r_d)^2} |\Delta r_d| \quad (8.5)$$

bu yerda  $\Delta r_d$  -yoyning qarshiligini o'zgarishidir.

$\Delta r_d$  yoyning qarshiligidagi o'zgarishning bir xil kattaligida tok qiymatining beqarorlik  $\Delta i$  kattaligi kichik bo'ladi, agar balastlik qarshilik  $R$  ning qiymati shunchalik katta bo'lsa. Shu bilan birga, balast qarshiligi  $R$  kattalashuvi ta'minlash kuchlanishini oshirishni talab etadi. Ba'zi hollarda kuchlanish bir necha kilovoltgacha oshiriladi [10].

Atom spektr chiziqlaridagi nurlanish intensivligi, asosan, yoy plazmasi xarorati elektrodlar bo'shliqining gaz tarkibini belgilaydigan elementning ionlash potentsiali bilan bog'liq bo'lgan plazmadagi temperaturaga bog'liq (8.10-rasm). Tokning kuchi plazmadagi haroratga sezilarli ta'sir qilmaydi.

Doimiy tok yoyi spektroskopiyada juda keng ishlatiladi. Analitik qurilmalarda uning taqsimlanishini tushuntiruvchi asosiy omillar yuqori plazma qarorati va yuqori namuna bug'lanish tezligi hisoblanadi. O'rganilayotgan ko'plab elementlar uchun yoyda aniqlanadigan sezuvchanlik  $10^{-3} \dots 10^{-4} \%$  dir[15].



8.10-rasm. Yoy plazmasi haroratini elektrodlar orasida joylashgan elementlarni ionlanish potentsialiga bog'liqligi

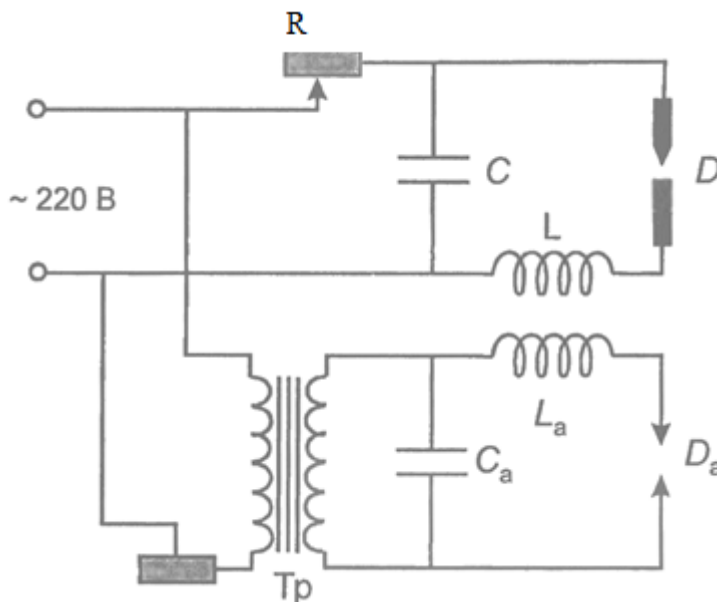
Doimiy tok yoyidan foydalanishga asoslangan qurilmalarning kamchiliklari orasida muhim darajada fon darajasiga ega bo'ladi, ya'ni doimiy nurlanish spektri, molekulyar spektrning mavjudligi, kam yuqori yoy barqarorligi, metalli

elektrodlarning kuchli isitilishi va erishi natijasida past erituvchi eritmalarning miqdorini tahlil qilish uchun uni ishlatishning mumkin emasligi tahlil natijalarining zaif qayta ishlab chiqilishiga olib keladi.

Ruxsat etilgan tokning xarakteristikasi bo'lgan ayrim kamchiliklarni bartaraf etish uchun doimiy tokdan foydalanishga asoslangan spektral asboblarning ruxsat etiladi[15]. Doimiy tok yoyida ishlab chiqilgan harorat doimiy tok yoyida yuz beradigan haroratni oshiradi. Doimiy tok yoyini yonish jarayonining uzilishi elektrod va namuna moddalarini kamroq intensivlikda ta'minlab beradi. Bu molekulyar chiziqlar orqali doimiy tok yoyining spektrining kambag'allashishi uchun sababdir.

O'rganilayotgan spektrning tabiatiga ko'ra, o'zgaruvchan tok bilan ta'minlanayotgan yoy uchqunli razryad va doimiy tok orasidagi oraliq holatidadir. Doimiy tok yoyidan foydalanib ishlaydigan asboblarning metallarni, qotishmalarni, o'tkazuvchan bo'lmagan kukunlarni, aralashmalarni sifatli va miqdoriy tahlil qilish uchun foydalaniladi. 8.11-rasmda o'zgaruvchan tokni aktivlashtirilgan yoy generatorini sxemasi berilgan. Sventitskiy tomonidan taklif etilgan ushbu sxemaning o'ziga xos xususiyati ikki konturdan foydalanishdir. Ularning biri

C, L, D elementlaridan tashkil topgan, yoy konturidir. Boshqasi  $C_a$ ,  $L_a$ ,  $D_a$  - bu aktivatorning yuqori chastotali konturi. O'zaro bu konturlar induktiv birlashtiruvchi  $L_a - L$  bilan bog'langan. Elektrodlariga qo'shimcha konturdan (aktivator konturi) har yarim davrning boshida elektrodlararo bo'shliqni ta'minlovchi yuqori chastotali tok beriladi.



8.11-rasm. O'zgaruvchan tokni intensivlashgan yoyi generatori

Taqdim etilgan elektr sxemaning ishlash printsipi quyidagicha. Kuchlanish oshganda, kondansator C zaryadlanadi. Tok manbaining kuchlanishi yoy

bo'shliqini  $D$  ni ochish uchun etarli emas. Bunda kondensator aktivator  $C_a$  kuchaytiruvchi transformator  $T_p$  orqali zaryadlanadi. Ushbu kondansator qoplamalari razryad bo'shliqi  $D$  ni ochish uchun etarli bo'lganda, kondensator  $C_a$   $C_a, 1_a, A$ , konturlardan bo'shshacha boshlaydi. Ushbu konturning parametrlari shunday olinganki,  $C_a$  kondansator zaryadlanib boshlaganda yuqori chastotali tebranishlar hosil bo'ladi. Bu tebranishlar elektrodlaro bo'shliq  $D$  ni ochishni ta'minlaydi, natijada kondensator  $S$  zaryadi bo'shshadi. Yarim davr oxirida, ya'ni kondensator  $S$  ni zaryadlanish vaqtida kuchlanish kritik qiymatgacha kamayadi, natijada yoy analitik davrda o'chadi. Keyingi yarim davrda kuchlanishning qutiblari o'zgaradi va jarayon qaytariladi.

Yordamchi bo'shatish bo'shliqining buzilish jarayonining barqarorligi uchun razryad bo'shliqining elektrodlari elektr eroziyasiga chidamli bo'lgan, katta disklar yoki sharlar shaklidagi volframdan tayyorlanadi.

Spektral tahlil uchun zamonaviy qurilmalarda yoyni yondirish uchun elektron sxemalar ishlatiladi, bu esa yoyni yuqori barqarorligini ta'minlaydi.

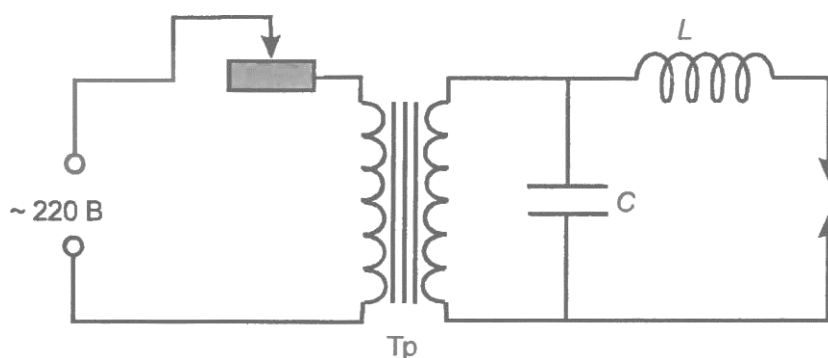
Monolit po'lat namunalarni, cho'yanlarni, va boshqa qotishmali metall namunalarining atom- emissiya spektr analizi qilishda uchqunli kondansatsiyalashgan razryad muvaffaqiyatli qo'llanilmoqda [10]. Uchqunli razryadda chiqadigan plazma harorati yoy xaroratidan yuqori. O'rganilayotgan materialning maxsus atomlash (elektr uchqun eroziyasi) ham qayd etilgan. Past energiyali uchqun elektr o'tkazuvchan materiallarning mikroanalizi uchun ishlatilishi mumkin. Tahlil qilinayotgan yoruqlik manbasini qo'llashning bunday xususiyati uchqun yonish paytida elektr uchqun eroziyasi, o'rganilayotgan materiallar yuzasini kichik zonalarida sodir bo'lgani bilan bog'liq.

8.12-rasmda yuqori kuchlanishli kondansatsiyalashgan uchqun generatorining elektr sxemasi berilgan. Generatorning asosiy elementlari ikkilamchi cho'lg'amda 12-15  $\kappa B$  kuchlanishni ta'minlovchi kuchaytirish transformatori  $T_p$ ,  $\sim 0,003 \dots 0,2 \text{ мкФ}$  sig'imli kondensator  $C$ ,  $L$  ( $\sim 0,5-10^3 \text{ Гн}$ ) induktiv katushka. Generator ishlayotganda, uchqun chiqishining ikki bosqichi amalga oshiriladi. Birinchi bosqichda  $10^8 \dots 10^7 \text{ c}$  davomiyligi bilan elektrodlaro bo'shliqining buzilishi sodir bo'ladi va razryad kanali hosil bo'ladi. Ushbu davrda elektrodlarning materiallari elektrodlaro bo'shliqqa kirmagan, shuning uchun chiqayotgan spektrda faqat spektral chiziqlar va atmosfera gazlarining molekulyar polosalari mavjud.

Tebranish xarakteriga ega bo'lgan  $10^{-4}$  soniya davom etadigan uchqunli razryadning ikkinchi bosqichida,  $L$ ,  $C$ ,  $F$  zanjirida  $\sim 5 \dots 50$  tebranishli razryad toki paydo bo'ladi. Elektrodlaro bo'shliqidagi razryad buzilish kanalining yo'nalishi bo'yicha amalga oshiriladi. Ushbu bosqichda elektrodlar cho'g' shaklidagi elektrodlarning moddasi elektrodlaro bo'shlig'ga kiradi. Cho'g' plazmasining



harorati 2000...3000 K etadi. Bo'zish kanali zonasida bu vaqt harorat 10000 ... 12000 K bo'ladi. Spektral chiziqlarni qo'zg'alish jarayoni cho'g' va buzilish kanalining o'zaro ta'siri xususiyatlari bilan belgilanadi.



8.12-rasm. Yuqori kuchlanishli kondensatorli uchqun generatorini sxemasi

Yuqori kuchlanishli kondensatorli uchqun razryadli analitik qurilmalarda spektr chiziqlaridagi intensivlikning barqarorlashuvi bir necha soniyadan so'ng (o'n soniya) razryadni yoqishdan iborat bo'ladi. Bu dastlabki davrda metall elektrodlar yuzasida sodir bo'lgan jarayonlar, xususan, fazani va kimyoviy tarkibni o'zgartirib, yuzaki eroziya bilan izohlanadi. Spektral chiziqlar emissiyasining kuchlanishini barqarorlashtirish uchun zarur bo'lgan vaqt uchqunlashtirish vaqti deb ataladi[10]. Odatda spektrni ro'yxatga olish spektral chiziqlar nurlanishining barqaror intensivligi davrida amalga oshiriladi.

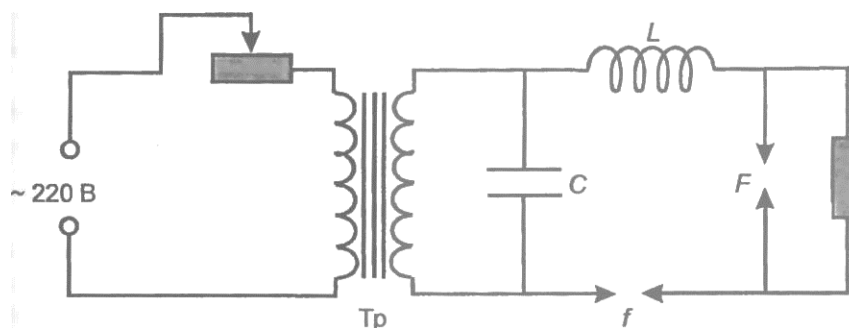
Spektral analizi sifatini ta'minlash nuqtai nazaridan uchqun razryadining quvvatini barqarorlashtirish muhim vazifadir. 8.12-rasmda ko'rsatilgan elektr sxemada doimiy quvvat darajasiga ega bo'lmagan «boshqarilmaydigan uchqun» manbai ko'rsatilgan.

Ushbu kamchiliklarni bartaraf etish uchun yuqori voltli uchqunli boshqarishni ta'minlaydigan elektr sxemalari taklif qilingan [15]. 8.13-rasmda Rayskiyning generator sxemasi taqdim etilgan. U qo'shimcha oraliq bo'shliqi razryadi  $f$  ning va yuqori qiymatli qarshilik ( $R_{uu} \sim 10^6 \text{ OM}$ ),  $F$  shuntlovchi oraliq razryadi mavjudligi bilan tavsiflanadi.

$S$  kondensatordan  $U$  kuchlanish zaryad qaytargich  $f$  qo'llaniladi. Muayyan kuchlanishda zaryad qaytargichni felektr buzishi (proboy) sodir bo'ladi. Zaryad qaytargichni buzish kuchlanishi uzoq vaqt davomida o'zgarmay qoladi, chunki uning elektrodleri katta volframli sharlardan yoki disklardan tayyorlanganligi uchun uchqun eroziyasiga chidamli.

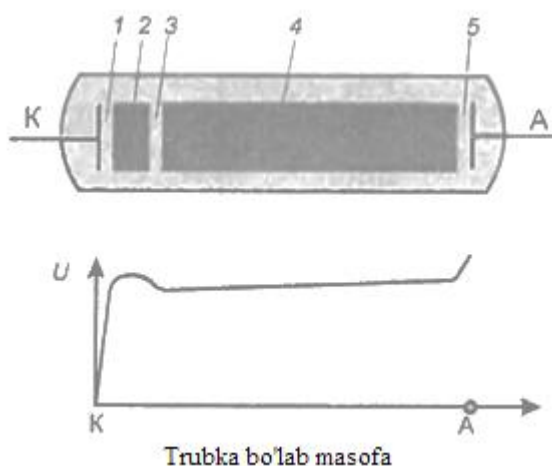
Zaryad qaytargich  $f$  bo'zishida kondensator toki  $C$ ,  $L$ ,  $R_{uu}$ , fzanjir bo'ylab oqadi. Chunki qarshilik  $R$  juda katta bo'lgani uchun barcha kuchlanish pasayishi

yuz beradi. Natijada,  $R_{uu}$  shunga parallel ulangan analitik oraliq  $F$  ning bo'zishi sodir bo'ladi. Ta'riflangan elektr sxemani qo'llashda analitik bo'shliqning buzilishi vaqti yordamchi uchqun oraliqi  $f$  bilan belgilanadi, uning miqdori avval aytib o'tilganidek barqarorlashadi.



8.13-рasm. Бошқариладиган учқун схемаси

Ayrim hollarda spektral asboblardagi yoruqlik manbai sifatida sho'rlanuvchi razryad qo'llaniladi. Ushbu turdagi razryad katod va naychadagi anod o'rtasida ( $0.1 \dots 10$  Topp) gaz to'ldirilgan qiymatida bo'ladi. Potentsiallar farqi sho'la razryadini hosil qilish uchun zarur bo'lib, u yuzlab voltga, tok kuchi esa birliklardan yuzlab milliamperlarga bo'lishi mumkin. Trubkada yonayotgan katod va anod orasidagi sho'la razrdining asosiy zonalari 8.14-rasmida ko'rsatilgan. Ushbu sxemada katod oldi bo'shliq, manfiy sho'rlali porlash, qora Faradey bo'shliqi, musbat ustun va anod oldi qatlami ajratilgan. Rasmning pastki qismida potentsialni gazrazryad trubkada taxsimlanishi ko'rsatilgan.



8.14-rasm. Yorug'lik oqimining asosiy zonalari va  $U$  potentsialini gazrazryadlash trubkasi bo'ylab taqsimlanishi: K - katot, A -anod, 1 - qorong'i katod oldi muhiti (TPP), 2 – salbiy sho'rlanuvchi nurlanish, 3 – qorong'u faradey muhiti, 4 - ijobiy ustun, 5- anod oldi qatlami

Katod oldi qorong'i bo'shliq to'g'ridan-to'g'ri katotda joylashgan. Unda atomlarni qo'zg'alishi kuzatilmaydi va shuning uchun nur emissiyasi yo'q. Katod tomonidan chiqariladigan elektronlarning erkin yo'li bilan aniqlangan bu qatlamning qalinligi  $\sim 0,1$  mm dir.

So'ngra anod yo'nalishi bo'ylab manfiy sho'lalanish porlashi joylashgan. Qorong'i katod oldi bo'shliqida katta tezlik olgan elektronlar manfiy qo'lanish zonasida gazni samarali tarzda ionlashtiradi, uning atomlarini va molekulalarini harakatga keltiradi.

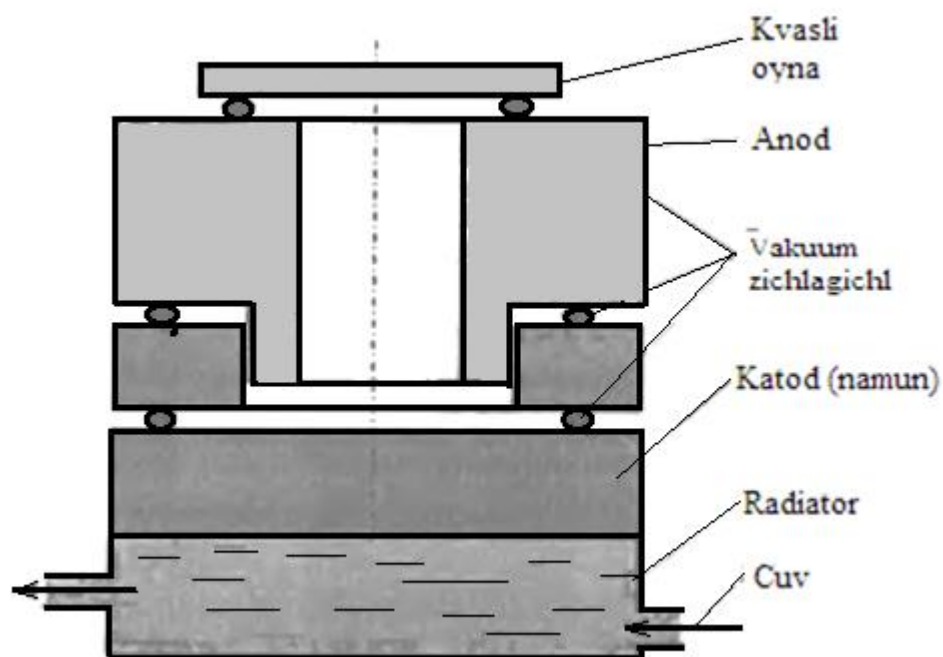
Faraday maydoni deb nomlanuvchi joyda gaz porlashi yo'q. Keyinchalik, ijobiy sho'lalanish razryadi ustuni joylashgan bo'lib, uning farqlanishi shundaki, mos keladigan elektrodlar orasidagi maydonda uning uzunligi bir metrdan oshib ketishi mumkin. Bu zonaning mavjudligi sho'lalanish razryadining majburiy xususiyati emas. Katot va anod orasidagi masofani kamaytirish musbat ustun uzunligini yo'qolgunga qadar kamaytirishiga sabab bo'ladi. Anodga anod oldi sho'lalanuvchi yuqori kontsentratsiyali elektron qatlami birlashadi.

Katod bilan anod orasidagi masofa kamaytirilsa va ijobiy ustun yo'qolsa, porlab turgan zaryad quyuqlashib ketgan bo'sh joy, salbiy porlashi va faradey bo'shliqini o'z ichiga oladi.

Spektral tahlil amaliyotida yorug'likli to'g'ridan-to'g'ri oqim bilan ishlaydigan yorug'lik manbalari va yuqori chastotali nurli oqim manbalari qo'llaniladi. qattiq namunalardagi atom emissiya spektral analizini o'tkazish uchun ikki turdagi nurli oqim manbalari qo'llaniladi. Bu tekis va bo'shliq katotli manbalardir. Ikkala holatda ham spektrni ekspluatatsiya qilish uchun salbiy nurli yoruqlik ishlatiladi [10].

8.15-rasmda Grimmning razryad trubasi sxemasi ko'rsatilgan bo'lib, unda tekis katod yordishlatilgan. Ushbu sxemadatekis tekis katod funktsiyasini tekshirilayotgan metall namuna bajaradi. haddan tashqari qizib ketishini oldini olish uchun katod suv oqadigan radiator bilan sovutiladi. Yuqorida joylashgan katod va silindrli anod orasidagi masofa 0,1-0,3 mm. Grimm trubkasida nurlanishni kuzatilishda kvars shisha ishlatiladi. Razryadni yoqishdan avval, trubka germetik yopiladi undan havo so'rib olinadi va shundan so'ng unga Argon 0,1...1 Torr bosimida yuboriladi. Katod va anod o'rtasida qo'llaniladigan kuchlanish  $\sim 1,5$  kV ni tashkil qiladi, unda tok odatda 100 mAdan oshmaydi.

Ichki katod tekis bilan solishtirganda spektrning yanada kuchli qo'zg'alishini ta'minlaydi. Yassi va ichi bo'sh katoddan foydalanishga asoslangan sho'lalanuvchi razryadi doimiy tokning manbalarining o'ziga xos xususiyati tor spektr chiziqlar hosil bo'lishi. Grimmning sho'lalanuvchi razryadi va to'liq razryadli katod namunani qizdirishsiz sodir bo'ladi.



8.15-rasm. Grimm razryad trubka qurilmasi

To'liq katodli qurilmalarda, manfiy porlab turgan yoruglik katod bo'shligini to'ldiradi. Xalqa shaklida bo'lgan anod katoddan bir necha santimetr masofada joylashgan. Razryad naychasining oxiriga yopishtirilgan kvarts oynasi nurlanishni kuzatish uchun xizmat qiladi. Amalda ikkita to'liq katodli qurilmalar qo'llaniladi: sovutilgan va sovutilmagan to'liq katodli qurilmalar. Katod suv yoki suyuq azot bilan sovutiladi.

Yassi va ichi bo'sh katodli qurilmalarda sho'lali razryadni yonish jarayoni «materialning katodli puflashi» deb ataladigan xodisa bilan kechadi. Sirtini katodli purkalishi inert gaz ionlari bilan amalga oshiriladi, ular qora rangli katod oldi bo'shligi elektr maydonda tezlashadi va katodning sirtini bombardimon qiladi. Natijada, sirt atomlarining ajratilishi va ularning plazma razryadiga kirishi mumkin. Doimiy tok sho'la razryadi manbalarining bunday xatti-harakati materiallarning qatlamlik atom emission spektral tahlilida qo'llash imkonini beradi. qatlamli xal qilish  $\sim 0.1$  mm ga teng [10].

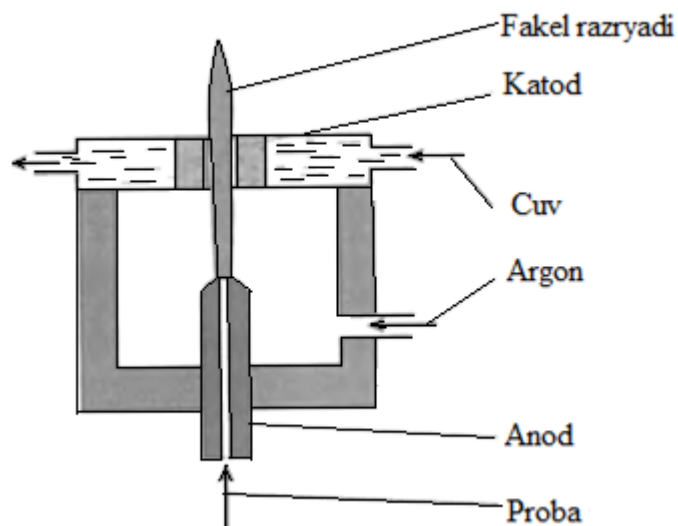
Sho'la razryadini ta'minlash uchun yuqori chastotali tokni ( $10^5 \dots 10^8$  Гц) ham ishlatish mumkin. Yuqori chastotali sho'la razryadining musbat ustuni gazlar va gaz aralashmalarining atom emission spektral analizida ishlatiladi. Spektral analizni o'tkazishda plazmatronlar yoruglik manbalari sifatida ishlatilishi mumkin. Elektr quvvatining turiga qarab yoyli plazmatronlar yoki doimiy tok plazmatronlari, hamda yuqori chastotali plazmatronlar bo'lishi mumkin.

Yoyli plazmotronlar odatda purkagich aerezollari shaklida alangaga yuborilgan suyuq namunalari va eritmalarining spektral taxlilini o'tkazish uchun

ishlatiladi. Ushbu turdagi yorug'lik manbalarini qo'llashda tadqiqot natijalarining takrorlanabilishi yoyli razryadiga qaraganda yaxshiroqdir.

Bir-oqimli yoyli plazmatron 8.16-rasmda ko'rsatilgan. Yoy, shakli disk ko'rinishdagi markazida kichik diametrli teshigi bo'lgan anod va katod orasida yonadi. Katod haddan tashqari isib ketmasligi uchun suvning oqimi bilan sovutiladi. Argon ko'pincha plazmatronning ishchi gaz sifatida ishlatiladi. Plazmatron katodning silindrik teshigidan plazma alangasi chiqib turadi. Uning uzunligi o'n santimetrga etadi. Nur manbai sifatida alanganing uch qismidagi toksiz plazma zonasi ishlatiladi.

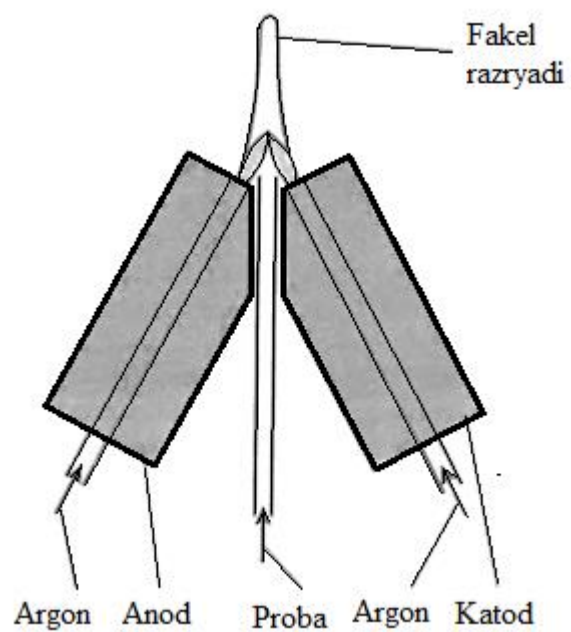
Kuchliroq qurilmalar ikki oqimli plazmatronlardir. Ularda plazma alangasi katoddan va anoddan chiqadigan ikkita argon oqimi qo'shilish zonasida hosil bo'ladi (8.17-rasm). Ikki oqimni birlashish zonasidagi plazmadagi harorati 10 000 K ga teng. Tahlil qilinayotgan namuna bu zonaga aerosol yoki mayda kukun aralashmasining aerosol suspenziyasi sifatida etkazib beriladi.



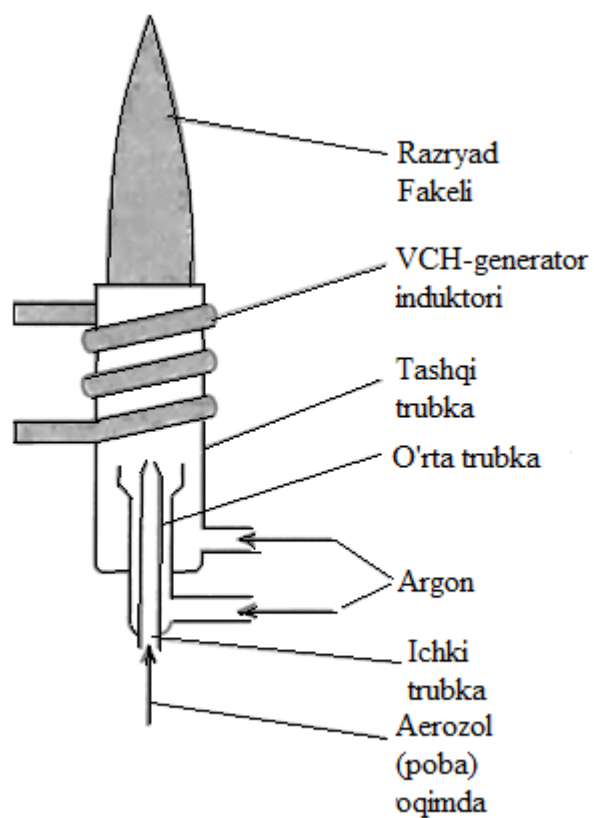
8.16-rasm. Biroqimli plazmatron sxemasi

XX asrning 60 yillaridan boshlab atom emission spektral taxlillari uchun yuqori chastotali plazmotron ishlatiladi. Ushbu turdagi yorug'lik manbalari «induktiv bog'langan plazma» ISP deb ataladi[1]. Uning asosiy afzalligi plazma alangasi bilan munosibatda bo'ladigan elektrodning yo'qligi.

Induktiv bog'langan plazma ishlab chiqarish uchun moslama bo'lgan Fassel yondirgichning sxemasi 8.18-rasmda keltirilgan. Yondirgich uchta kvartsdan tayyorlangan kotsentrik trubkalardan iborat. Tashqi trubka yuqori chastotali generatorning indikatorida joylashgan. Generator quvvati 1...2 kVt tashkil etadi



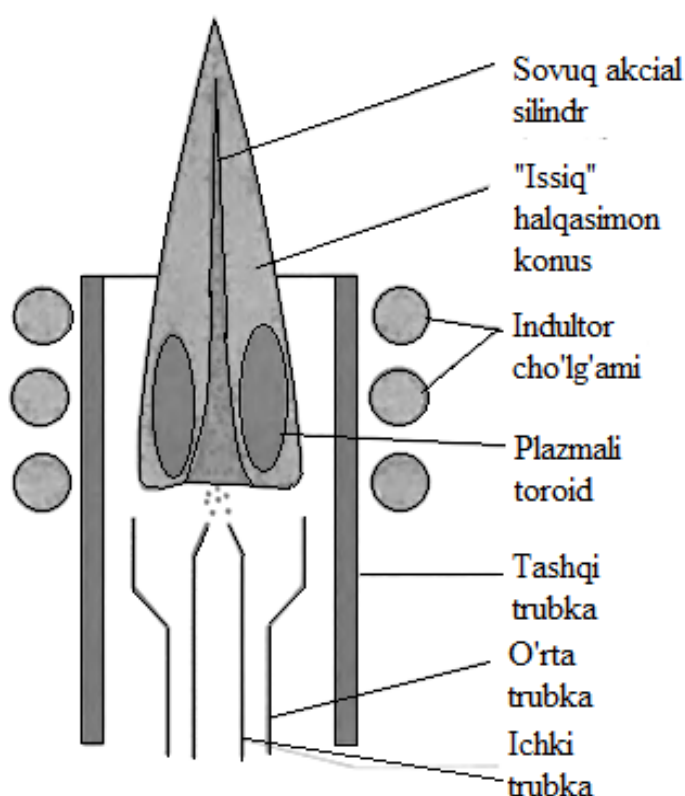
8.17- rasm. Ikki oqimli plazmatron qurilmasi



8.18-rasm. Induktiv ravishda bog'langan plazma olish uchun Fassel gorelkasi

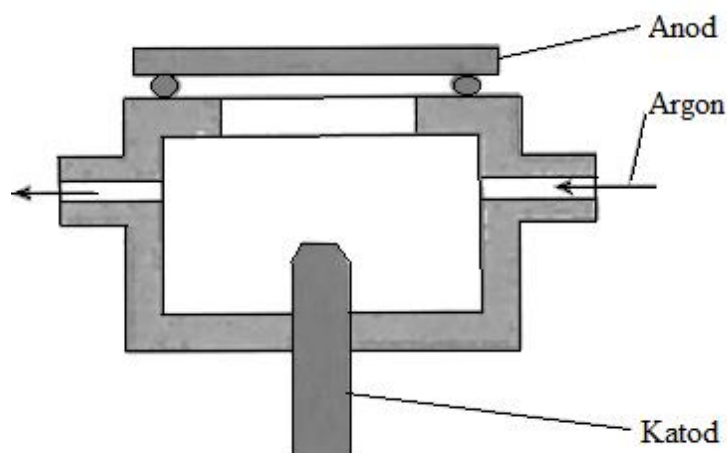
Ichki trubkada namunadagi suyuqlikning aerosolini etkazib berishga xizmat qiladi. Aerosol argon oqimi bilan birga uzatiladi. Argondagi plazma naycha o'rtasidagi naycha orqali oqadi. Bu oqim induktor zonasiga tushib razryad alangasini hosil qiladi. Sovutadigan argon oqimi tashqi trubaga  $\sim 5\ldots 10 \text{ l/min}$  tezligida yuboriladi, bu plazma va trubaning ichki yuzasi o'rtasida issiqlik ajratish buferini hosil qiladi.

Induktiv tarzda bog'langan plazmadagi asosiy haroratli zonalar 8.19-rasmda ko'rsatilgan. Eng yuqori harorat plazmadagi toroidda, induktator zonasida joylashgan. Indikatoridan 5...25 mm balandlikdagi plazma maydoni analitik zona bo'lib xizmat qiladi.



8.19-rasm. Induktiv bog'langan plazmani harorat zonasi

Induktiv bilan bog'langan plazma metallar, geologik ob'ektlar, biologiya, tibbiyot va farmakologiya sohalarida organik materiallarni atomik emission spektr analizida nur manbai sifatida ishlatiladi. qattiq jisimli namunalarini induktiv ravishda bog'langan plazmalarga kiritish muhim vazifa hisoblanadi. Buning uchun misol tariqasida, elektro uchqunli namuna yig'gichni konstruksiyasining sxemasi 8.20-rasmda ko'rsatilgan. Uchqunli razryad namuna bilan katod va anod o'rtasida yonadi. Kamera ichiga kiradigan argonning oqimi namuna materialini induksion bog'langan plazmaga o'tkazadi.

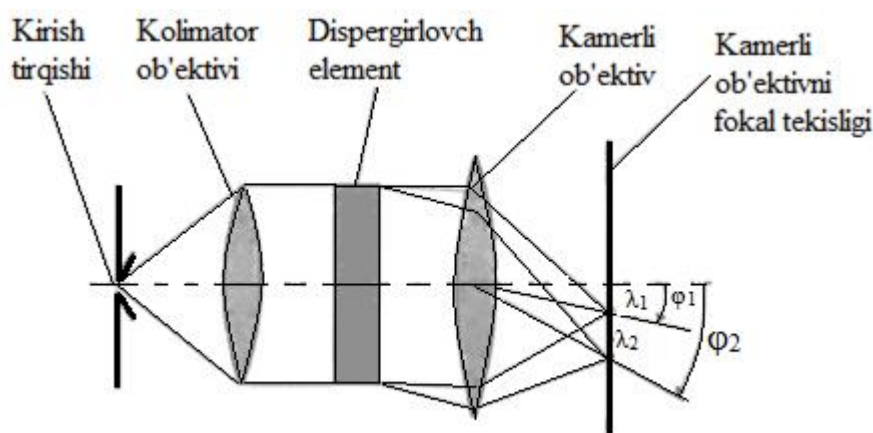


8.20-rasm. Induktiv ravishda bog'langan plazma nur manbai uchun elektr uchqunli namuna olgich

Spektral analiz qurilmalari uchun noyob nur manbai, ularning nurlanish xususiyatlari jihatidan sezilarli darajada farq qiladigani lazerdir. O'rganilayotgan namunaning yuzasiga yo'naltirilgan lazer nurlari qattiq moddalarni eritib, bug'lantirish imkonini beradi. Lazerli namuna olishning xarakterli xususiyati – maxalliylik, materiallarini mikrotaxlilini atom emission spektroskopiyasi bilan o'tkazish imkonini beradi.

### 8.5. Spektral qurilmalar

Spektral tahlil uchun ishlatiladigan qurilmaning muhim elementi spektral asbobdir. Nur manbaida olingan nurlanishni spektriga ajratib berishga xizmat qiladi. Spektral qurilmaning sxemasi 8.21-rasmida ko'rsatilgan. Uning tarkibiga yoriq, kollimator ob'ektiv, dispersgirlovchi element va kamera ob'ektivini o'z ichiga oladi.



8.21-rasm. Spektral asbob sxemasi



Nur manba kirish yoriqiga tushadi. Uning maqsadi, kollimator ob'ektivlarini to'ldiradigan gomotsentrik yoruqlik nurini yaratishdir. Kollimatorda qat'iy parallel yorug'lik nurlari hosil bo'ladi va so'ngra disperslash elementiga tushadi.

Disperslash element ichida yorug'lik ko'plab tutamlarga ajraladi va u nurlar to'liqin uzunligi bilan farqlanadi. Doimiy spektr xolatida uzluksiz. Odatda, real namunalarning spektral tahlillari kuzatilganida, chiziqli va uzluksiz spektrlarning hosil bo'lishida ifodalanadigan alohida va uzluksiz spektrlarning kombinatsiyasi kuzatiladi.

Turli to'liqin uzunliklari bo'lgan yoruqlik nurlari, tarqatish yo'nalishlari bo'yicha disperslanadigan element bilan ajralib turadi, kamera ob'ektivlari o'ziningfokal tekisligida markazlashtiradi. Kamera ob'ektivining fokal tekisligida parallel nurlarining alohida pastki qismi mavjud bo'lganda spektral chiziqlar paydo bo'ladi. Uzluksiz pastki qism doimiy spektrga mos keladi.

Spektral qurilmalarning asosiy xarakteristikasi bo'lib, burchak dispersi  $D_\varphi$  ва чизикли дисперсия  $D_l$  hisoblanadi. Burchak dispersiyasi  $D_\varphi$  burulish burchagidagi  $d\varphi$  o'zgarish nisbati bilan tarqalgan nurlanish  $d\lambda$  to'liqin uzunligi o'zgarishiga qarab belgilanadi:

$$D_\varphi = \frac{d\varphi}{d\lambda} \quad (8.6)$$

$D_l$  chiziqli dispersiyasi  $dl$  chiziqli masofasining kamera ob'ektivining fokal tekisligidagi spektral chiziqlar orasidagi o'zgaruvchan nurlanish to'liqin uzunligi o'zgarishiga nisbati bilan belgilanadi:

$$D_l = \frac{dl [\text{mm}]}{d\lambda [\text{nm}]} \quad (8.7)$$

Spektral asbobning xarakteristikasi teskari yo'nalish dispersiyasining qiymati sifatida ham xizmat qilishi mumkin:

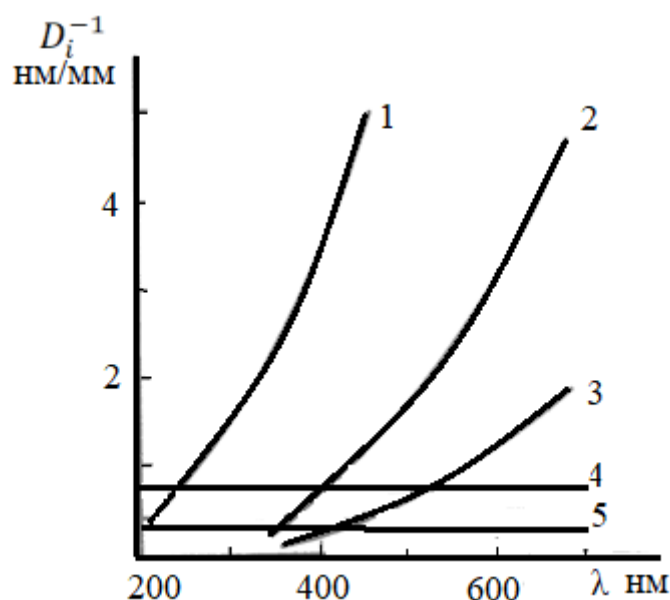
$$D_l^{-1} = \frac{d\lambda [\text{nm}]}{dl [\text{mm}]} \quad (8.8)$$

Bir qator spektrograflar uchun nur  $\lambda$  ning uzunligi bo'yicha teskari yo'nalishli  $D_l^{-1}$  dispersiyasining bog'liqligi 8.22-rasmda ko'rsatilgan.

Spektral qurilmaning  $R$  ning hal qiluvchi kuchi quyidagi nisbati bilan aniqlanadi

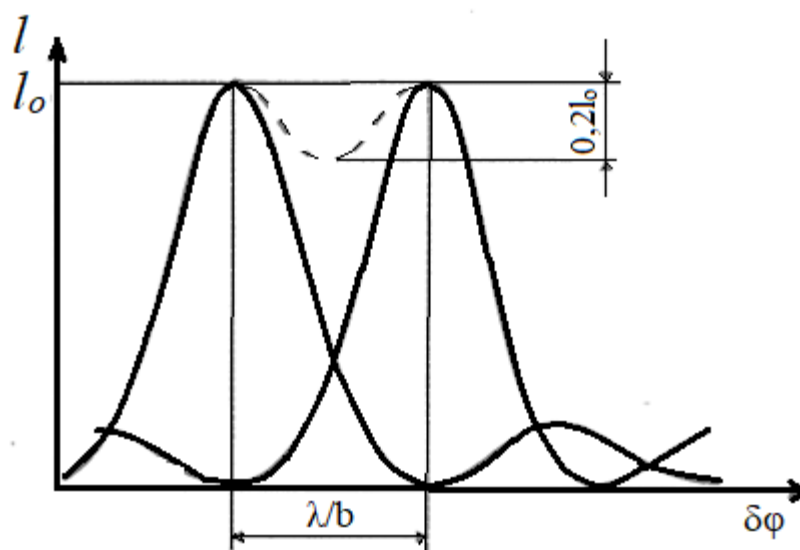
$$R = \frac{\lambda}{\delta\lambda} \quad (8.9)$$

bu erda  $\delta\lambda$ - spektrli asbob bilan ikki spektral chiziqlarning to'liqin uzunliklari (alohida-alohida kuzatiladi) o'rtasidagi farqdir.



8.22-rasm. Spektrograflarni teskari chiziqli dispersiyasi:

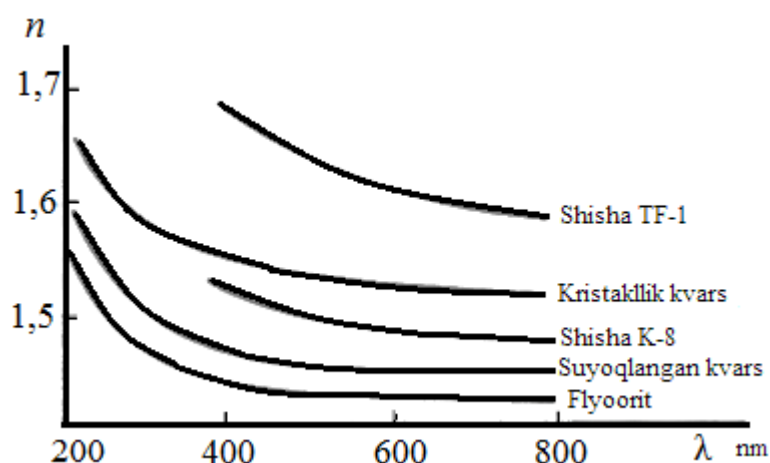
1-ISP-28; 2-ISP-51 kamera bilan shunga mos ravishda  $F=800$  va  $F=1300$ ;  
4- DFS-8 600 shtrixg`mm difraktsion panjara bilan; 5- DFS-13 600 shtrixg`mm difraktsion panjara bilan



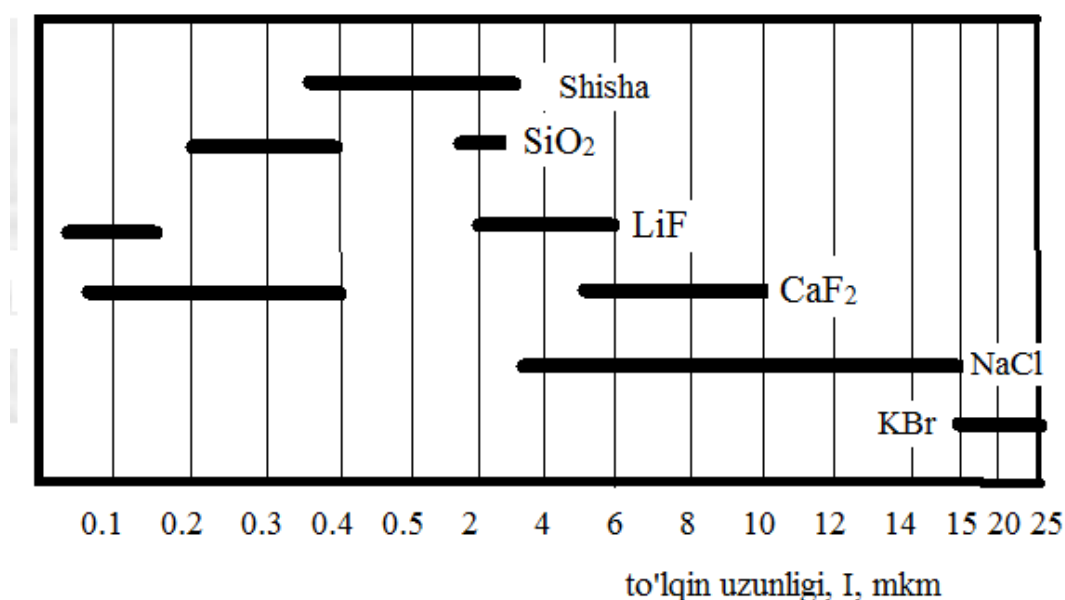
8.23-rasm. Reley bo'yicha spektral asbobni ruxsat etilgan kuchini aniqlash

Releyning mezoniga ko'ra, spektral asboblarda aniqlangan intensivlikdagi ikki spektrli chiziqli har birining maksimal intensivligining 20% ni tashkil etadigan intensivlikka ega bo'lishi kerak (8.23-rasm).

Spektral asbobning muhim elementi burchakli dispersiyani aniqlaydigan disperslovchi element hisoblanadi. Spektral prizmalar va difraktsion panjaralar spektral asboblarda disperslovchi elementlari sifatida ishlatiladi



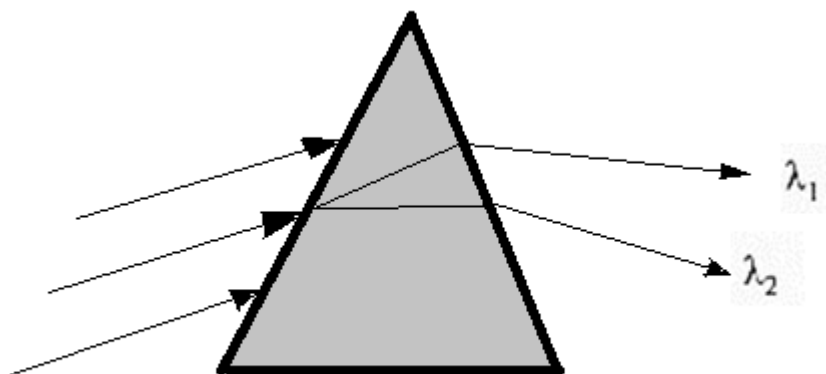
8.24-rasm. Ba'zi optik materiallar uchun dispersiya egri chiziqi



8.25-rasm. Optik materiallarning shaffoflik oblasti

Spektral prizmalar ishlab chiqarish uchun turli turdagi shaffof materiallardan foydalaniladi. Spektrning ko'rinadigan va yaqin infra qizil oblastida ishlash uchun odatda TF-1 va K8 shisha sinflaridan tayyorlangan prizmalardan foydalaniladi. Spektrlarning ultrabinafsha oblasti uchun ( $\lambda < 400$  nm) kvarts ishlatilgan.  $Dn/d\lambda$  moddasining tarqalishini tavsiflovchi  $n$  muhitining sinishi indeksining turli materiallar uchun yorug'lik to'lqin uzunligiga bog'lig'ligi 8.24-rasmda keltirilgan. Bir qator optik materiallarning shaffoflik oblastlari 8.25-rasmda ko'rsatilgan.

Seriyalab ishlab chiqariladigan spektral asboblardagi prizmalarning chiziqli o'lchamlari odatda 50 mm dan oshmaydi. Katta o'lchamdagi prizmalarda muhim talabni bajarish qiyin, chunki prizma hajmida optik tengsizlikka rioya qilish ancha og'ir.



8.26-rasm. Prizma tomonidan nurni yoyilishi

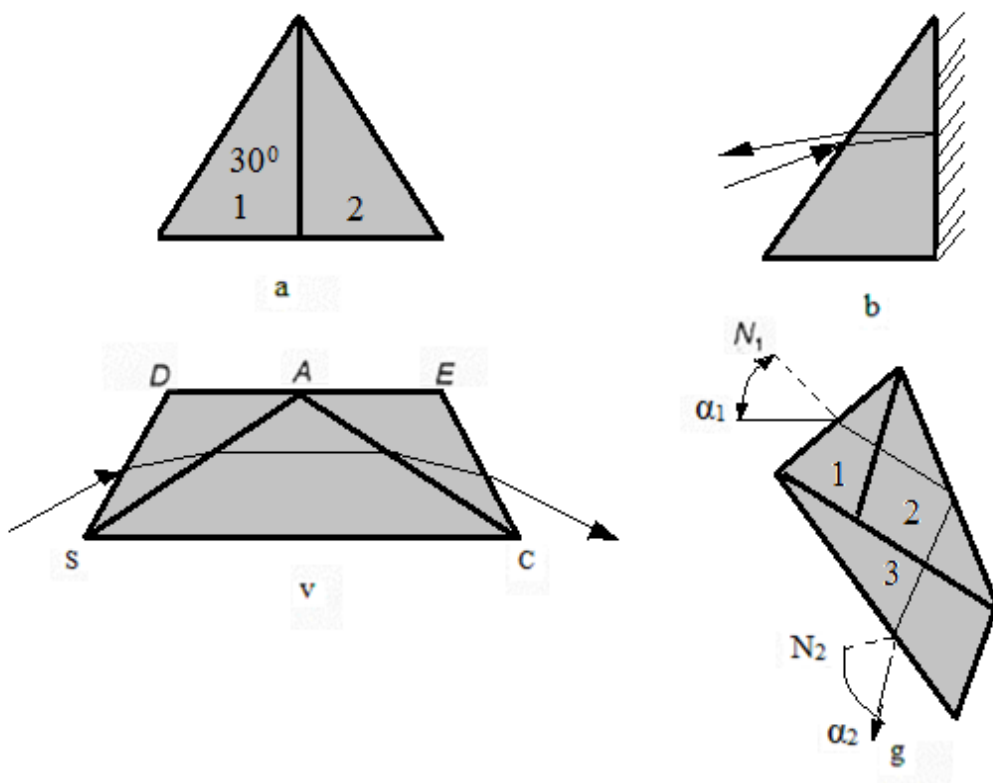
To'lqin uzunligi bo'yicha uchburchakka tushgan nur tutamini yoyilishi sxematik tarzda 8.26-rasmda ko'rsatilgan. Nurlarni sinish qonuniga ko'ra, turli to'lqin uzunlikdagi yoruqlik nurlarining chiqish burchaklari turlichadir. To'lqin uzunligi kichik nurlar ko'proq burchakka oqgan.

Ultrabinafsha spektr oblastida Kornyu prizmasi ishlatiladi (8.27-rasm, a). U ikkita 30 graduslik prizmalar bilan birga yopishtirilgan 60 gradusli prizmadir. Ushbu prizmani ishlab chiqarish uchun material sifatida kvarts ishlatiladi. Prizma tarkibiy qismlaridan biri o'ng va chap burchakli kvartsdan iborat. Bu nurni ikki martadan sinishini kompensatsiyalaydi.

Littrov avtokollimatsion prizmasi Kornyu prizmasining yarmini tashkil etadi, qo'shimcha ravishda oyna bilan jihozlangan (8.27-rasm, b). Agar bu prizma shishadan yasalgan bo'lsa, u spektrning ko'rinadigan qismida ishlash uchun ishlatilishi mumkin. Bundan tashqari, spektroskopiyada boshqa murakkab prizmalar, xususan, Rezerford prizma (8.27-rasm, s) va Abbe prizma (8.27-rasm, d) da foydalanish mumkin.

Yorug'lik to'lqin uzunliklarining ajralishini ta'minlaydigan ikkinchi turdagi elementlar difraktsion panjaralar hisoblanadi. Panjara pardozlangan oyna plastina bo'lib, aks ettiruvchi metall plyonka bilan qoplangan va bir biriga parallel shtrixlar oilasidan iborat. Shisha plastinka ustidagi shtrixlar Rouland mashinasida olmos keskichlar yordamida hosil qilingan. Difraktsiya panjarasi ustiga tushadigan yorug'lik ko'zgu yuzasidan tasmalar tarzida aks ettiriladi va shtrix tasmalarida tarqaladi.

Difraktsion panjarani shtrixlarga perpendikulyar tekislik kesimi 8.28-rasmda ko'rsatilgan. Aks ettiruvchi shtrixlarning eni  $d$  harfi bilan belgilangan. Shtrixlar orasidagi  $t$  masofaga panjara doimiysi deyiladi.



8.27-rasm. Spektral prizmalar

a- Kornyu prizmasi; b- Litrovning avtokollimatsion prizmasi; v- Rezerford prizmasi; g- Abbening doimiy oquvchi prizmasi

Ushbu qiymat [mm /shtrix] o'lchamiga ega. Odatda,  $1/t$  ning teskari qiymatidan foydalaniladi, uning bir millimetr enida nechta shtrixlar sonini xarakterlaydi.

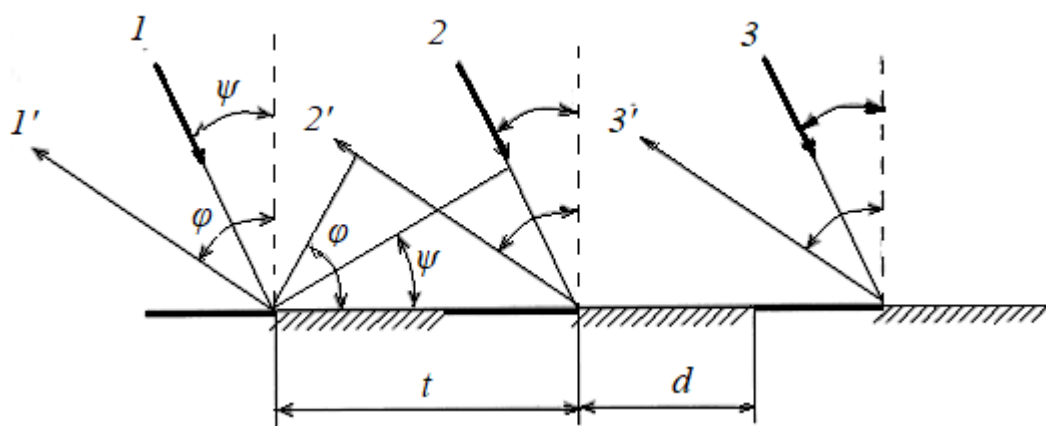
Difraktsion panjaraning burchak dispersiyasi  $k$ - tartibidagi difraktsiyasi quyidagicha bog'lanish bilan ifodalanadi:

$$\frac{d\varphi}{d\lambda} = \frac{k}{t \cos \varphi} \quad (8.10)$$

Bir millimetr yuzada shtrixlar sonini ortishi, ya'ni yuzasi bir millimetr haqida zarbi soni, ya'ni panjara doimiysi  $t$  kamayishi, difraktsion panjara burchak difraktsiyasini ko'paytiradi.

R difraktsiya panjarasining hal qilish imkoniyati prizma farqli o'laroq, yorug'lik disperlangan to'lqin uzunligiga bog'liq emas. U faqatgina panjara yuzasida hosil qilingan shtrixlar soni  $N$  va difraktsiya tartibi  $k$  bilan bog'liq:

$$R = N \cdot k. \quad (8.11)$$

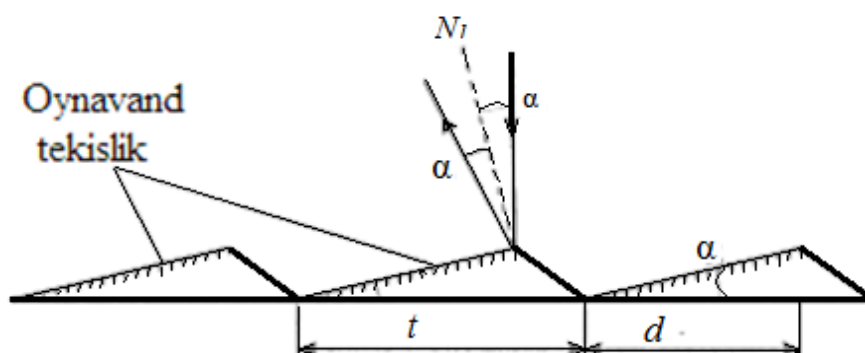


8.28-rasm. Aks ettiruvchi panjarada parallel nur tutami difraktsiyasi: 1,2,3-tushayotgan nurlar; 1-, 2-, 3-difraktsiya nurlari;  $\psi$  –tushish burchagi;  $\varphi$ -difraktsiya burchagi;  $t$ -panjara doimiysi;  $d$ -qaytaruvchi shtrixlar eni

An'anaviy difraktsion panjaralarning kamchiliklari, bir spektrli chiziqlarning yorug'lik oqimi bir nechta difraktsiya tartiblari orasidagi taqsimlanishidir. Bu holda yorug'lik oqimining asosiy ulushi nol tartibga to'g'ri keladi va u ishlamaydi.

Yorug'lik nuri oqimini difraktsiya tartibida kontsentratsiya qilishda J. W. Rele tomonidan tavsiya etilgan profillashgan difraktsion panjara ishlatiladi (8.29-rasm). Ushbu turdagi panjaralarda barcha yorug'likni aks ettiruvchi shtrixlar difraktsion panjara tekisligiga  $\alpha$  burchak ostida joylashgan. Og'ish burchagini  $\alpha$  oshirish orqali nurni yuqori difraktsiya tartibini jamlash mumkin. Agar panjaralar 5 dan 10 gacha bo'lgan diapazonning ishchi tartibini ishlatilsa, unda bu panjaralar eshellet deb nomlanadi. 10dan ortiq (70 tagacha) difraktsiya tartibiga ega panjaralar eshelle deb nomlanadi[10].

Spektral qurilmalarda tekis difraktsion panjaralarga qo'shimcha ravishda, tarqoq elementning funktsiyalarini, kollimator va kamera ob'ektivlarini birlashtirgan egri difraktsion panjaralar ko'pincha ishlatiladi. Spektral qurilmalarda bu turdagi panjaralar bilan jihozlangan bo'lib, faqatgina kirish tirqishchasiga qo'shimcha ehtiyoj bor.



8.29-rasm. Profillangan difraktsion panjara

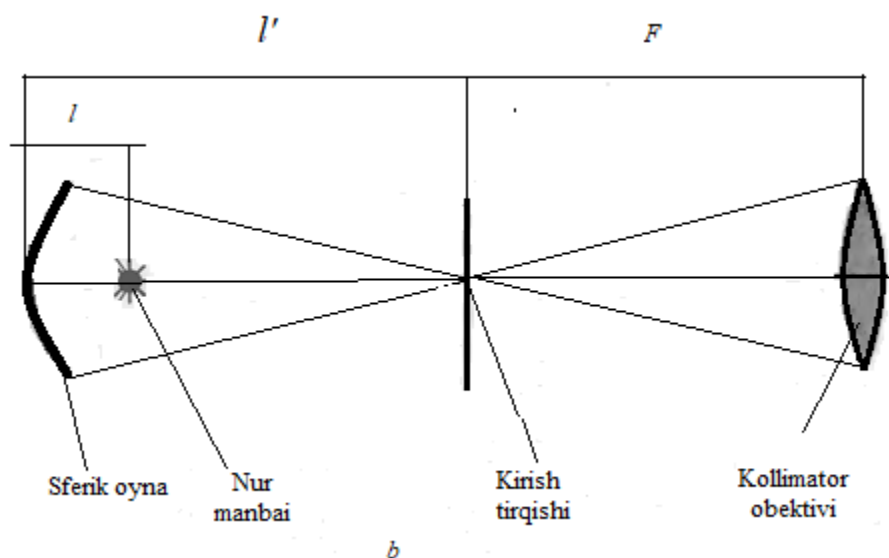
Spektral analiz qurilmalarining konstruksiyasi nurlanish manbasidan nurlanishni spektral asbobning kirish tirqishiga yo'naltirishni o'z ichiga oladi. Yorug'lik manbai kirish tirqishidan bir oz masofada joylashgan. Yorug'lik nurni fokuslash uchun tirqishda sharsimon ko'zgular yoki kondensatorlar ishlatiladi.

Spektral asbobni samarali ishlashi uchun kirish tirqishini yoritganda ikkita talab bajarilishi kerak [10].

1. Spektral qurilma ichiga kiradigan yorug'lik nurlari kollimator ob'ektivining kesimini to'liq to'ldirishlari kerak. Ushbu talabni bajarish disperslash elementining hal qiluvchi kuchi va yorqinligini maksimal qiymatiga etkazishga imkon beradi.

2. Kirish katlamining tekisligida hosil qilingan yoruqlik manbai tasvirining yorqinligi imkon qadar yuqori bo'lishi kerak.

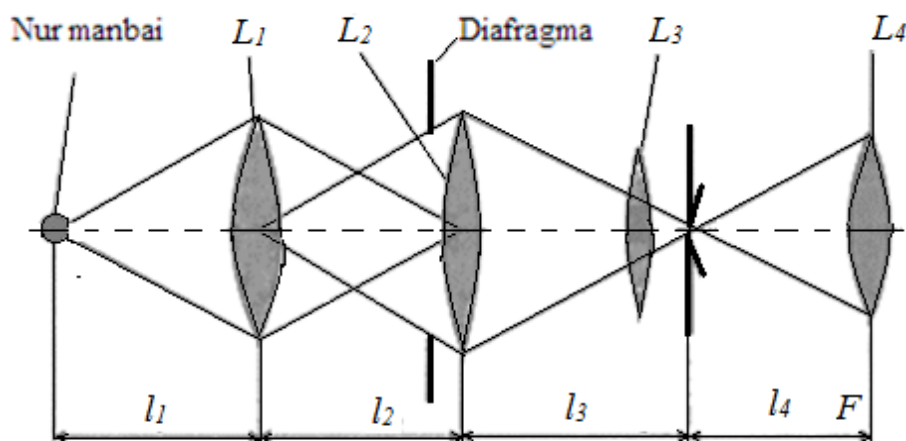
Amalda, spektral asbobning kirish qismining yoritilishi linzalar yoki sharsimon oynalardan yordamida amalga oshiriladi (8.30-rasm). Linzadan farqli o'laroq, oyna kondensator spektrining har qanday oblasti uchun foydalanish mumkin. Bitta linzali va oynali kondansatorlarin kamchiligi, yorug'lik manbaining fazoviy notekisligi kirish uyasiga ko'chiriladi. Natijada yorig' bir tekis yoritilmaydi va spektral chiziqlar uzunligi bo'ylab teng bo'lmagan yorug'likka ega bo'lib, ularni fotometrlash qiyin kechadi.



8.30-rasm. Spektral qurilmaning kirish tirqishini yupqa linza (a) va sferik oyna (b) bilan yoritish sxemasi.

Odatda uchta linzali kondensatorlar kirish tirqishini yoritish uchun yaxshi natijalar beradi. Bunday kondansator sxemasi 8.31-rasmda ko'rsatilgan.  $L_1$  linza nur manbaini kattalashtirilgan tasvirini  $L_2$  linza tekisligida fokuslaydi. Ikkinchi

linza oldida kattalikni o'zgartiradigan diafragma D o'rnatilgan bo'lib, bu zarurat bo'lsa, nur manbai tasvirining biron bir qismini kesib olish imkonini beradi.



8.31-rasm. Uch linzali kondensator

Ikkinchi linza  $L_1$  linzaalari tasvirini  $L_3$  linzalari tekisligida loyihalashtiradi, bu esa  $L_4$  kollimator linzalari tekisligida D diafragmani kengaygan tasvirini aks ettiradi.

To'g'ri sozlash bilan uch linzali kondensator spektral asbobning chiqishida yuqori sifatli spektrni olish imkonini beradi.

## 8.6. Spektrlarni qayd etish

Spektral asbobdan olingan spektr qayd etilishi kerak. Spektrlarni ro'yxatga olish uchta usulda amalga oshirilishi mumkin: vizual, foto va fotoelektr. Vizual va fotografik usullar faqat atom emissiya tahlillarida qo'llaniladi. Fotoelektr usuli spektral tahlilning barcha turlarini (AECA, AACA, AFCA) amalga oshirishda ishlatiladi.

Spektrni vizual tarzda qayd etganda, ovoz yozish asbobining vazifasi inson ko'zlari tomonidan amalga oshiriladi. Shubhasiz, bu ro'yxatga olish usuli sub'ektivdir. Biror kishi bir spektral chiziqning intensivligidan necha barobar ko'proq ekanligini taxmin qila olmaydi. Chiziqlar bilan solishtirish uchun ularni bir-biriga yaqin joylashtirish kerak. Bunday holda, faqat yorug'lik oqimlarining tengligi yoki tengsizligini aniqlash mumkin.

Spektrni vizual qayd etish uslubi stilometrlar amalga oshiriladi, bu ularning soni atom emissiya spektr analizi uchun spektral asbob hisoblanadi. Stilometrlarda miqdoriy tahlil qilish imkoniyati optik ponalardan foydalanishga asoslangan bo'lib, ular bir-biriga nisbatan ko'proq jadal spektrli chiziqlar yoruqlik oqishini kamaytirishga imkon beradi. Optik ponalar yoruqlik oqimining engillashtiruvchi shkalasiga ega. Vizual tenglikka erishilganda, tahlil qilingan spektral chiziqlar



intensivligi spektroanalitik gradusli zaiflashuv o'lchovidan foydalanib, intensivlik nisbatlarini baholash qobiliyatiga ega

Spektrni vizual qayd qilish stiloskoplarda ham amalga oshiriladi. Stilometrlardan farqli o'laroq, stiloskoplarda optik ponalar yo'q, shuning uchun ularda miqdoriy tahlil printsiptial mumkin emas. Vizual qayd etish usulining asosiy afzalligi uning soddaligi va yuqori amalga oshirish tezligi.

Ko'pgina spektral tahlil vositalari tahlil qilingan spektrlarni qayd etishda fotosurat usuli qo'llaniladi. Ushbu uslubning afzalligi - fotosurat olish va undan keyingi arxivlash imkoniyatidir. Agar kerak bo'lsa, fotosurat arxivdan olinadi va undan keyin tahlil qilinadi. Ushbu ro'yxatga olish usuli juda ko'p informatsiya berish qobiliyatiga ega. Bir fotografik plastinkada 200 dan 500 nm to'lqin uzunligiga ega nurlanish spektri qayd etilishi mumkin. Elementning tarkibi spektral analiz natijalarining ishonchliligini oshiradigan ikki yoki undan ko'p spektrli chiziqlar bilan tahlil qilinadi.

Fotografik spektrlarning ro'yxatga olish texnologiyasidan foydalangan holda miqdoriy o'lchovlar fotosurat yoki foto plitasining fotoemulsion qatlamiga va uning tarkibidagi kumush bromidning metallga tushirilishiga ta'sir qiladi. Ta'mirlash jarayoni ishlab chiqaruvchilardan fotoplenkani (fotosurat plastinkasi) qayta ishlash jarayonida yuzaga keladi. Miqdoriy baholash mikrofotometr yordamida amalga oshiriladi, bu foto qatlamning qoraytirilgan uchastkani zichligini o'lchash imkonini beradi, bu kumushning kamaytirilgan miqdoriga proporsionaldir.

Tahlil qilish uchun foydalaniladigan fotosuratlarning o'ziga xos xususiyatlaridan biri uning spektral nurlanishiga sezgirliги hisoblanadi. Fotoemulsion qatlamlari jelatin qatlamlarini bir tekisda taqsimlangan kumush bromidli kristalllaridan ibora bo'lib, u 210 dan 550 nm gacha to'lqin uzunligi oralig'ida sezgirdir. Agar nurlanishda uzunligi  $\lambda < 200$  nm bo'lgan to'lqinlar bo'lsa, bu holda jelatinsiz emulsiyalar qo'llaniladi. Bunday qatlamlarga ega bo'lgan fotoplastinalar shumanovli deb ataladi [15].

Spektrlarning fotoelektr qaydnomasi fotosamarador xodisasidan foydalanishga asoslanadi. Ushbu fotosamarador xodisasi qayd etiladigan elektron qurilmalar, fotoelementdir (FE). Fotoelemendagi fotokatodni yoritilganda hosil bo'ladigan tok kuchi tushayotgan yoruqlik oqimining kuchiga proporsionaldir. Kichkina yoruqlik oqimlarining fotometrlash uchun fotoelektrtron ko'paytirgichlar (FEK) ishlatiladi, bu fototok qiymatini  $10^8$ - $10^{10}$  marta ko'paytirish imkonini beradi.

Fotoelemenlarda va fotoelektron ko'paytirgichlarda tashqi fotosamarador hodisa ishlatiladi. So'nggi yillarda ichki fotosamarador xodisasini ishlatadigan yarimo'tkazgich qurilmalari keng qo'llaniladi. Optik tasvirlarni idrok qilish uchun ishlatiladigan qurilmalar zaryadlangan qurilmalar (CCD) hisoblanadi. Chiziqli (bir

o'lchamli) va matritsali (ikki o'lchamli) PZD zaryadlangan qurilmalar mavjud. Chiziqli CCDlar bir qatorda joylashgan kvadrat yoki to'rtburchak shakli fotodiod yacheykalar tizimidir. Ikki o'lchamli matritsa satrlar va ustunlar shaklidagi tartibga solingan yacheykalardan iborat.

Zaryadlangan qurilma spektrograf kamera ob'ektivi fokal tekisligida joylashtirilgan. Sozlagich tomonidan olingan spektr ma'lumoti zaryad bog'langan qurilmaning nazorat qilish tizimiga ulangan kompyuterga o'tkaziladi. Bu spektr qaydlarini va matematik ishlov berish tezligini oshiradi. qabul qilingan ma'lumotlar kompyuterning xotirasida saqlanadi.

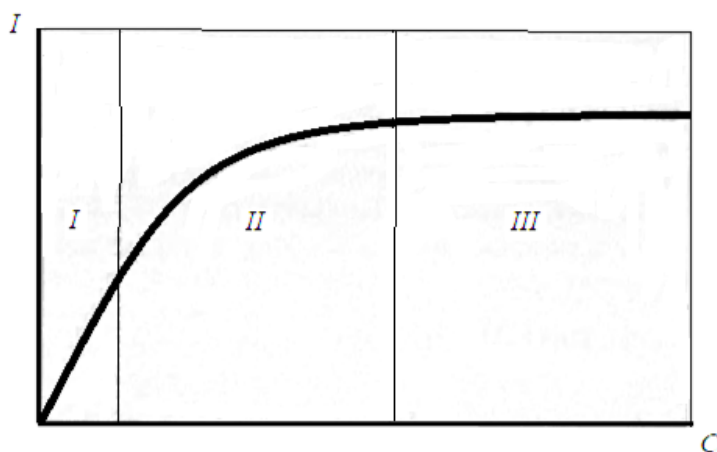
## 8.7. Atom-emission spectral taxlil

AECT - eng keng tarqalgan usul. Uning afzalliklari:

- qattiq, suyuq va gazli moddalarni tahlil qilish qobiliyati;
- deyarli barcha kimyoviy elementlarning tahlili;
- elementlarning kamligini aniqlash chegaralari;
- arzon narxlar tahlil qilish;
- tahlil qilish qulayligi.

Ushbu turdagi tahlillarni ta'minlovchi vositalar spektrograflar, spektroskoplar va turli modifikatsiyalashgan spektrometrlar hisoblanadi. Foydalanilgan analitik vositalar turiga muvofiq, atom emissiya tahlillarini o'tkazish usullari uch guruhga bo'linadi:

- spektrografik;
- vizual;
- spektrometriya.



8.32-rasm. Spektral chiziq  $I$  ning yorug'lik man'bai plazmasida element konsentratsiyasiga bog'liqlik «egri chizigi»

Eng qimmatli - tahlil qilingan elementlarning miqdoriy tarkibini aks etadigan natijalar. Miqdoriy tahlil qilish imkoniyati spektr chiziqining yorug'lik manbasining plazmasidagi kimyoviy element tarkibiga bog'liqligiga asoslangan. Grafik jihatdan o'sishga egrisi deb atalgan ushbu bog'liqlik 8.32-ramda ko'rsatilgan. Ushbu egri bo'yicha uchta sohani ajratish mumkin. Birinchidan, kichik elementlar kontsentratsiyasiga mos keladigan bo'lsak, spektral chiziqning  $J$  intensivligi element elementining tarkibiga  $N$  to'g'ri qo'shilib boradi. Ikkinchi bo'limda esa chiziq to'g'ri chiziqdan farq qiladi. Bu spektr chiziqining o'ziga singib ketishi bilan bog'liq. Uchinchi qismda spektral chiziqning o'z-o'zidan singib ketishi yanada yuqori darajaga chiqariladi. Buning sababi shundaki,  $J$  intensivligining oshishi deyarli to'xtaydi.

$$J = aC^b \quad (8.12)$$

bu erda  $C$  - namunadagi kimyoviy elementning kontsentratsiyasi,  $a, b$  - variatsion parametrlardir.

### 8.7.1. Spektrografik taxlil

Sifatli, yarim-miqdoriy va miqdoriy spektrografik taxlillari mavjud. Sifatli spektr analizi uchta turdagi amaliy muammolarni hal qilishga imkon beradi [10].

1. Umumiy sifatli tahlil (namunadagi namunaviy tarkibni aniqlash).

2. Xususiy sifatli tahlil (namunadagi bir yoki bir nechta elementlarning mavjudligini yoki yo'qligini aniqlash).

3. Elementlar izlari sifatini tahlil qilish (ifloslanish yoki nopok elementlarining mavjudligini aniqlash).

Sifatli atom emissiya spektr analizi ko'pincha yorug'lik manbai sifatida yoy yordamida amalga oshiriladi.

Bu yorug'lik manbai sizning aksariyat kimyoviy elementlarning rezonans spektr chizig'ini qo'zg'atishga imkon beradi.

Kukun shaklidagi namunalarni atom emissiya spektral tahlilida spektr ta'sir qilish vaqtini bir necha oraliqlarga ajratish tavsiya etiladi, masalan, to'rtta [10]. Pastki uglerod elektrodining kanalida massasi 10 ... 50 mg bo'lgan kukun joylashtiriladi. Ikkinchi elektrod konusli qilib charxlanadi. Yoy elektrodlar orasidan yonadi, namunalar yoyda bug'lanadi. Ekspozitsiyani birinchi bosqichi 15...20 s davom etadi. Ushbu vaqt mobaynida engil uchuvchi elementlarning spektri qayd etilgan. Ekspozitsiyani ikkinchi bosqichining davomiyligi ~ 20-30 s, uchinchi - 30-40 s, to'rtinchi - namunani to'liq bug'lanib ketgunga qadar. Shunday qilib, bitta namunadan to'rtta spektrni olinadi, bu tahlil qilingan elementlarning yoki birikmalarning uchuvchanligi to'g'risida ma'lumot berishga imkon beradi.

Vazifa qandaydir elementlarning «izlari» ni, ya'ni tarkibidagi namunadagi juda kichikligini aniqlash bo'lsa, spektrni rasmga olish tartibi tubdan o'zgartirilmaydi. Ammo, xatolarni bartaraf etish uchun, uglerod elektrodlarini oldindan kuydirish tavsiya etiladi. Ushbu operatsiyani bajarishdan maqsad elektrodلarni elementلarning izlaridan tozalash imkonini beradi. Atom emissiyasi tahlilidan oldin elektrodلarda qaysi kimyoviy elementلarning mavjudligini aniq bilish uchun avvalo uglerod elektrodلari spektrini olish va shu elektrodلar yordamida olingan namunaviy spektr bilan taqqoslash zarur.

Agar sifatli emissiya tahlillari davomida vazifa metall va qotishmalarning tarkibini aniqlash bo'lsa, unda bu holda tanlangan namuna pastki elektrod vazifasini bajaradi. Spektr qo'zg'alishi odatda o'zgaruvchan tok yoyida amalga oshiriladi. Yoyda tok kuchi ~5...10A tashkil qiladi. Monolitik namunalarni o'rganishda ularning dastlabki uchqun hosil qilish ishlari olib boriladi. Spektrni bosqichma-bosqich rasmga olish odatda qo'llanilmaydi.

Tahlil qilish uchun o'rta dispersiyalash moslamalari, masalan, ISP-22, ISP-28, ISP-30 tipidagi spektrograflar va difraktsion panjaralar bilan jihozlangan yirik dispersiyalash vositalari: DFS-8, DFS-13 ishlatiladi.

Olingan spektrlarning talqini spektroskop yordamida amalga oshiriladi. Tahlil qilish uchun spektral chiziqli atlaslar ishlatiladi. Atlas tarkibida temir spektrning alohida zonalarini joylashgan fotosuratلarga ega 20 ga yaqin jadval mavjud. Planshetلarda elementلarning eng intensiv spektr chiziqlari xolatiga mos keladigan to'liq uzunliklari va nozik shtrixlari mavjud. Shtrixlar elementلarning to'liq uzunligini va yuqori indeks o'rnida spektr chiziqlaridagi intensivlik indekslarini ko'rsatadi.

Yarim miqdoriy tahlil turli usullar bilan amalga oshirilishi mumkin [10]:

- spektral chiziqlar paydo bo'lishi va kuchaytirilishi usuli;
- spektrlarni solishtirish usuli;
- spektral chiziqlarni bosqichma-bosqich susaytirish usuli (Klera usuli).

Zamonaviy miqdoriy tahlil usullarining asoslari aniqlanadigan elementning spektral chiziqlaridagi nisbiy intensivligini va namunadagi taqqoslama elementni o'lchash hisoblanadi. Aniqlanadigan element intensivlik chiziqini  $I_1$ , bilan  $I_2$  bilan esa solishtirish chiziqlari intensivligini belgilaymiz. Agar taqqoslash elementining konsentratsiyasi doimiy qiymat sifatida qaraladigan bo'lsa, Lomakin-Shaybe tenglamasi (8.12) ga nisbatan nisbatan intensivlik quyidagi ifoda bilan aniqlanadi:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{aC_1^b}{I_2} \quad (8.13)$$

Ushbu ifodani logaritmik shaklda yozamiz:

$$\lg \frac{I_1}{I_2} = \lg C_1 + \lg a' \quad (8.14)$$

бунда

$$\lg a' = \lg \frac{a}{I_2} \quad (8.15)$$

Spektrlarning yozuvini suratga olayotganda,  $S_1$ -elementining chiziqlarining optik zichligi va  $S_2$  -taqqoslash elementi quyidagilar:

$$S_1 = \gamma_1 \lg I_2 \quad (8.16)$$

$$S_2 = \gamma_2 \lg I_2 \quad (8.17)$$

bunda  $\gamma_1$  va  $\gamma_2$  kontrast koeffitsientlari.

Yaqindan joylashtirilgan chiziqlar uchun fotoemulsiyaning xossalari deyarli bir xil, ya'ni  $\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma$  deb hisoblanadi. Keyin qorayishning optik zichlikdagi farq quyidagicha bo'ladi:

$$\Delta S = S_1 - S_2 = \gamma \lg \frac{I_1}{I_2} \quad (8.18)$$

$$\frac{\Delta S}{\gamma} = \lg \frac{I_1}{I_2} \quad (8.19)$$

Formulaga (8.14) ifodani (8.19) o'rniga qo'yamiz, spektrrafik miqdoriy analiz usuli uchun asosiy tenglama olinadi:

$$\Delta S = S_1 - S_2 = \gamma b \lg C + \gamma \lg a' \quad (8.20)$$

Chiziqlarning analitik juftlarini qorayishini o'lchash mikrofotometr yordamida amalga oshiriladi. Etalonlar yordamida olingan  $\Delta S - \lg C$  egri chiziqi darajalash grafigi deb ataladi.

Amalda, spektratik analizning bir nechta turlari qo'llanilishi mumkin.

**Uchta uslublar usuli**- analitik chiziqlarning nisbiy qoralanishi va namunadagi element kontsentratsiyasining logaritmasi orasidagi munosabatlardan foydalanishga asoslangan. Usulning mohiyati shundaki, bitta fotografik plastinkada kamida uchta standart va spektrlarni tahlil

Qilanadigan namuna olingan.  $\Delta S - \lg C$  koordinatalarida fotometriya natijalariga ko'ra, kalibrlash egri chiziladi. Uni qurishda, to'g'ri o'lchovni tanlash juda muhimdir.

Uchta standart usulning afzalligi shundaki, usul universal va oddiy. Ko'p sonli namunalarni bir vaqtning o'zida tahlil qilish uchun uni ishlatish qulay.

**Bir standart usuli.** Uch standartlar usuli soddalashtiriladi, agar spektral chiziqlar analitik juftlik bir xil bo'lsa, ya'ni  $\Delta S = 0$  teng. Asosiy tenglamadan  $\Delta S = \gamma b \lg C + \gamma \lg a$  olinadi.

$$\gamma \lg C_0 = -\gamma \lg a' \quad (8.21)$$

Shunday qilib,  $\lg C$  ning qiymati  $\gamma$  ning fotoemulsiya kontrast koeffitsientiga va koordinatali nuqtaga bog'liq emas,  $\Delta S = 0$  va  $\lg C_0$  belgilangan bo'ladi.

$C_0$  - bu kontsentratsiya, unda  $\Delta S = 0$ . Bunday nuqtaning mavjudligi boshqa plastinada daraja grafini ?urishda standartlar sonini kamaytirish imkonini beradi. Belgilangan elementning kontsentratsiyasi bilan faqat bitta standart qo'llaniladi, bu  $C_0$  dan farqli o'laroq yuqorida aytib o'tilgan nuqtadan farq qiladi. Shunday qilib, uchta standart usuli yagona standart usuliga aylanadi.

**Doimiy grafikalar usuli.** Doimiy grafika usulining mohiyati  $\lg \frac{I_1}{I_2} - \lg C$  koordinatalarida oldindan qurilgan daraja grafigidan foydalanish hisoblanadi. Intensivlik I hisoblashda kontrast koeffitsientiy ishlatiladigan fotometrik plastinka xususiyatlarini hisobga oladi. Daraja grafigi ko'plab standartlarga (bir necha o'nlab) asosan qurilgan. har bir standartning spektri bir xil sharoitda bir necha marta suratga olinadi, natijada o'lchash natijalari to'planadi, keyinchalik ular o'rtacha va o'rtacha qiymatlar uzoq vaqt ishlatiladigan grafik qurish uchun ishlatiladi. Biroq, vaqti-vaqti bilan uni tekshirib turish kerak. Tekshirish uchun standart namunalardan foydalaniladi. Doimiy grafikaning analitik ifodasi quyidagi ko'rinishda:

$$\lg \frac{I_1}{I_2} = \frac{\Delta S}{\gamma} = \lg C + \lg a' \quad (8.22)$$

**Nazorat etaloni (standart) bilan doimiy darajalash grafigini korrektsiya qilish usuli.** Doimiy grafika usulining kamchiligi, spektrlarning qo'zg'alishi sharoitida nazoratsiz o'zgarishlar hisobga olinmasligi hisoblanadi. Bu darajalash grafigini parallel siljishiga olib keladi. quyidagi usul grafikaning o'rnini belgilashga imkon beradi: namunalarning spektrlari bilan bir vaqtda, boshqaruvning nomi berilgan etalonning spektri suratga olinadi, u nazorat deyiladi. Nazorat etaloniga mos keladigan nuqta orqali, darajalash grafigiga parallel ravishda to'g'ri chiziq o'tkaziladi. Shu tarzda qo'lga kiritilgan grafik, qattiq grafik, uslub o'z navbatida qattiq grafik usuli yoki nazorat etaloni (standart) deyiladi.

### 8.7.2. Spektroskopik (vizual spektral) tahlil

Vizual spektral tahlil asosan metallar va qotishmalarni o'rganish uchun ishlatiladi. Ushbu usul yordamida echim topilgan asosiy vazifalar - qotishma elementlarning tarkibini nazorat qilish, sotib olinadigan materiallarni kiritishni nazorat qilish va ishlab chiqarish jarayonida qotishmalarning tez ajratish. Spektroskopik tahlilning eng muhim afzalliklari metodik soddalik, tadqiqotning yuqori tezligi, nisbatan past narxlardagi xarajatlar hisoblanadi. Odatda, vizual spektral analizni o'tkazish uchun mo'ljallangan qurilmalar o'zgaruvchan tok yoyi

va kondensatsiyalashgan uchqun kabi yorug'lik manbalari bilan yakunlanadi. Ushbu manbalar asosan metall materiallarni tahlil qilish uchun mo'ljallangan.

Spektroskopik tahlilni amalga oshirayotganda nurlarni qabul qiluvchi inson ko'zidir. Shunday qilib, amalga oshirilgan tahlillar sub'ektiv xarakterga ega. Vizual spektral tahlil asosan prizma vositalari - spektroskoplar yordamida amalga oshiriladi. Spektroskoplar ikki guruhga bo'linadi: stiloskoplar va stilometrlar.

Stiloskoplardan farqli o'laroq, stilometrlar nafaqat qo'lga kiritilgan spektrlarni o'rganish, balki spektral chiziqlardagi nisbatan intensivliklarni o'lchashga ham imkon beradi. Stilometrlar bir vaqtning o'zida ikkita spektral chiziqni kuzatish imkonini beradi: analitik chiziq va taqqoslash chiziqlari. Fotometrik pona yordamida, mos yozuvlar chiziqlar intensivligi analitik chiziqning intensivligiga teng bo'lmaguncha zaiflashadi. Fotometrik pona sizga taqqoslash sathining zaiflash koeffitsientini aniqlash imkonini beradi. Raqam sifatida, susaytirish koeffitsienti analitik chiziq intensivligining nisbatlariga va taqqoslash chizig'iga tengdir.

### **8.7.3. Spektrometrik taxlil**

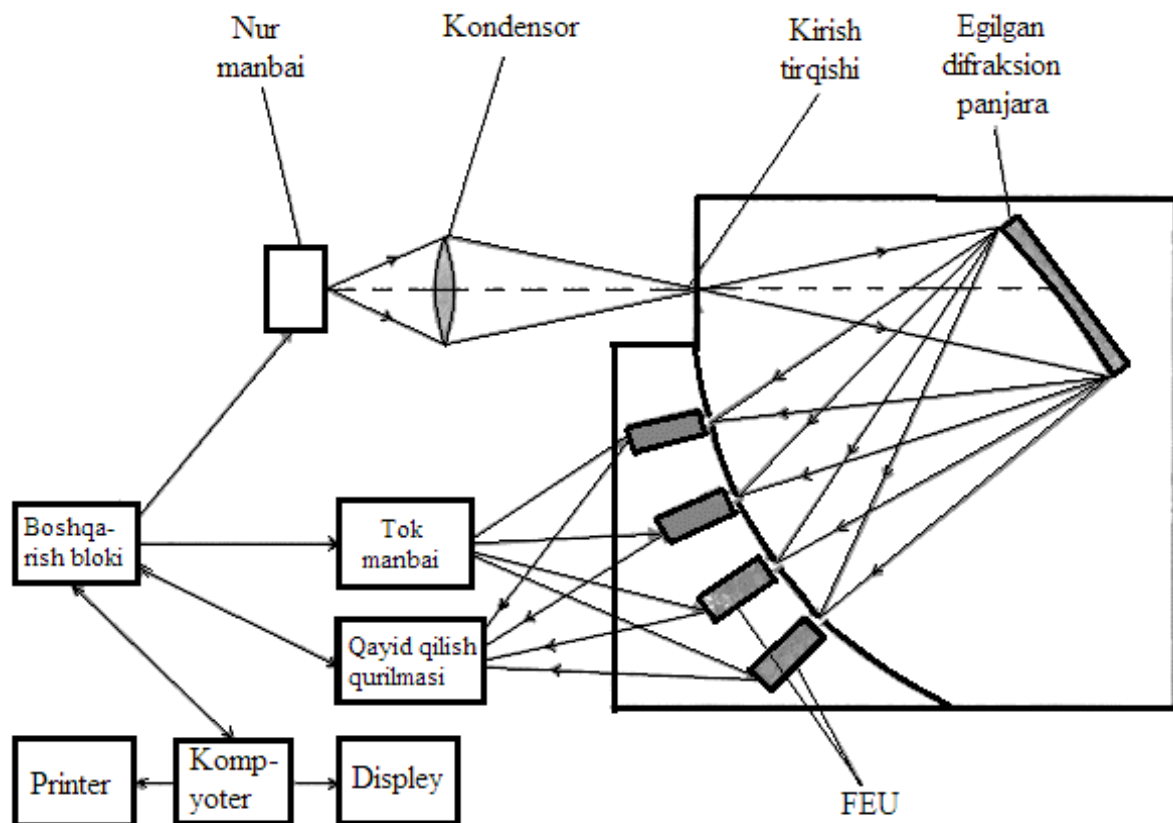
Vizual spektral tahlildan farqli o'laroq, spektrometrik analiz tahlil qilinayotgan namunadagi kimyoviy tarkibni kuzatish uchun ob'ektiv usul hisoblanadi. Buning eng muhim afzalligi ham samaradorlikdir. Ushbu usulning o'ziga xos xususiyati, uning to'liq avtomatlashtirishiga, jumladan, analitik signalni kompyuterda ishlashga va tahlil natijalarini chiqarishga imkon beradi.

20-asrning 40-yillarida ARL va Baird ko'p kanalli qurilmalarni ishlab chiqdilar, keyinchalik ular "kvantometr" nomini oldi. Kvantmetrdagi spektral asboblardan bitta kirish va ko'p (yuzga yaqin) chiqish tirqishiga ega polixromatorlardir. Chiqish tirqishlariga fotoelementlar va fotoelektron ko'paytirgichlar o'rnatilgan (8.33-rasm). Kirish va chiqish joylari Rowland doirasida joylashgan. Disperslovchi element bo'lib,  $\sim 1$  m egrilik radiusi bo'lgan difraktsion panjara xizmat qiladi.

Fotoelektron ko'paytirgich chiqish tirqishi orqasida joylashgan. Barcha kvantomer ishi kompyuter tomonidan boshqariladi. Bundan tashqari, FEU dan signallarni ishlaydi, konsentratsiyani hisoblab chiqadi va ularning xatolarini tahlil qiladi.

Ba'zi qurilmalar juda ko'p sonli chiqish tirqishlari bo'lgan polixromatorlar bilangina emas, balki skanerlovchi monoxromatorlar bilan ham jihozlangan. Skanerlovchi monoxromatorlar butun spektrni izchil ko'rib chiqish va fotometriya qilish imkonini beradi. Biror bir qurilma ichida polixromator va monoxromatorning kombinatsiyasini mavjudligi olingan natijalarning

ishonchliligini sezilarli darajada oshirishi mumkin.



8.33-rasm. Kvantomer sxemasi

So'nggi 15-20 yillarda kamera ob'ektivining fokal tekisligida o'rnatilgan, fotodiod matritsali spektrometrlar ishlatilmoqda. Ushbu matritsalar PZS-kartalar degan nom olgan. Fotodiodli matritsalar bilan jihozlangan qurilmalar, fotoelektrik ro'yxatga olish va spektrlarni fotoplastinalar yordamida qayd qilish afzalliklariga ega.

## 8.8. Atom- absorbsion spektral tahlil

Atom absorbsion spektral tahlillari materiallarni o'rganish uchun juda sezgir usuldir. qo'llaniladigan elementlarning aniqlangan chegarasi  $10^{-12}$  g tashkil etadi. Bu tahlil usuli suyuqlik materiallarini samarali tekshirish imkonini beradi. qattiq holatda bo'lgan materiallarni o'rganish uchun ular odatda oldindan suyuqlantiriladi.

Atom absorbsion analiz asboblari asosiy tashkil etuvchilari bo'lib, yorug'lik manbalari, monoxromatorlar va ularning asosiy tarkibiy qismlari o'rtasida joylashgan namuna atomizorlar hisoblanadi. Ushbu asboblardagi yorug'lik manbai atom nurlanishning xarakteristik emissiyasi uchun zarur. Monoxromator ushbu nurlanishdan aniqlangan elementning bir rezonans chiziqini ajratadi. Ushbu chiziq

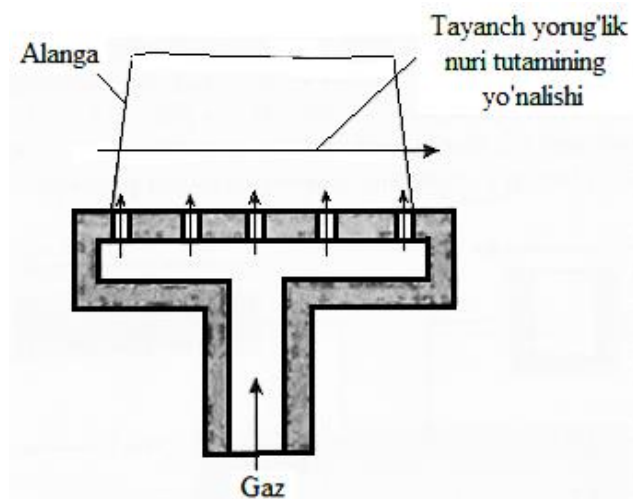


absorbsiyani o'lchash uchun zarur bo'lgan tayanch nurlanishni ifodalaydi. Nur manbai va monoxromator o'rtasida joylashgan atomizatorida analiz qilinadigan namunani atomizatsiya qilinadi.

Qurilmaning mohiyati, tayanch nurlanish intensivligini, ya'ni monoxromator tomonidan chiqarilgan rezonans chiziqlarining intensivligini o'lchashdir. Bu o'lchov ikki marta amalga oshiriladi. Avval, nurlanish intensivligi atomizatorida namuna bo'lmagan paytda va keyin atomizatsiyalashgan namunali mavjud bo'lgan paytda baholanadi. Tayanch nurlanish intensivligi ushbu o'lchovlarda olingan farqning miqdori aniqlanadigan elementning atomlari tomonidan nurning absorpsiyasini xarakterlaydi.

Atom-absorbtсион tahlilini amalga oshirish uchun mo'ljallangan qurilmalarda muhim funktsiyani yuqorida ko'rsatilgan atom tiqilgichlar (zatoro`) bajaradi. Ushbu qurilmalar namunalarni bug'latish va atomlashtirish uchun zarur. Amalda bir necha turdagi atomizatorlar ishlatiladi.

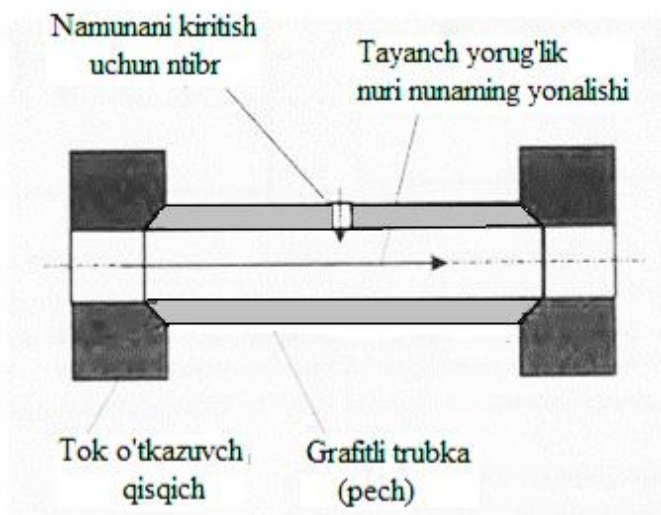
Qurilmaning eng oddiy qurilmasi alanga atomizatoridir. Bu turdagi asboblarda alanga olish uchun foydalaniladigan gazlar sifatida havo-atsetilen, azot oksidi-atsetilen, azot oksidi-propan, havo-propanidan foydalaniladi. Namuna atomizator alangasiga suyuqlikning purkash orqali kiritiladi. Atomik absorbtсион spektral taxlilda ishlatiladigan alanga gorelkalarining xususiyati spektral qurilmaning optik o'qi bo'ylab (yo'naltiruvchi nurlanish chizig'i yo'llari bo'ylab) ortib borayotgan o'lchamdir. Konstruktiv tarzda, bu gorelkada tirqishlarlar sonini ko'paytirish orqali erishiladi (8.34-rasm).



8.34-rasm. Atom- absorbtсион spektral taxlil uchun ko'p tirqishli gorelka

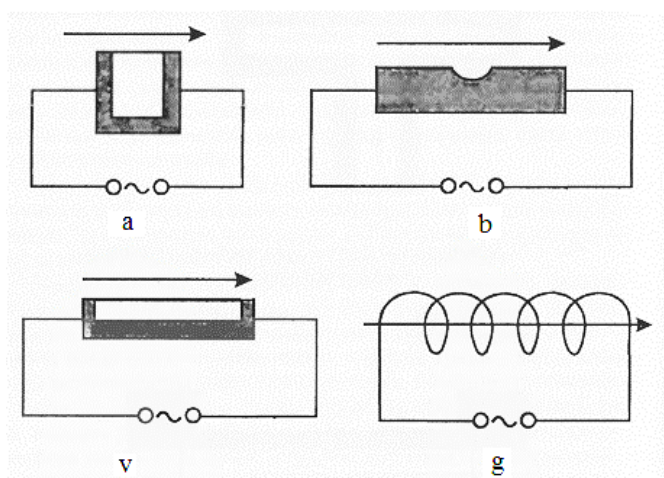
Zamonaviy atomik absorbtсион spektrofotometrlari elektrotermik namunalari atomizatorlari bilan jihozlangan. Ularning birining konstruksiyasi 8.35-ramda ko'rsatilgan. Atomizator grafitli trubkadan (pechka) iborat bo'lib, uning uzunligi

30-50 mm va diametri 3...8 mm dan va suv bilan sovutiladigan elektr o'tkazuvchan kontaktlarda iborat. Taxminan 1...100 ml hajmli suyuqlik tomchisi shaklidagi tahlil namunasi pechga maxsus teshik orqali yuboriladi. qurilmani qizdirish uch bosqichda elektr tokini o'tqazish bilan namunani bir tekis quritish ta'minlanadi. Zamonaviy qurilmalar belgilangan har bir bosqichda haroratni nazorat qilish imkonini beradi.



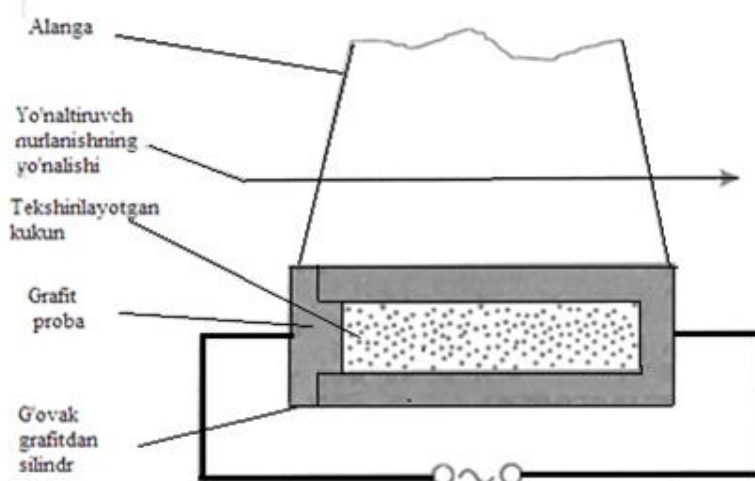
8.35-rasm. Grafit pechli elektromexanik atomizator

Quvurli pechkaning bo'shlig'idagi harorat 3300 K ga etishi mumkin. Bunday sharoitlarda kislorod ta'sir qilish sababli qurilma tezda ishdan chiqishi mumkin. Pechni ko'p marotaba ishlatish maqsadida uni kamera ichiga joylashtiriladi va orqali argon gazi yuboriladi. Ba'zi hollarda, gaz muhofaza qilmasdan ishlaydigan, ya'ni havo muhitida ishlaydigan elektrotermik atomizatorlar foydalanish mumkin. qurilmaning sxematik ko'rinishi 8.36-ramda. Tahlil qilinayotgan namunalar tigelga, qayiqchaga yoki volfram simga joylashtiriladi.



8.36-rasm. Ochiq turdagi elektrotermik atomizatorlar: tigeli (a), sterjenli (b), qayiqchali (v) va volfram spiralli (g) (strelka tayanch yorug'lik nurini yo'nalishini bildiradi)

Kukunli materiallarni tadqiq qilish uchun olov va elektr isitish moslamasi bilan jihozlangan kombinatsiyalangan turdagi atomizatorlar ishlatilishi mumkin (8.37-rasm). Tahlil qilinuvchi kukun, g'ovak grafitda tayyorlangan silindir ichiga joylashtiriladi. Silindr tuynuki grafit qopqoq bilan yopiladi. Silindr yoriq gorelkasi alangasiga o'rnatiladi. Elektr qizdirish boshlangandan so'ng kapsuladagi namunalar bug'lanadi. hosil bo'lgan par grafit g'ovakligi orqali gazlangan alangaga kiradi, qaysiki u erda tahlil qilingan elementning atomizatsiyasi amalga



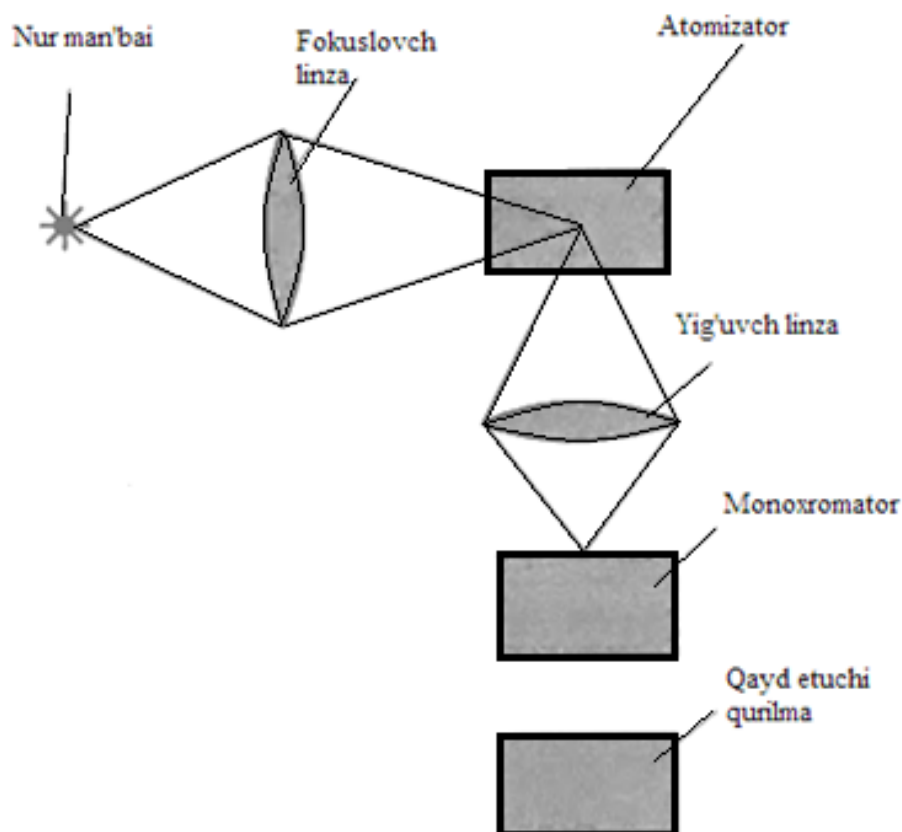
8.37-rasm. Kombinatsiyalashgan atomizator

oshiriladi. Monolitik metall namunalarini atomizatsiya qilishda gazni razryad qilish atomizatorlarida amalga oshirilishi mumkin. Amalda, tekis yoki ichi bo'sh katodli qurilmalar qo'llaniladi. Ishchi gaz funksiyasini argon bajaradi.

### 8.9. Atom-fluorestsent spektral taxlil

Yuqorida aytib o'tilgan atom spektral analiz usullari bilan taqqoslaganda, atom-fluorestsent tahlillari juda kam qo'llaniladi. Shunga qaramasdan, bu usul ham ba'zi afzalliklarga ega. Misol uchun, agar lazer mos yozuvlar nurlanishini olish uchun ishlatilsa, bu usul tahlilning yuqori sezuvchanligini ta'minlaydi.

Atom- fluorestsent fotometrning blok 8.38-rasmda keltirilgan. qurilmada yorug'lik manbai, fokuslovchi linzalari, atomizatorlar, yig'uvchi linzalar, monokromator va ro'yxatga olish qurilmalari mavjud. Yorug'lik manbasidan nurlanish atomizatorga yuboriladi, u atom gazi ishlab chiqarishga xizmat qiladi. Atomizorga kiradigan nurlanish atom gazi tomonidan rezonans ravishda so'riladi va keyinchalik elementning atomlari tomonidan barcha yo'nalishlarga qayta tarqaladi. Fluorestsentni ro'yxatdan o'tkazish (yo'naltirish) mos yozuvlar nurlarining yo'nalishiga to'g'ri burchak ichida amalga oshiriladi. Bu funktsiya to'plash linzalari, monokromator va fotoelektronik yozish qurilmasi tomonidan ta'minlanadi.



8.38-rasm. Atom-fluorecsent spektrometrni blok-sxemasi

Spektral tahlil usuli kashf qilingandan buyon u uzoq vaqt davomida turli yo'nalishlarda jadal rivojlanib borgan. Uslubni ishlab chiqishning asosiy bosqichlari - spektrlarning qo'zg'alishining yangi samarali manbalari, katta o'lchamdagi mukammal difraktsion panjara ishlab chiqish, nazorat va o'lchash jarayonlarini avtomatlashtirishni ta'minlovchi kompyuter texnologiyasini joriy qilish, robotli namunalarni tayyorlash tizimlarini joriy etish.

Hozirgi kunda bu usuldan foydalanmasdan zamonaviy metallurgiya mahsulotlarini tasavvur qilish qiyin. Kimyoviy tarkibi temir va eritmalar eritmasining barcha bosqichlarida ishonchli nazorat qilinadi. Zamonaviy metall buyumlar ishlab chiqarishda atom emissiya spektroskopiyasining ahamiyati beqiyosdir.

#### NAZORAT SAVOLLARI:

1. Elektronlarni erkin chopishida nima tushiniladi?
2. Bikir va bikiremas yoyilishda nima tushiniladi?
3. Kogeren va kogeren emas yoyilishlar nimasi bilan faro'lanadi?
4. Frenel i Fraungofera difraktsiyalari nima bilan faro'lanadi?

5. Atom faktorli yoyilish  $f(\Theta)$  va strukturaviy yoyilish faktorlari  $F(\Theta)$  orasida ?anday nisbat mavjud?
6. Elektronlar man'baining yoruqligi nima va u tezlashtiruvchi kuchlanish ўzgarishi bilan qanday o'zgaradi?
7. Tanlab olingan oblastdan olingan difraktsion tasvir va difraktsion oqim tutami nima bilan farqlanadi?
8. Kondensator-ob'ektiv linza nima va uning ob'ektiv linzadan nima bilan farqlanadi?
9. Yoruq polosali va qorong'i polosali tassvirlar orasida qanday farq bor?
10. AKEM da olingan tasvirning SHEM da olingan tasvir nimadan afzalligi nimada?
11. AKEM da kattalashtirish ?anday amalga oshiriladi?
12. Ob'ektiv linzaga nisbatan tutam xolatini moslash zarur ( Volt markazini moslash)?
13. Namunani fokusni aniq aniqlash qanday bajariladi?
14. Fokus chuqurligi va maydon chuqurligi nima?

## 9-BOB. MATERIALLAR SIFATINI AKUSTIK NAZORAT QILISH USULLARI

Hozirgi vaqtda sifatni buzmaslik usullari orasida akustik usullar alohida takidlanishi mumkin. Ular nuqsonlarni aniqlash, materiallarning fizik-mexanik xususiyatlarini nazorat qilish va nazorat ob'ektlarining o'lchamlarini o'lchash muammolarini echishga imkon beradi. Akustik nazoratning turli usullarini qo'llashda ovoz va ultratovush diapazonlarining tebranishlari (50 Gts do 50 MGts gacha bo'lgan chastotada) ishlatiladi [17]. Ultratovush nazorati usuli eng keng tarqalgan usullardir. Bu usulni yuqori aniqligi, sezgirligi, ishlashi, avtomatlashtirish qobiliyati, iqtisodiy samaradorligi bilan bog'liqdir.

### 9.1. Akustik to'lqinlar va ularning tarqalishi

Akustik sifat nazorati turli usullarining xususiyatlarini tushuntirishda akustik tebranishlar va akustik to'lqinlar kabi tushunchalar bilan uzviy bog'liqdir. Akustik to'lqinlar elastik muhitda zarralarini mexanik qo'zg'alishilarning tarqalishi jarayonidir. Akustik tebranish va to'lqinlarning chastota diapazoni 9.1-jadvalda aks ettirilgan.

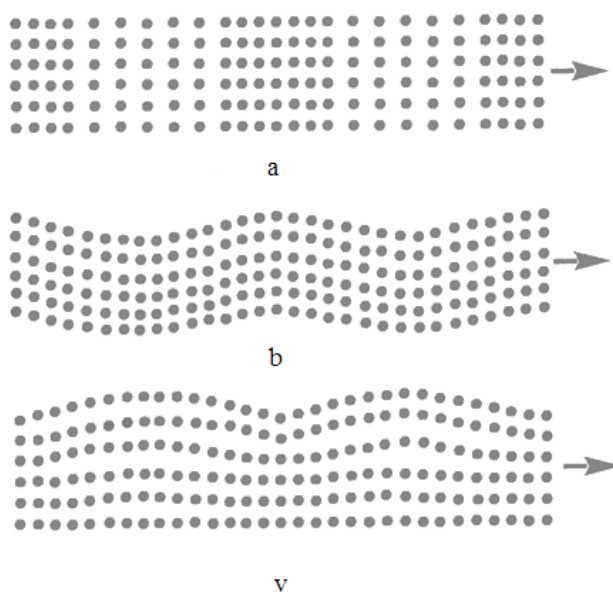
9.1-jadval

**Akustik tebranish va to'lqin chastotalar intervallarni diapozoni [1]**

| Tebranish va to'lqinlar | Sifatli aniqlash                                              | Chastota diapozoni, Gs                                 |                          |
|-------------------------|---------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|--------------------------|
|                         |                                                               | fizikaviy                                              | shartli                  |
| Tovush                  | Eshitish diapozon                                             | 16...25 dan<br>(15...20)·10 <sup>3</sup><br>gacha      | 20... 20·10 <sup>3</sup> |
| Ultratovush             | Eshitish diapozonidan yuqoroi                                 | (15...20)·10 <sup>3</sup><br>dan 10 <sup>9</sup> gacha |                          |
| Gipertovush             | Havo molekulalarining erkin<br>yo'lidan to'lqin uzunligi kama | 10 <sup>9</sup> yuqori                                 |                          |

Muhitga qarab tebranuvchi zarralarni xususiyatiga ko'ra bo'ylama, ko'ndalang (siljuvchi), yuzaki, normal va boshqa tur to'lqinlarga ajratiladi. Agar zarralarni tebranishi to'lqin yo'nalishi bilan bir xil bo'lsa, bunday to'lqinlar bo'ylama deyiladi (9.1,a-rasm). Ko'ndalang to'lqinlarda muhit zarralarni tebranishi to'lqin yo'nalishiga perpendikulyar yo'nalishda bo'ladi (9.1,b-rasm). Ular shaklni bikirligiga va siljish deformatsiyasiga qarshi tura oliadigan muhitda tarqaladi. Yuzaki to'lqinlar yoki Releya to'lqinlari qattiq jismlarni erkin yuzasida tarqalishi

mumkin (9.1,v-rasm). Zarracha traektoriyasini tabiatiga ko'ra, sirt to'lqinini bo'ylama va ko'ndalang to'lqinlarning kombinatsiyasi sifatida ifodalanishi mumkin. Yuza to'lqinlarini mahsulot yuzasidagi nuqsonlarni aniqlash uchun muvaffaqiyatli qo'llash mumkin.



9.1-rasm. To'lqinlarning ko'ndalang (a), bo'ylama (b) yuza bo'ylab (v) tarqalishining sxematik tasvirlanishi

Cheklanmagan bir hil izotropik muhitda elastik to'lqinlarning tarqalishi muayyan fazoviy xarakterga ega. Oldingi shaklga qarab, to'lqinlar tekis, sharsimon va silindrsimon bo'lishi mumkin. Tekis to'lqinlar tebranayotgan plastinka bilan qo'zg'atilgan bo'lishi mumkin, qachonki uning ko'ndalang o'lchamlari to'lqin uzunligidan sezilarli darajada katta bo'lsa.

Sferik to'lqinlar nuqta manbai yoki kichik o'lchamli sharsimon tana tomonidan qo'zg'atiladi.

Sferik to'lqinlarning to'lqinli sirtlari kontsentrik shar shakliga ega. Silindrik to'lqinlarining manbai uzunligi diametridan ancha kattaroq silindrlar tanadir (sterjen).

## 9.2. Akustik to'lqinlarni nurlanishi va qabul qilish

Akustik nazoratning turli usullarini qo'llash akustik to'lqinlarning emissiyasi va qabul qilinishi bilan bog'liq. Bu vazifalar elektr energiyasini mexanik energiyaga aylantiradigan elektroakustik o'zgartirgichlar va aksincha amalga oshiriladi.

Akustik to'lqinlarni tarqalish va qabul qilishning ikkita guruhi usullari mavjud: kontaktli va kontaktsiz. Bevosita bo'lmagan usullar elektr energiyasini

akustik signalga aylantirishni nazorat ob'ektining o'zi sodir bo'lishiga asoslanadi. Kontaktsiz usullarning eng muhim afzalligi - bu akustik signalni uning nazorati ob'ektiga uning sirtidan uzatilishi bilan bog'liq bo'lgan muammolarni bartaraf etishdir. Xususan, kontakti suyuqlikdan foydalanish zarurati bilan bog'liq cheklovlar, sirt qatlamining sifati, uning pishiqligi o'chiriladi.

Turli jismoniy effektlar va ularga asoslangan holda ishlab chiqilgan usullar elektr energiyasini to'g'ridan-to'g'ri nazorat ob'ektida akustik signalga aylantirish uchun ishlatilishi mumkin. Shunday qilib, termoakustik, optoakustik, elektromagnit-akustik kontaktsiz nurlanish usullari va akustik to'lqinlarni qabul qilish taklif qilindi.

Aloqa usullarini qo'llash uchun nazorat ob'ektidan ajratilgan faol elementlardan foydalaniladi. Energiya faol elementdan sinov ob'ektiga o'tkaziladigan kontakt vositasi yoki aksincha, odatda suyuq bo'ladi. Amalda, suyuqlik qatlamining qalinligidan farqli ravishda bir nechta aloqa usullari qo'llanilishi mumkin. Kontakt usuli bilan suyuq qatlamning qalinligi ultratovushning to'lqin uzunligini yarmidan oshmasligi kerak, ya'ni kontakt suyuqligi qatlami ingichka bo'ladi. Bunday kontakti ta'minlash uchun konvertor aloqa suyuqligi qo'llaniladigan sinov ob'ektining sirtiga mahkam bosiladi. Suyuqlik aloqasi usuli bo'shliqda bo'lsa, [17] holatni qondiradigan qalin, bir suyuq qatlamdur.

$$h_c > 0,5C_c\tau$$

bunda  $h_c$  -kontakt suyuqlik qatlamining qalinligi,  $C_c$  -kontakt suyuqlikdagi ovozning tezligi,  $\tau$  - vaqtning samarali zarba muddati.

Immersion kontakt butun mahsulotni suyuqlik bilan vannaga botirish yoki nazorat joyida mahalliy immersion suyuqlik vannasini yaratish orqali ta'minlanadi.

Kontakt usuliga yoriq usuliga yaqin. O'zgartirgich va mahsulot o'rtasida yoriq akustik kontakti olish uchun maxsus cheklovlar yordamida doimiy tirqish xosil qilinadi va kontakt suyuqlik bilan to'ldiriladi. Bu tirqishning qalinligi taxminan to'lqin uzunligiga teng bo'lishi kerak. Past chastotali akustik defektoskoplarda o'zgartirgichning nazorat ob'ekti bilan quruq aloqasi amalga oshirilishi mumkin. Metall materiallar nazoratida bunday kontakt usuli qo'llanilmaydi.

Akustik boshqaruv qurilmalaridagi kontak o'zgartirgichning asosiy turi pezoelektrik effektda ishlatiladigan o'zgartirgichlardir. Ushbu ta'sir pezomateriallar deb ataladigan bir qator moddalarda amalga oshiriladi. To'g'ridan-to'g'ri va teskari pezoelektrik effektlar mavjud. To'g'ridan-to'g'ri pezoelektrik effekt - qo'llaniladigan mexanik kuchlanish ta'siri ostida materiallarda elektr polarizatsiyasining hosil bo'lishidir. Teskari ta'sir elektr maydonda joylashgan pezomateriallarda mexanik deformatsiyalar sodir bo'lganda namoyon bo'ladi. Akustik asboblarda bu ikkala effektdan ham foydalaniladi. Teskari pezoelektrik

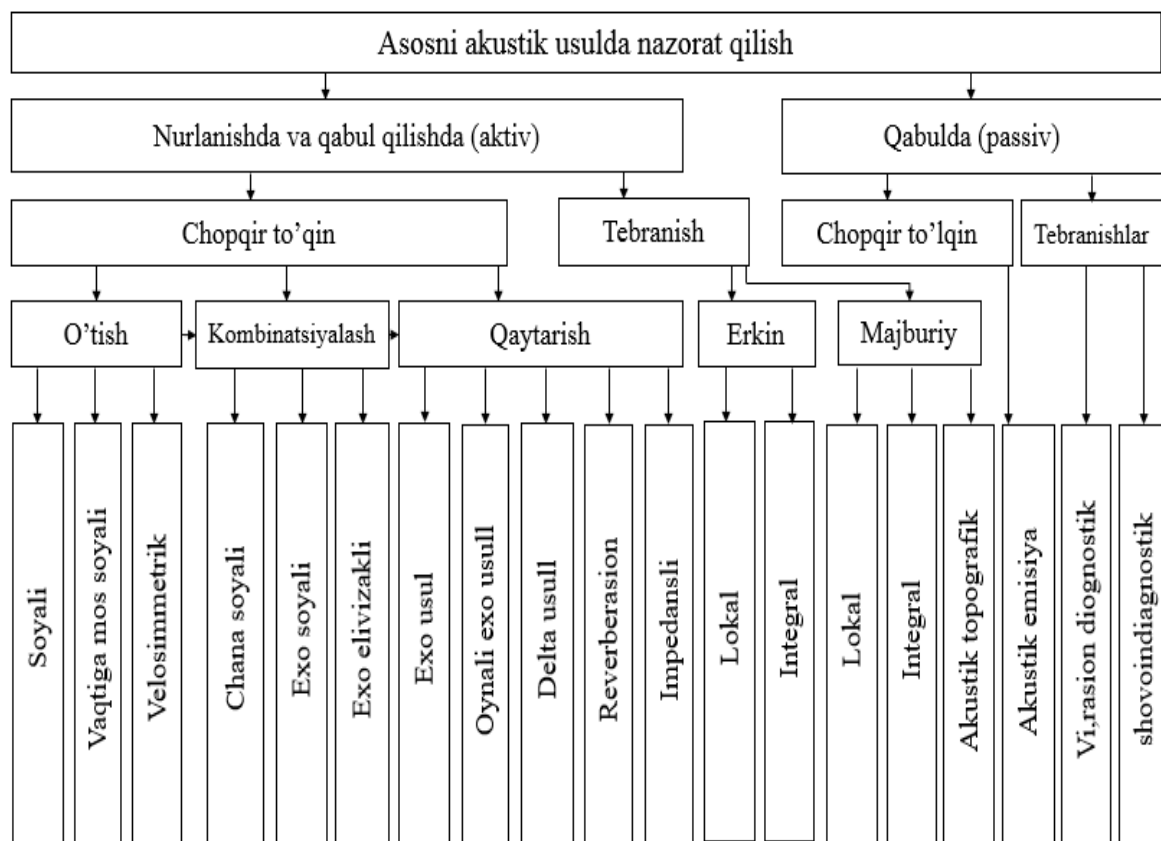


ta'sir to'liqin nurlatgichlarida qo'llaniladi va to'g'ridan-to'g'risi esa qabul qiluvchilarda ishlatiladi. Zamonaviy qurilmalarda pezomateriallarning asosiy turi piezoelektrik keramikalaridir.

### 9.3. Akustik sifatnazoratning asosiy usullari

Bugungi kunda ko'p sonli akustik nazorat usullari ishlab chiqildi. N.P.Alyoshin va boshqalar tomonidan taklif etilgan ushbu usullarning tasnifi [17] da keltirilgan. Ushbu tasnifga muvofiq, akustik nazorat usullari ikkita katta guruhga bo'linadi: faol va passiv (9.2-rasm). Faol usullar akustik tebranishlarni va to'liqlarning emisson qabul qilishiga asoslangan. Passiv usullarni qo'llashda faqat ularni qabul qilish amalga oshiriladi. ham faol, ham passiv usullar o'rganish ob'ektlarida harakatlanuvchi turg'un to'liqlar va tebranishlar paydo bo'lishiga asoslangan bo'lishi mumkin.

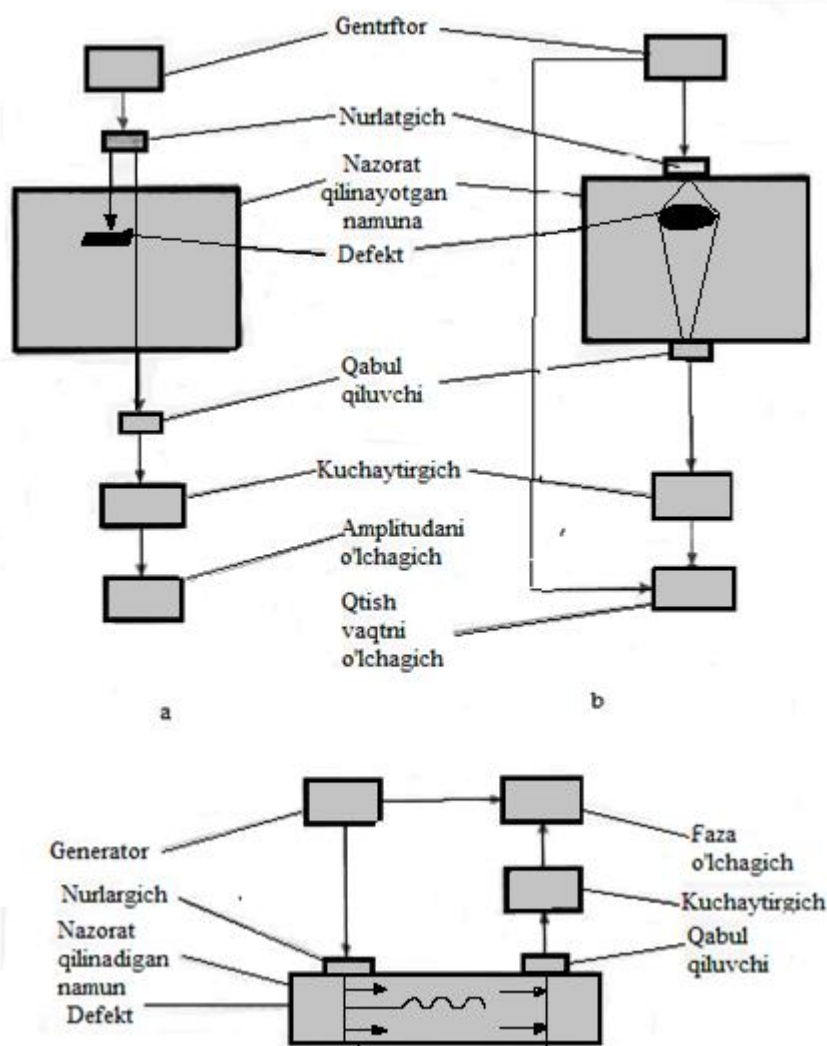
Tebranish chastotasiga qarab, barcha akustik usullar past va yuqori chastotaga bo'linadi. Past chastotali tovush va past chastotali ultratovush (bir necha o'n kGts) diapozonlardagi tebranishlarni ishlatadigan usullarni o'z ichiga oladi. Yuqori chastotali usullar yuqori chastotali ultra-tovushli diapazonda (yuz kGts...50 MGts) tebranishdan foydalanishga asoslangan. Metall materiallarni akustik nazorat qilish tez-tez yuqori chastotali usullar yordamida amalga oshiriladi.



9.2-rasm. Materiallarni akustik nazorat qilish usullarining klassifikatsiyasi [17].

Yugiruvchi to'lqinlarining ishlatilishi bilan bog'liq faol usullar to'lqinlarning o'tishi, to'lqinlarning aks etishi va ularning kombinatsiyasi (aks ettirish va o'tish) asosida kichik guruhlarga bo'linadi. Yugiruvchi to'lqinlarining o'tishidan foydalanadigan metodlarning kichik guruhi soya (amplituda), vaqtincha soyalar va velosimmetrik usullarni hosil qiladi. 9.3-rasmda sxematik tarzda o'tish usullari aks ettirilgan. Ushbu usullarni qo'llash uchun nazorat ob'ektining (nazorat qilinadigan maydonning) qarama-qarshi tomonlarida joylashgan nurlanuvchi va o'zgartirgichi qabul qiluvchi (priemnik) kerak [17]. O'tish usullarini qo'llashda ishlatiladigan nurlanish, impulsli (tez-tez) yoki doimiy bo'lishi mumkin.

Amplituda (soya) usulini qo'llagan holda, sinov ob'ektidagi nuqson mavjudligi sababli, uzatiladigan to'lqinning amplitudasining pasayishi qayd etiladi. Ushbu usulning mohiyatini tushuntiruvchi strukturaviy sxemaning asosiy elementlari generatorlar, nurlatgich, qabul qiluvchi, signal kuchaytirgichi va amplitudali o'lchagichdir (9.3,o -rasm).



9.3-rasm. Namunalarni nazorat qilishning o'tish usullariga asoslangan sxemasi: a- soya usuli; b- vaqtincha soya; v-velosimmetrik usul

Materiallarning sifatini nazorat qilishning vaqtinchalik soya usuli, o'rganilayotgan ob'ektlardagi nuqsonlarni to'liqligini bilan bog'laydigan kuchlanishlarning kechikish vaqtlarini o'lchashga asoslanadi (9.3,b-rasm). Kuzatilayotgan ob'ektning zonasi bo'ylab harakatlanuvchi to'liqligining o'tishi bilan nuqsonli bo'lgan uning tezligi o'zgarishi mumkin.

Boshqa usullar bilan ishlash qiyin bo'lgan materiallarning sifatini nazorat qilish uchun soya va vaqtincha soya usullari qo'llaniladi. Biz masalan, kattadonli austenit po'lati, kul rang cho'yan, beton va boshqa materiallardan bahs yuritamiz [17].

Velosimetrik nazorat qilish usuli, uning sxemasi shakl. 9.3,c-rasmda elastik to'liqlilarning tezligi o'zgarishini tahlil qilishga asoslangan. Taqdim etilgan rasmda shtrixlangan chiziq an'anaviy ravishda qatlamlangan materialning kesimida kamroq tezlikda tarqaluvchi to'liqlinni ko'rsatadi. Tarqatish tezligining pasayishi o'tgan to'liqligining fazasini siljish xolati bilan aniqlanadi.

Aks etish uslubida, odatda, impulsli nurlanish ishlatiladi. Ushbu usullar ishlatiladigan asboblarda bir yoki ikkita o'zgartirgich borligini taxmin qiladilar. Aks etish usullari: exousuli, oyna exousuli, reverberatsion usuli va delta usuli.

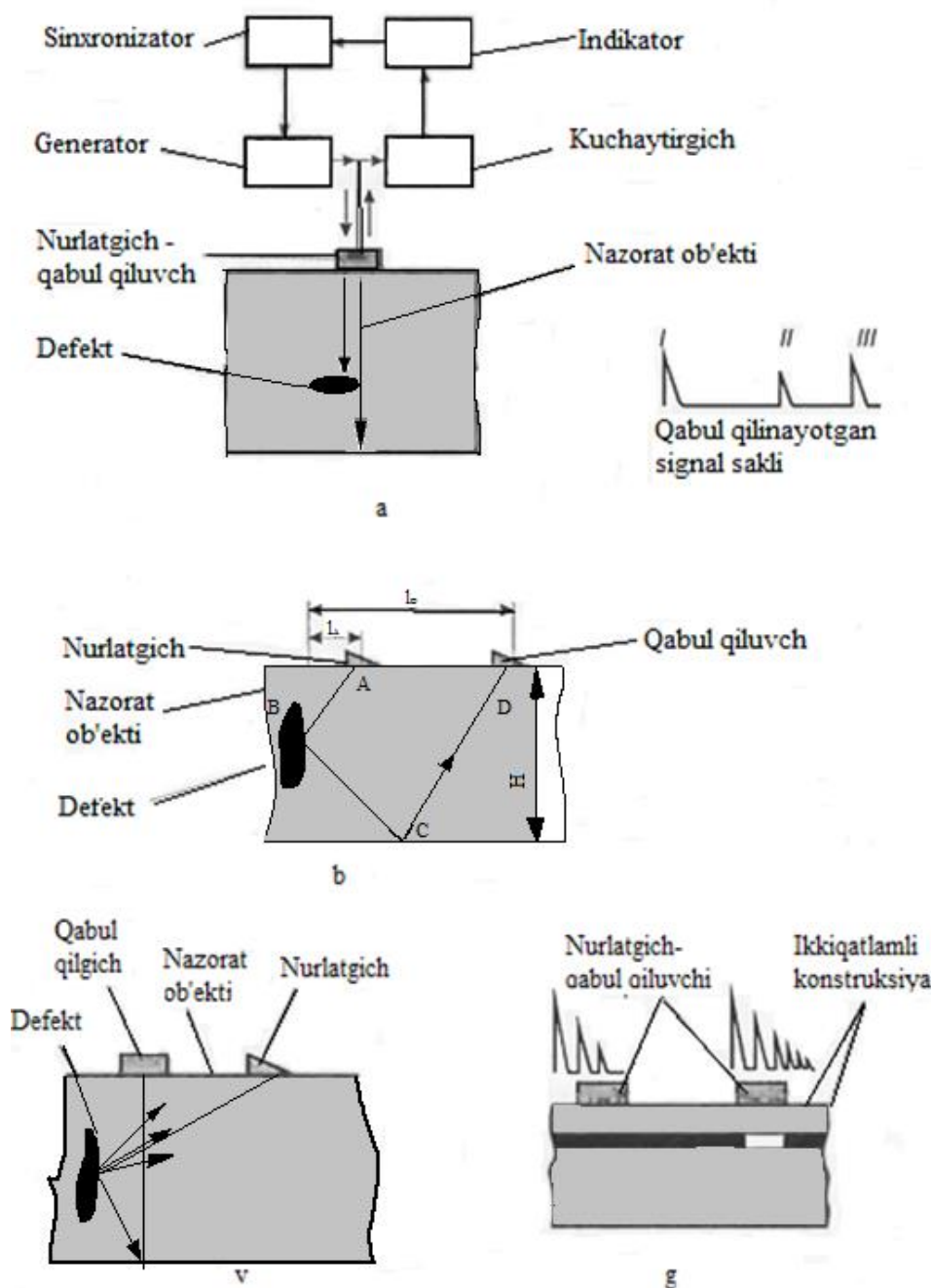
9.4-rasmda ko'rsatilgan exo sxemasi o'zgartirgich tomonidan nurlantirgich funktsiyasini hamda signallarning qabul qiluvchisi vazifalarini bajarishi taxmin qilinadi. qurilma zondlovchi impuls I, don signali III, ob'ektning teskari yuzasidan qaytgan va exosignal II nazorat imkoniyatiga ega. Ob'ektning qalinligini bilgan xol impulslar II va III qabul qilish vaqtida aniqlangan nuksonlarni chuqurligini hisoblash mumkin. Exo usulining alohida sxemasini amalga oshiradigan akustik qurilmalarda signallarni qabul qiluvchi va qabul qiluvchining funktsiyalarini bajaradigan ikkita o'zgartirgich qo'llaniladi

Exo usuli amaliyotda eng keng qo'llanishni topdi. Akustik usullar bilan tekshirilgan barcha ob'ektlarning qariyb 90% bu usul bilan taxlil qilinadi. Ekologik uskuna metallurgiya va mashinasozlik mahsulotlarini, shu jumladan, prokatlash mahsulotlari, quyma mahsulotlar, payvandlash birikmalar, metall bo'lmagan materiallardan tayyorlangan mahsulotlarni tekshirishda qo'llaniladi. Mahsulotga bir tomonlama kirish mumkin bo'lsa, masalan, quvurlarning qalinligini aniqlash uchun ishlatilishi mumkin. Usulning boshqa funktsiyalari materiallarning fizik-mexanik xususiyatlarini aniqlash bilan bog'liq. Ushbu muammoni hal qilish ultratovush tebranishni kamaytirishga asoslangan.

Oyna exo usuli sinov ob'ektining nuqsonlaridan va pastki yuzasidan aks ettirilgan signallarga asoslangan. 9.4,b -rasmda nurlatgichdan qabul qiluvchigacha akustik signalning yo'li AVCD traektoriyasi bilan tavsiflanadi. Ko'zgu exouslubining bir nechta modifikatsiyasi ishlab chiqildi [17]. Shulardan biri, K-usuli nomini olganlardan biri nurlatgichni va qabul qiluvchi ob'ektning qarama-qarshi

tomonlarida joylashganligini taxmin qiladi. 9.4, b-rasmda qabul qilgich tahlil qilinayotgan ob'ektning pastki qismidagi kesilgan chiziqli bilan ko'rsatiladi.

Oyna exo usuli kirish yuzasiga vertikal bo'lgan yoriqlarni aniqlash uchun ishlatiladi. Ushbu usul sizga ko'zgu soya usulidan kichikroq nuqsonlarni aniqlash imkonini beradi. Oyna exo usulidan samarali foydalanish uchun nuqson joylashgan zonasida etarlicha katta hajmli maydon mavjudligidir. Agar ushbu shart bajarilmasa, u holda boshqa usullarini, masalan, ko'zgu soyasi usulini qo'llanilishi kerak.

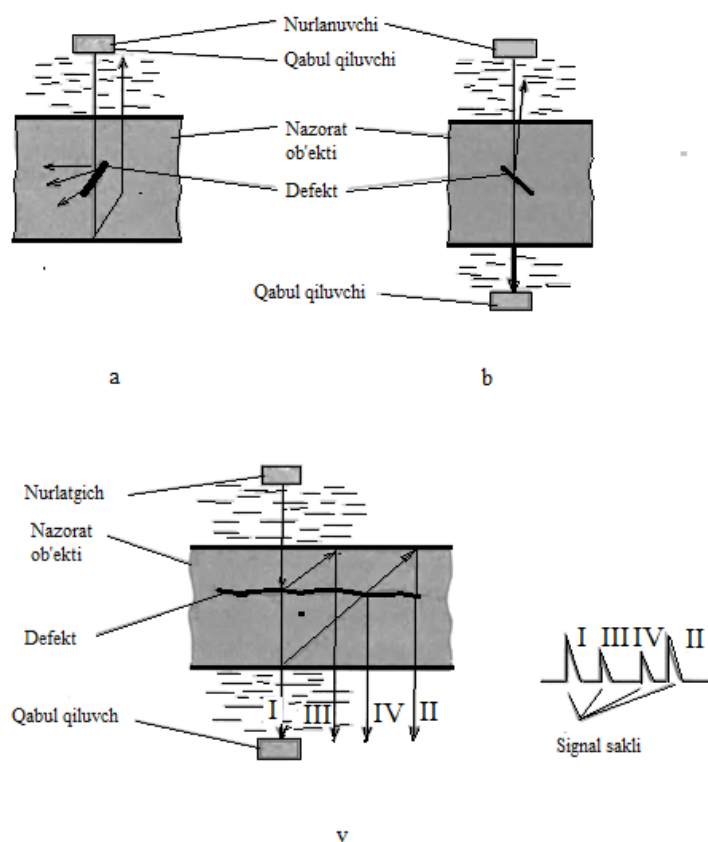


9.4-rasm. qaytarish usullarini qo'llab nmunalarni nazorat qilish sxemasi:  
a- exo usul; b- oynavand exo usul; v- delta- usul; g-reverberatsion usul

Delta usulini qo'llashda nuqsonda to'lqinlarning difraktsiyasi hodisasi qo'l keladi (9.4,s-rasm). Nurlatgich 2 dan nuqsonga tushayotgan ko'ndalang to'lqin qisman qaytadi, boshqa qismi esa ko'ndalang va transformatsiyalashgan bo'ylama to'lqin sifatida difragma qilinadi. Aks etgan to'lqinlar qisman bo'ylama to'lqinlarga aylanadi. Difragirlangan bo'ylama va biroz vaqt o'tgach ob'ektning pastki yuzadan aks etgan bo'ylama to'lqin, bo'ylama to'lqinlarining qabul qiluvchisi tomonidan qayd qilinadi. Delta usuli payvandlash sifatini nazorat qilishda qo'llaniladi.

Ko'zgu usullari kichik guruhiga kiritilgan usullardan yana biri o'rganilayotgan ob'ektdagi hajmning yoyilish vaqtini o'lchashga asoslangan reverbratsion usuldir. Ikki qavatli mahsulotning ob'ekti sifatida foydalanilganda uni amalga oshirish sxemasi 9.4,g-rasmda keltirilgan. Katlamlarni sifatli birikish zonasini kuzatish paytida, defektni o'z ichiga olgan zonaga nisbatan reverbratsiya vaqti kam.

Akustik to'lqinlarning tarqalishi va aks ettirish tamoyillarini qo'llaydigan kombinatsiyalashgan usullar orasida ko'zgu soyasi, exo soya va exo -o'tish usullari kiradi.



9.5-rasm. Kombinatsiyalashgan usullarni qo'llab ob'ektni nazorat qilish sxemasi: a- oyna- soya; b- exo soyali; v- exo ochiq

Pastki signalning amplitudasini o'lchashga asoslangan oyna-soya uslubining sxemasi 9.5,a-rasmda keltirilgan. Akustik signal mahsulotdan qabul qilgichgacha ikki marta nuqson bo'yicha o'tkazadi: oldinga va orqaga yo'nalishda (diagrammada aks ettiriladigan nur an'anaviy ravishda yon tomonga siljiydi). Nuqsonning mavjudligi signalni zaiflashtiradi. Shunday qilib, bajarish usuliga ko'ra, ko'zgu-soya usulini aks ettirish usullariga va uning jismoniy mohiyatiga ko'ra - soya uslubiga (etkazish usuliga) bog'liq bo'lishi mumkin.

Ko'zgu soya usuli odatda exo usuli bilan birgalikda ishlatiladi. Ushbu yondoshuv, vertikal yoriqlar kabi ba'zi kamchiliklarni exo usuli bilan yomon aniqlanmaganligi bilan izohlanadi. Oyna soya usuli, masalan, temir yo'l yoriqlarining bo'yida vertikal yoriqlar aniqlash uchun ishlatiladi. Ko'zgu soya usulidan foydalangan holda exo uslubiga nisbatan kattaroq yoriqlar aniqlangan.

9.5,b-rasm exo soya usulini ko'rinishi keltirilgan. Kombinatsiyalangan metodlar guruhiga topshirish usuli, ham uzatilgan, ham aks ettirilgan to'lqinlarning tahliliga asoslanadi. Bu usul payvandlangan birikmalar sifatini nazorat qilishda qo'llaniladi.

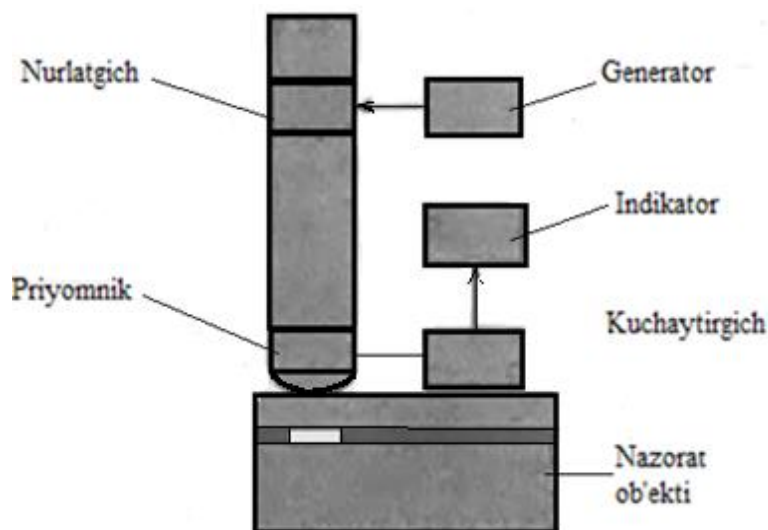
Ochiq exo usuli qo'llanilganda (9.5,v, -rasmda ko'rsatilgan) to'rt xil signal qayd etladi. Signal I ochiq. Signal II ikki marta aks ettirilgan to'lqinga mos keladi. Agar mahsulotda to'lqin uchun yarim shaffof nuqson mavjud bo'lsa, qabul qilgich exo signallari III va IV ni ushlaydi. Oxirgi ikkita signal, nuqsondan kelib chiqqan, mahsulotning yuqori (signal III) va past (signal IV) sirtlaridan keladigan to'lqinlarga mos keladi. Ochiq exo usuli soya kabi faqat mahsulotga ikki tomonlama kirish imkoni bo'lgan hollarda qo'llaniladi. Amalda bu usullar, misol uchun listlar kabi oddiy geometrik shaklli mahsulotlarini avtomatik ravishda nazorat qilish uchun ishlatiladi.

Materiallarning akustik sifat nazorati boshqa usuli - impedans usuli. 9.6-rasmda berilgan sxemada o'zgartirish funtsiyasini mahsulot yuzasiga tayangan tebranuvchi sterjen tomonidan amalga oshiriladi. Ob'ektning nuqson ustidagi qismi yanada yumshoqroq bo'lib, past mexanik impedans bilan xarakterlanadi. Shunday qilib, nazorat ob'ektida biror nuqson mavjud bo'lsa, sterjenning tebranish tartibi o'zgaradi, bu aslida nuqson belgisidir [17].

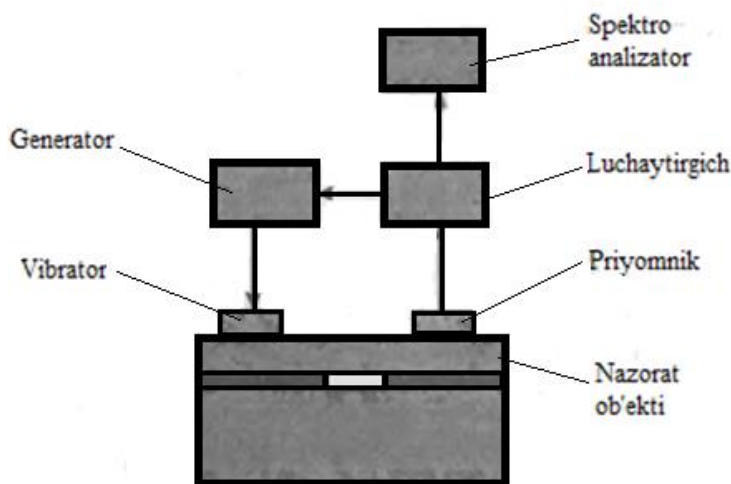
Erkin tebranishlar usuli 9.7-rasmda keltirilgan bo'lib, mahsulotda qisqa muddatli tashqi ta'sir qilish natijasida qo'zg'algan tebranish chastotasini spektr tahliliga asoslangan. Bunday ta'sirni vibratorning bolg'asi bilan hosil qilish mumkin. Agar mahsulotda nuqson bo'lsa, chastota spektri yuqori oblastlarga siljiydi.

Akustik nazoratning rezonans usuli, pezo ultratovushli o'zgartirgich yordamida mahsulotdagi qo'zg'alishga asoslangan va tebranish rezonansi

kuzatilgan chastotalarni aniqlaydi (9.8-rasm). Ushbu chastotalar mahsulotdagi nuqsonlarning mavjudligini aniqlaydi, uning qalinligini o'lchash.



9.6-rasm. Materiallar sifatini nazorat qilishning impedans usuli

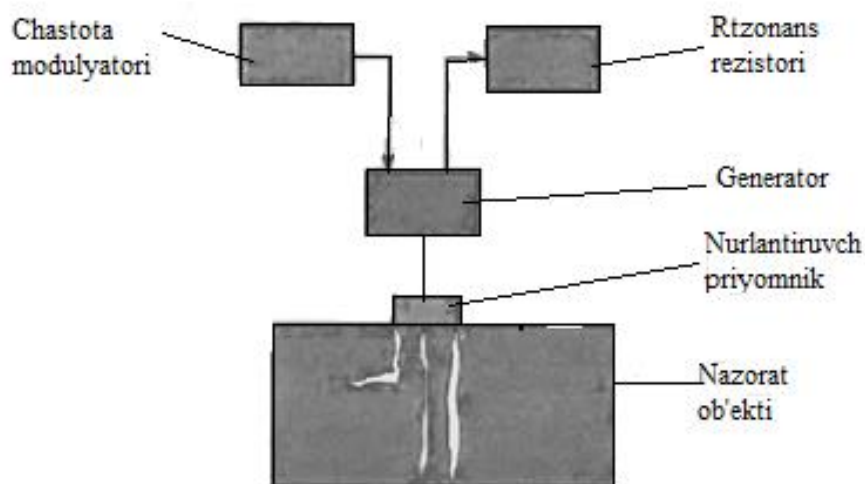


9.7-rasm. Erkin tebranishlar metodi

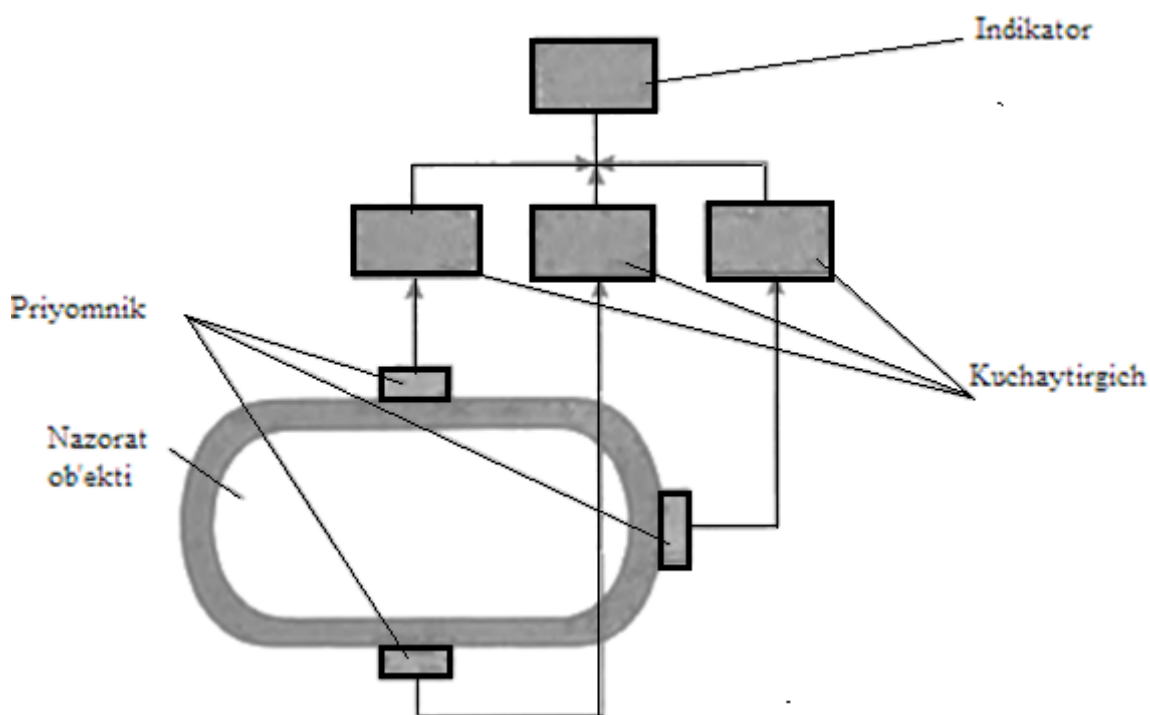
Akustik topografik nazorat usuli mahsulot yuzasiga qo'llaniladigan kukun yordamida amalga oshiriladi. Mahsulotdagi kamchiliklar mavjud bo'lsa, unda kichikroq miqdordagi kukun miqdori uning ustki qismida joylashgan joylarga nisbatan ancha murakkab. Ushbu hodisa mahsulotning defektli joylarida tebranish amplitudasini o'sishiga bog'liq.

Materiallarni akustik nazorat qilishning passiv usullari akustik emissiya, titrash diagnostikasi va shovqin diagnostikasi usullarini o'z ichiga oladi. Akustik emissiya usuli akustik nurlanishning elastik to'lqinlarini qabul qilish va tahlil qilishga asoslangan (9.9-rasm). Ushbu to'lqinlarning ko'rinishi sinov ob'ektining ichki strukturasi dinamik mahalliy tuzilishi hisoblanadi. Bunday qayta tuzilishning misollari yoriqlarning paydo bo'lishi va o'sishi, allotropik

o'zgarishlar, dislokatsiya tutamining harakati. Emissiya manbalarining mavjudligi va ularning nazorat ob'ektidagi joylashuvi ularning o'zgartirgichlardan kelgan signallarni kompyuterda ishlashi bilan belgilanadi.



9.8-rasim. Material sifatini rezonans usuli bilan nazorat qilish



9.9-rasm. Material sifatini akustik-emissiya usuli bilan nazorat qilish

Akustik emissiya usulining muhim afzalligi - bu mahsulotni uzoq ko'rishdan katta miqdorda materiallarni tekshirish. Ushbu usul bilan qayd etilgan signallarga nuqsonlarning rivojlanishi (o'sish) sodir bo'lgan materialning miqdori boshlanadi. Bunday kamchiliklar mahsulotni ishlatishda xavflidir. Akustik emissiya usuli gidroorganizmlar paytida, shuningdek yuk ostida ishlash paytida mahsulotni tashqislashda ishlatiladi. hozirgi vaqtda bu usul turli xil mahsulotlarni, masalan,



temir yo'l transportining qismlarini sifat nazorati bo'yicha mutaxassislar tomonidan faol qo'llanilmoqda.

Materiallar sifatini nazorat qilishning tebranish-diaagnostik usulini tatbiq qilish, kontakt-qabul qiluvchi asboblardan foydalangan holda qismning yoki yig'ilishning tebranish parametrlarini tahlil qilishga asoslangan. Shovqin diaagnostikasi usuli yordamida ishchi mexanizmlarning shovqin spektri o'rganiladi.

Bir qator akustik usullar cheklangan. Velosimmetrik, reberatsion, impedansli, akustik-topografik usullar, shuningdek, mahalliy erkin tebranish usuli asosan kompozitlarni va metall bo'lmagan materiallarni nazorat qilish uchun ishlatiladi.

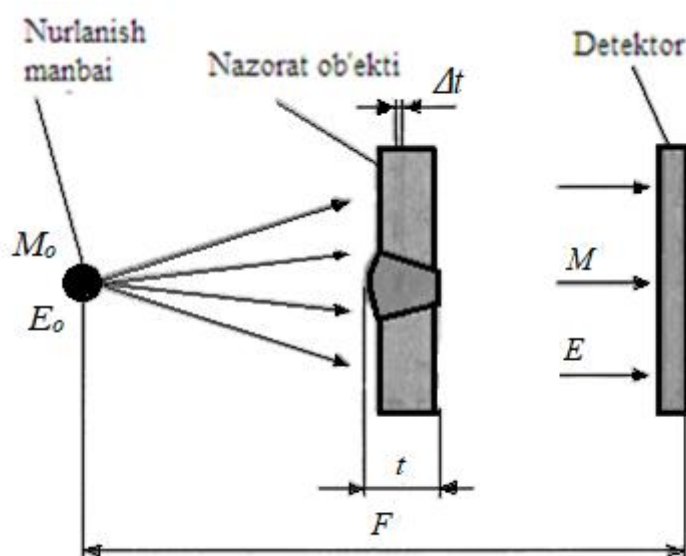
### **NAZORAT SAVOLLARI:**

1. Ob'ektning defektoskop bilan nazorat qila olish sharti qanda?
2. Nazorat zonasi skanerlash qanday amalga oshiriladi?
3. Akustik defektoskopga qo'yiladigan asosiy shartlar qanday?
4. Impulslı defektoskopni asosiy qismlarini ayting.
5. Sezgirlikni vaqtincha sozlash sxemasi nimaga kerak?
6. Qaysi xollarda sinxronizator kerak bo'ladi?
7. Ishchi chastota qanday tanlanadi?
8. Qanday qilib kerakli signallar shovqinlardan ajratiladi?
9. Shovqinlarni yo'qotish usullari qanday?

## 10-BOB. RADIATION NAZORATI

### 10.1. Radiation nazorat haqida ma'lumot

Mashinasozlik, metallurgiya va boshqa sohalarda qo'llanadigan yo'q halokaty sinovlari usullari orasida radiatsion nazorat usullari bir qator ko'rsatkichlarga ko'ra ajratilishi mumkin. Ular 1 dan 700 mm gacha qalinlikdagi metall buyumlardagi kamchiliklarni aniqlash imkonini beradi. Ushbu usullarning mohiyati sinov ob'ekti orqali o'tadigan ionlashtiruvchi nurlanishni nazorat qilish va tahlil qilishga asoslangan. Radiatsion nazorat sxemasi 10.1-rasmda ko'rsatilgan. Ushbu sxemaning asosiy elementlari - radiatsiya manbai, tahlil qilingan ob'ekt va detektor.

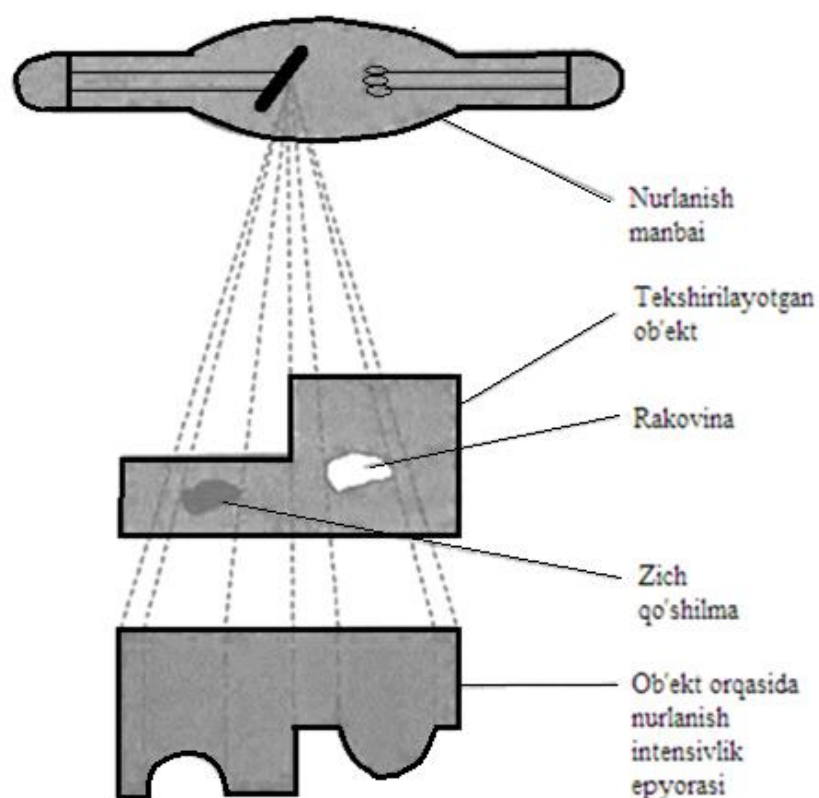


10.1-rasm. Nazorat ob'ektini ionlanuvchi nurlar bilan nurlash sxemasi: M- nurlanish intensivligi; E- nurlanish energiyasi

Radiatsion tekshirish usullarining asosi - sinov ob'ektining tanasi tomonidan ionlashtiruvchi nurlanishni yo'qotish fenomeni. Ob'ektda har qanday nuqson mavjud bo'lsa, bu ionlashtiruvchi nurlanishning susayish darajasiga ta'sir qiladi. Nazorat qilinadigan ob'ekt orqali o'tadigan nurlanishning intensivligi materialning zichligiga, undagi nuqsonlarning zichligiga, ob'ekt qalinligiga qarab o'zgaradi (10.2-rasm).

Radiatsion nazorati odatda ob'ektlari payvandlangan va kavsharlangan bo'g'inlar, quymalar, to'qimalar, ko'p qatlamli materiallar va konstruktsiyalar, agregatlar, uzellar, mexanizmlardir. Nazorat jarayonida payvand nuqsonlar, yoriqlar, eritmalar, quyilmay qolgan erlar, kuyishlar, chuqurchalar, listlarni siljigan

qirralari, devorlarni turli qalinliklari, ichki yopiq bo'shliqlarning tartibsiz shakllari, yorilgan qatlamlar, zaklyopkalar va asosiy materiallar o'rtasidagi bo'shliqlar, zaklyopka shaklidagi o'zgarishlar, boshqa nuqsonlar aniqlanishi mumkin. Ko'pincha radiatsion nazorat usullari payvandlash, quyish mahsulotlarini sifatini nazorat qilish, shuningdek yig'ish ishlarining sifatini nazorat qilish uchun ishlatiladi. Radiatsion usullar nafaqat nazorat ostidagi narsalardagi nuqsonlarni aniqlash uchun, balki murakkab ob'ektlarning ichki strukturasi tahlil qilish uchun ham javob beradi. 10.3-rasmda misol tariqasida, gaz turbinasi pichog'ining ichki strukturasi baholash uchun olingan surat taqdim etiladi.



10.2-rasm. Defektlari mavjud bo'lgan ob'ektdan o'tishda Rentgen nurlarini kuchsmzlanish sxemasi

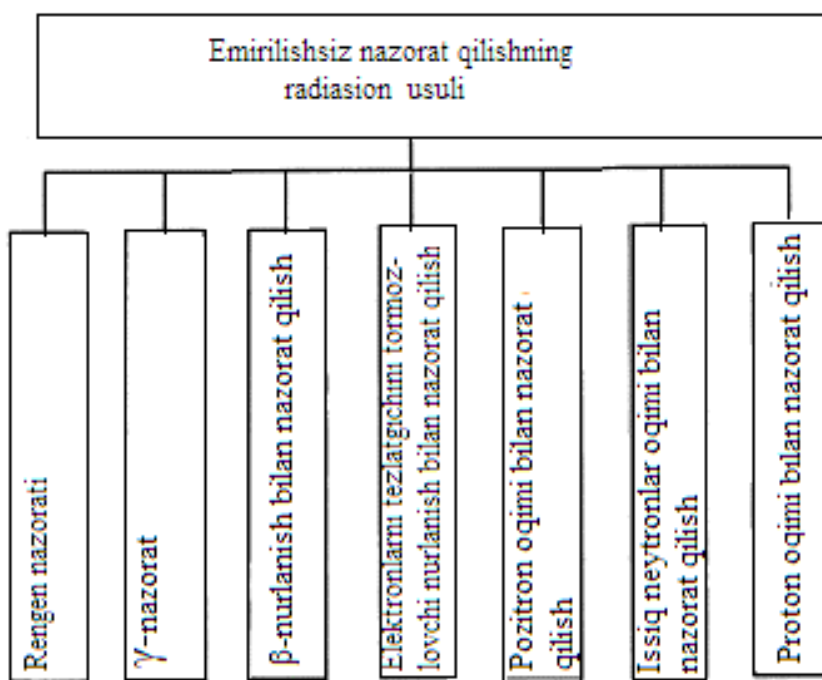
Ionlashtiruvchi nurlanish manbalari turlicha tabiatga ega bo'lishi mumkin. Emirmasdan nazorat qilishning radiatsion usullarini tasniflash 10.4-rasmda keltirilgan. Eng keng tarqalgan usul - rentgenografiya, rentgenoskopiya va  $\gamma$ -nazorat. Ionlashtiruvchi nurlanish manbalari sifatida rentgen apparatlari, zaryadlangan zarralar tezlagichlar(elektronlar) va izotoplar ishlatiladi.

## 10.2. Radiasion nazorat qilish usullari va jihozlari

Rentgen qurilmalari energiya manbai sifatida 0,5 dan 1000 keVgacha bo'lgan tormozlovchi va xarakterli radiatsion manbalar qo'llaniladi. Ushbu manbalar 120 dan 160 mm gacha qalinligi bo'lgan mahsulotlarni skanerlashda ishlatiladi.



10.3-rasm. Gaz trubinasi lopatkasining ichki tuzilishi



10.4-rasm. Yemirilishsiz nazorat qilishni rentgen usuli klassifikatsiyasi

Elektron tezlatgichlar yuqori energetik tormozlovchi nurlanish energiya manbalari sifatida xizmat qiladi. Nurlanish energiya 35 MeV ga etadi. Elektron tezlatgichlari qalinligi 450 mm dan ortiq bo'lgan detal va zagotovkalarni nurlash uchun ishlatiladi. Elektron tezlatgichlar yuqori energiyali manbalar β-nurlanish va neytron generatorlaridir. Radioaktiv izotoplar rentgen nurlari,  $\alpha$ ,  $\beta$  va  $\gamma$  nurlari, neytron oqimi va pozitronlari manbalari bo'lib xizmat qiladi. Izotoplar 200 mm qalinlikdagi po'lat mahsulotlarni yoritishda (nurlashda) ishlatiladi.

$\alpha$ -zarrachalar yuqori ionlashtiruvchi va past darajadagi kirib borish qobiliyatiga ega. Ular atmosfera bosimida 10 sm dan oshmaydigan havo qatlamidan, 150 mikrongacha bo'lgan suv qatlamidan, 150 mikron qalinlikdagi alyuminiy follardan o'ta oladi. Shuning sababdan  $\alpha$ -radiatsion manbalar mashinasozlik detallarini yoritishda foydalanilmaydi.  $\beta$  -nurlanish bilan solishtirganda,  $\beta$ -nurlanishning kirib borish qobiliyati ancha yuqori,  $\beta$ -zarralari qalinligi 5 mm bo'lgan alyuminiy qatlamidan o'tadi.

Rentgen va  $\gamma$ -gamma nurlari, nazorat qilinadigan ob'ektlarning materiallari bilan o'zaro aloqada bo'lganda, elektronlarning tarqalishi va kinetik energiyani o'zgarishi tufayli energiyasini yo'qotadi. Rentgen nurlari va  $\gamma$ -gamma nurlarining intensivligini susayish darajasi ularni energiyasiga, yoritilgan materialning qalinligiga va zichligiga bog'liq. Radiatsiyaning tor nurini ishlatganda radiatsiya intensivlikni kamaytirish qonuni quyidagicha ko'rinishda bo'ladi:

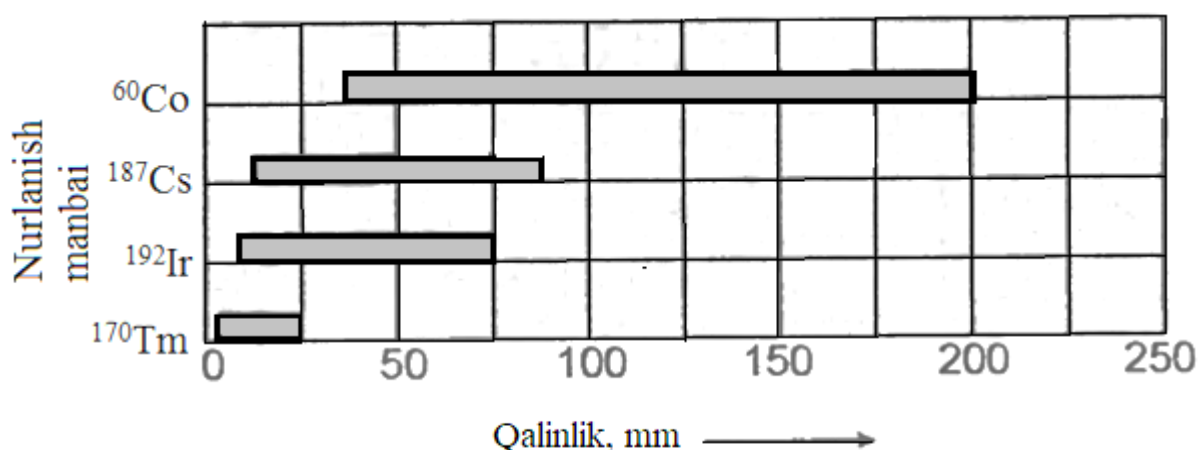
$$I_d = I_0 e^{-\mu d},$$

bunda  $I_d$  va  $I_0$  mos ravishda yoritilganidan oldin va keyin radiatsiya zichligi;  $d$  - yoritilgan ob'ektning qalinligi;  $\mu$  - chiziqli susayish koeffitsienti, radiatsion energiyaga va materialning zichligiga bog'liq.

Radiatsiyaning keng nuridan foydalanilganda, uning xususiyati, asosiy nurlanishdan tashqari, tarqoq nurlanishning sezilarli qismini tashkil etadigan bo'lsa, yoritilgan ob'ektning orqasida joylashgan qalinligi  $d$  bilan nurlanishning intensivligi qo'shadi

$$I_d = I_0 e^{-\mu d} B,$$

bu erda  $B$ -yoritilgan qismning orqasidagi ikkinchi radiatsiya oqimini tavsiflovchi birikma faktor.



10.5-rasm. Gamma-defektoskoplardan foydalanib temir asosli ob'ektlarni nazorat qilish uchun radiografiyani qo'llash oblastlari

Materialning yoritilish chuqurligi turli omillar, jumladan, uning zichligi va radiatsiya manbalarining turi bilan aniqlanadi. 10.5-rasmda gamma-defektoskoplardan foydalanilganda temir moddaga asosli ob'ektlarga mos keladigan radiografiyaning sohalari ko'rsatilgan.

Radiatsion nuqsonlarni aniqlashda ishlatiladigan xarakterli qiymatlar va birliklar 10.1-jadvalda keltirilgan

10.1-jadval

Ionlashuv nurlashishning asosiy dozometrik qiymatlari va ularni birlikalari

| Dozimetrik kattalik                       |                                                                                                                             | Asosiy birliklar SI sistemasida | Sistemadan tashqaridagi birliklar                    |
|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|------------------------------------------------------|
| Nomlanishi                                | Ta'rif                                                                                                                      |                                 |                                                      |
| Zarracha oqimi yoki kvant zichligi        | Bir vaqtning o'zida bu sohaning kesim sohasiga kichik bir sohani kesib o'tgan zarralar (kvantlar) soniga nisbati            | $Zarracha/m^2-s$                |                                                      |
| Nurlanish intensiligi                     | Kichik bir soha bo'ylab bir vaqtning o'zida nurlanish bilan uzatiladigan energiyani bu sohaning ko'ndalang kesimiga nisbati | $Vt/m^2$                        |                                                      |
| Nurlanish dozasi (yutilgan doza)          | Radiatsion energiya nurlangan moddaning massaviy massasi tomonidan                                                          | $Dj/kg$                         | $Rad$<br>( $1 rad = 10^{-2} Dj/kg = 10 erg/g$ )      |
| Ekspozitsion doza(kvant nurlanish dozasi) | Kvant radiatsiyasining dozasi, elektron muvozanatida havoning ionlashi bilan belgilanadi                                    | $Kl/kg$                         | $R (Rentgen)$<br>( $1R = 2,58 \cdot 10^{-4} Kl/kg$ ) |
| Doza quvvati (singan doza quvvati)        | qabul qilingan dozani qabul qilish vaqti                                                                                    | $Dj/kgs$                        | $rad/s$                                              |
| Ekspozitsion doza quvvati                 | Ekspozitsion dozani vaqt birligi ichida ortishi                                                                             | $A/kg$                          | $R/s$                                                |
| Ekvivalent doza                           | Tegishli sifat omili va taqsimlash koeffitsienti bilan berilgan nurlanishning so'rilgan dozasi                              | $Dj/kg$                         | $Ber$                                                |

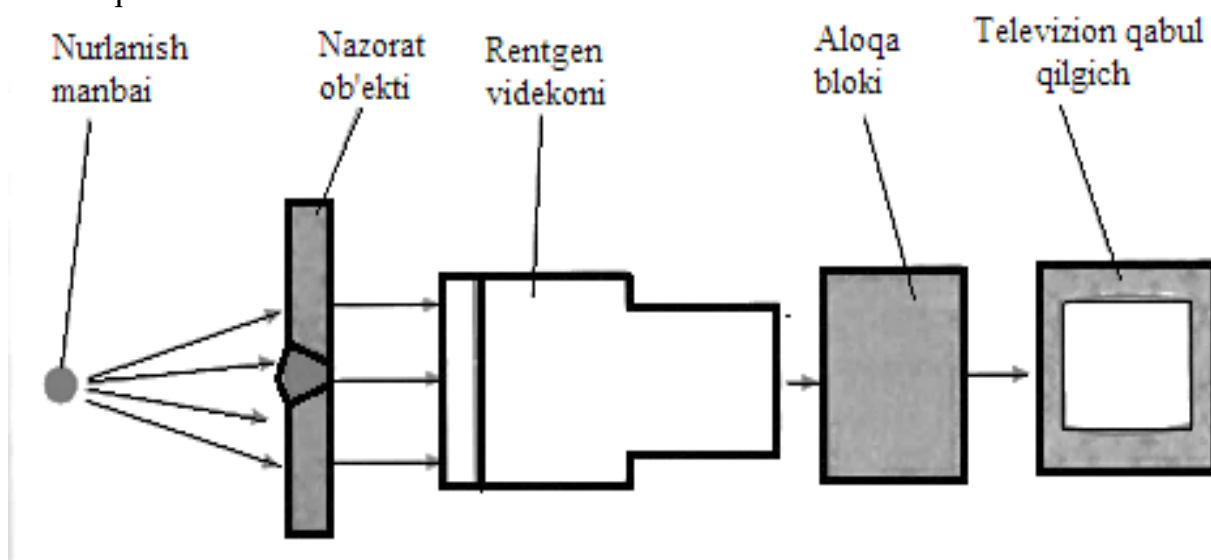
Deteksion uslubiga qarab, ya'ni ob'ekt orqali uzatiladigan nurlanish ro'yxatdan o'tkazish usuli bilan radiatsion monitoring usullari uch guruhga bo'linadi:

- radiografik,
- radioskopik (radiatsiya introskopik usullari),
- radiometrik.

Sanoatdagi eng sodda va keng tarqalgan usul - radiografiya usulidir. Ushbu test ob'ekti radiografik suratini olish imkonini beradi, bu test natijasining hujjatli dalilidir. Ob'ekt orqali uzatiladigan radiatsiya detektori fotoplenka yoki yarim o'tkazgich plastina bo'lishi mumkin.

O'rganilayotgan ob'ektlarni emirmasdan sinovdan o'tkazishning radioskopik usuli chiqish ekranda yorug'lik tasvirining radiatsion-optik o'zgartirgichini olish asosida amalga oshiriladi. Ushbu usulni qo'llashda ob'ektning strukturasining xususiyatlarini tahlil qilish to'g'ridan-to'g'ri nazorat qilish jarayonida amalga oshiriladi. Ushbu usul sizga boshqarish ob'ektlarini turli burchaklar ostida ko'rish imkonini beradi, natijada natijalarning ishonchliligini oshiradi.

Fluoroskopik ekranlar, sintillash kristallari, elektron-optik o'zgartirgichlar, elektromagnit va termolyuminescentli ekranlar ob'ektning yashirin radiatsiya tasvirini yorug' soyali tasviriga aylantiradigan radioskopik detektor sifatida ishlatiladi. 10.6-rasm rentgen videkon bilan jihozlangan radioskopik qurilmaning blok-sxemasi keltirilgan. Radioskopik usulning sezuvchanligi radiografik usuldan kamroq.

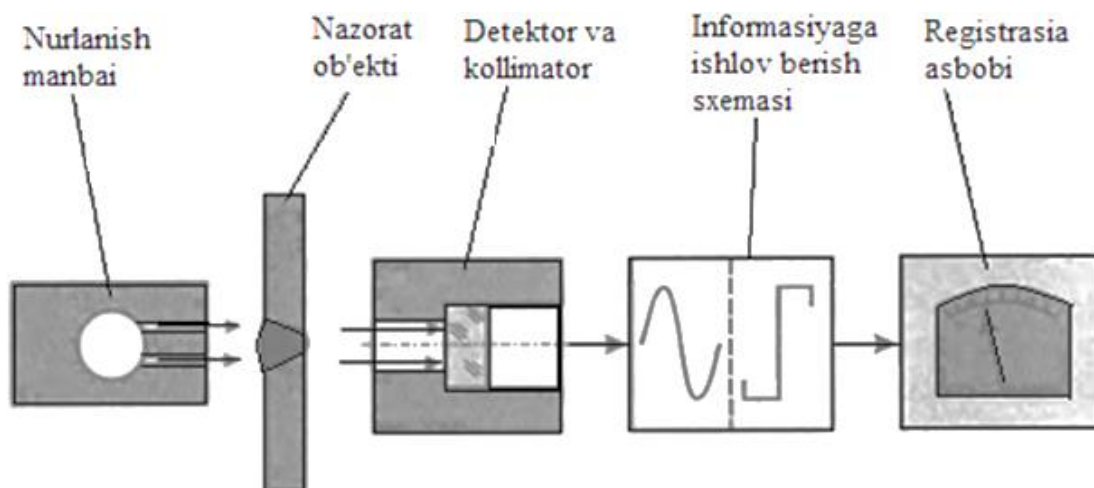


10.6-rasm. Radioskopik qurilma blok-sxemasi

Radiometrik nuqsonlarni aniqlash usulini bajarishda, ob'ektning ichki holati to'g'risida ma'lumot elektr signallari shaklida olinadi, uning kattaligi ob'ekt orqali o'tadigan radiatsiya oqimiga mutanosibdir. Ushbu uslubning afzalliklari

avtomatlashtirish, yuqori ishlash tahlili bilan bog'liq. Radiometrik kuzatuv uchun ishlatiladigan montajning blok diagrammasi 10.7-rasmda keltirilgan.

Radiatsion monitoringni amalga oshirish uchun maxsus uskunalarining bir nechta turi ishlatiladi. Ular orasida turli turdagi rentgen apparatlari (statsionar, mobil, portativ);  $\gamma$ -detektorlari (ko'chma, portativ, statsionar); betatronlar; chiziqli tezlatkichlar va mikrotronlar; yopiq radioizotopli  $\gamma$ - va  $\beta$ -nurlanishining manbalari.



10.7-rasm. Radiometrik qurilmani blok-sxemasi

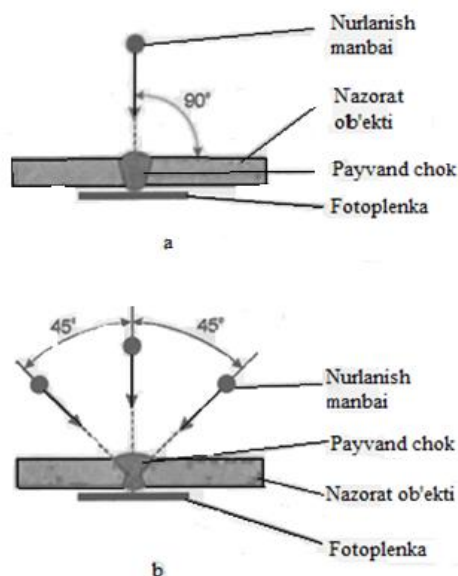
Ob'ektlar orqali uzatiladigan nurlanishni aniqlash maqsadida turli xil ionlashtiruvchi detektorlardan foydalanish mumkin. Bunga ionizatsiya kameralari (GOST 18668-73) va gazni hisoblagichlar kiradi. Amalda bir nechta gaz hisoblagichlari qo'llaniladi: proporsional, Geyger-Myuller (GOST 17415-72, GOST 17416-72), koronnali (GOST 17414-72), uchqun.

Radiatsion nazorat usuli bir qator operatsiyalarni amalga oshirishni o'z ichiga oladi. Asosiy amaliyotlarga quyidagilar kiradi: test ob'ektning loyihalashini tahlil qilish, optimal skaner tasvirini aniqlash, radiatsiya manbasini tanlash, laboratoriya xodimlarini ionlashtiruvchi nurlanishdan himoya qilish, kasetlarni zaryadlash va o'rnatish, ularni tarqalgan nurlanishdan himoya qilish uchun choralar ko'rish.

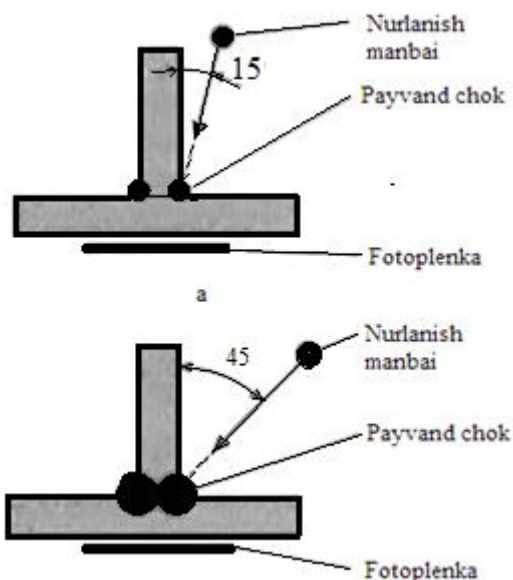
Radiatsion nazorat sifatini belgilovchi asosiy omillardan biri radiatsiya manbalarini tahlil qilinayotgan ob'ektga nisbatan joylashtirishning to'g'riligi. qoplangan payvand chokning skanerlashning mumkin bo'lgan yoritish sxemasi 10.8-rasmda ko'rsatilgan. Boshlang'ich listlarni qirralarini X-shaklida kesish amalga oshirilganda, choklarning 10.8,b-rasmda ko'rsatilgan sxema bo'yicha yoritishni tavsiya etiladi. T-payvandlangan choklarni birlashtiruvchi elementlarning to'liq va to'liq bo'lmagan eritib borishini yoritish uchun 10.9-rasmdagi sxemadan fodalaniлади. qoplangan va burchakli payvandlangan choklarni diagnostikasi xususiyatlari 10.10-rasmda ko'rsatilgan. quvurlarning radiatsiya nazorati odatda bitta devor orqali yoritish amalga oshiriladi (10.11-rasm). 10.12 va



10.13-rasmlarda diametri katta quvurlar (130 mm dan ortiq) yoritish va kichik nazorat ob'ektlari uchun berilgan.



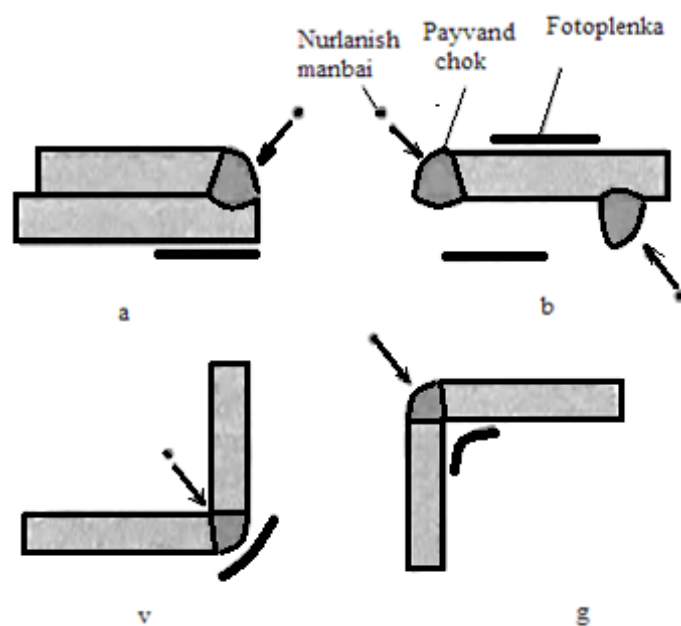
10.8-rasm. Payvand choklarni nur bilan tekshirish sxemasi: a- listlarni qirralariga dastlabki ishlov berilmagan payvand chok; b- listlarni qirralariga X-shaklidagi ishlov berilgan payvand chok



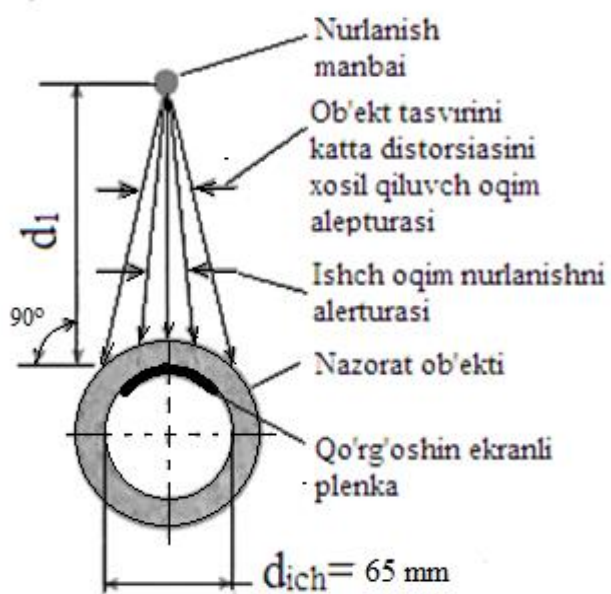
10.9-rasm. T-tipidagi payvand choklarni nurlantirish sxemasi:

a-birikma elementlari to'liq eritilmagan; b- birikma elementlari to'liq eritilgan

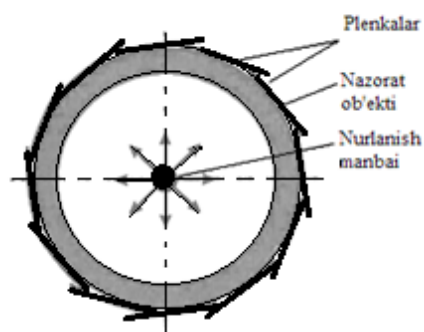
Ko'plab murakkab geometrik shakldagi haqiqiy ob'ektlarni aniqlanganda, tasvir sifati va nuqsonlarning aniqlanishini kamaytiruvchi omil alohida elementlarning har xil qalinligidir.



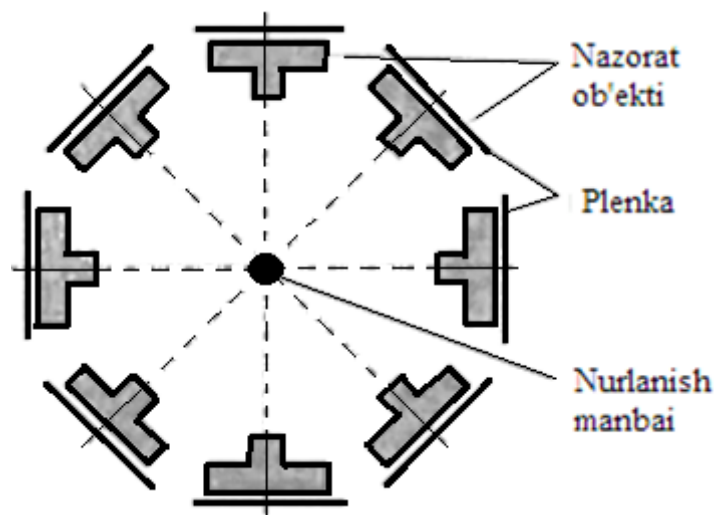
10.10-rasm. Ustam-ust (a,b) va burchak (v,g) payvand birikmalarni nurlash sxemasi



10.11-rasm. Xalqali payvand birikish chokini bir devor ortidan nurlantirish



10.12-rasm. Katta diametrdagi trubani nurlash sxemasi



10.13-rasm. Bir xil ob'ektlarni nurlash bilan nazorat qilish sxemasi

Murakkab geometrik shaklning ko'plab haqiqiy ob'ektlarini tashhislashda tasvir sifatini va nuqsonlarni aniqlashni kamaytiradigan omil alohida elementlarning turli qalinligi hisoblanadi. Ushbu turdagi ob'ektlarni tadqiq qilish, rasmni qoralash zichligini tenglashtiradigan maxsus kompensatorlar yordamida amalga oshiriladi. Kompensatorlar nazorat qilinadigan ob'ektlar bilan bir xil materiallardan yoki atom raqami va zichligi bilan ularga yaqin bo'lgan materiallardan tayyorlanadi.

Qattiq, suyuq va kukun kompensatorlarini ishlatishda tajriba mavjud. Amalda, tasvirning qorayishini zichligi uchun hatto shakllantirilgan plitalar ham ishlatiladi - boshmak, qotishma, mastika, qurug' yoki og'ir elementlarning suyuq tuzlari. Turli shakllarda mahsulotlarni nazorat qilish uchun kompensatorlarni ishlatish misollari 10.14-rasmda ko'rsatilgan.

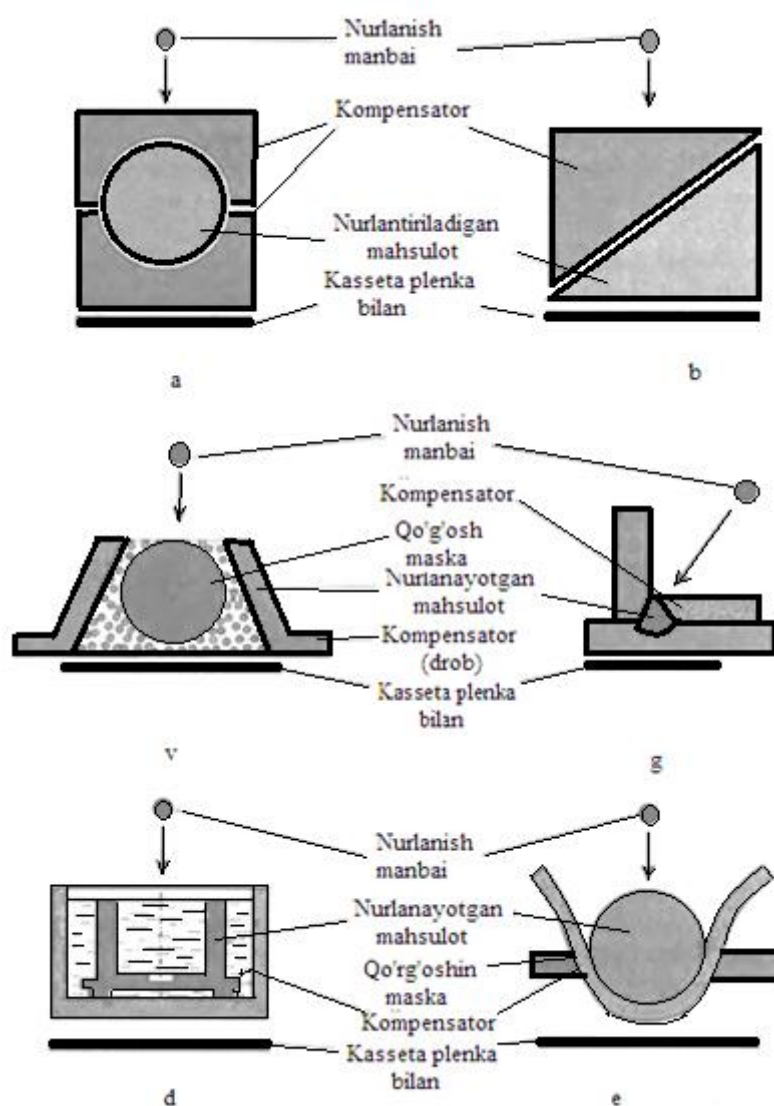
Nazorat qilinadigan ob'ektlarning qalinligi oshishi emissiya spektrining o'zgarishiga olib keladi. Uning yumshoq komponenti kechiktirilsa, unda qattiqroq komponent saqlanib qoladi.

Radiatsion monitoring vaqtida olingan tasvirlarning sifati turli sezuvchanlik etalonlari bo'yicha baholanadi. Kimyoviy tarkibi va zichligi nazorat ob'ekti materialiga mos keladigan materiallardan namunalar tayyorlanishi kerak. hozirgi paytada foydalanilmoqda:

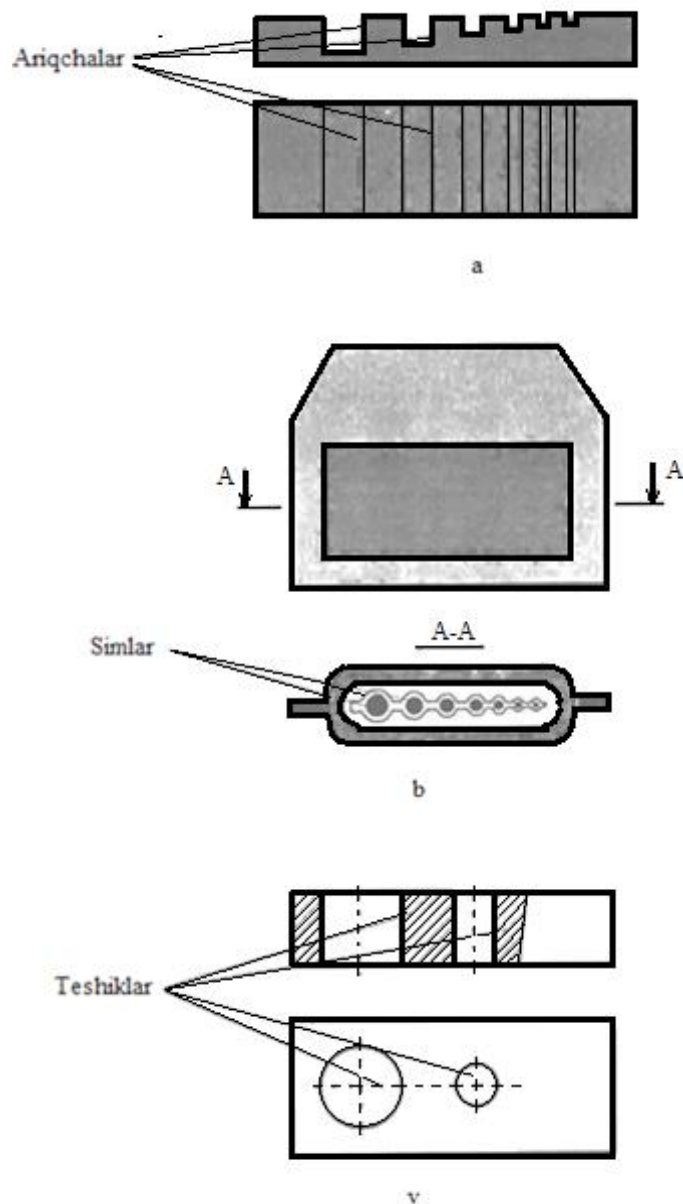
- pog'onali turidagi sezgirlik etalonlari,
- ariqchali etalonlar,
- simli etalonlar,
- pog'anali-teshikli etalonlar,
- plastinkali etalonlar.

10.15-rasmda radiatsion monitoringni amalga oshirishda foydalaniladigan ariqchali, simli va plastinkali etalonlar ko'rsatilgan. Etalonlar, natijada olingan

tasvirlarning nisbatan sezgirligini taxmin qilish imkonini beradi. Ariqchali etalonlarni uchta etaloni o'lcham mavjud. har bir etalonda oltita ariqcha hosil qilingan. Simli etalonlarni to'plami to'rtta o'lchamga ega. har bir etalonda ettita sim mavjud bo'lib, ular plastmassa idishga kigizilgan. Simlarni geometrik diapazon diametri 0,05...4 mm oraliqida joylashgan. Plastinkali etalonlarni ochiq teshiklari mavjud. Ularni 12 ta o'lchami qo'llanilib, qalinligi 0,1 dan 2,5 mm oraliqida. har bir plastinada ikkita teshik ochilgan. Etalonlarning har biri belgilangan bo'lib, unda qaysi materialdan tayyorlanganligi va uning o'lchamlari (nomeri). Etalonni turini tanlash ob'ektning tabiati va nazorat shartlari bilan belgilanadi.



10.14-rasm. Detal qalinligi kompensatorlari: a,b- bashmaklar; v- metall drob; g-mastika; d- suyuq kompensator; e-detalni qisman folga bilan o'rash



10.15-rasm. Segirlikning ariqchali (a), simli (b) va plastinkali (v) etalonlari

Radiatsion nazoratni amalga oshirishda yakuniy natijani belgilaydigan asosiy parametrlar quyidagilardan iborat:

a) energiya manbai uchun:

- manba energiyasi;
- radiatsion energiya taqsimot spektri;
- ekspozitsion dozasi quvvati;

b) ob'ektni nazorati uchun:

- ob'ektning materiali;
- materiallar zichligi,  $\rho$ ;
- elementning atom raqami,  $z$ ;
- chiziqli susayish koeffitsienti,  $\mu$ ;

- dozani yig'ish omili,  $V$  (sinov ob'ektidagi materialda radiatsion tarqalishning xarakteristikasi),
- nazorat qilinadigan ob'ektda mavjud bo'lgan odatiy kamchiliklarning moddiy tavsifi;
- nazorat ob'ektidagi odatiy kamchiliklarning o'lchami;

c) detektor uchun:

- spektral sezuvchanlik;
- hal qilish qobiliyati;

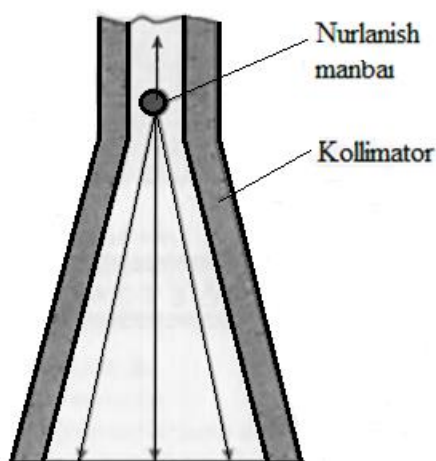
d) boshqarish jarayoni uchun

- mutlaq va nisbiy sezgirlik ( $W_{mym}$ ,  $W_{huc}$ ),
- nuqsonlarni aniqlash,
- ishlash nazorati.

$W_{mym}$  ning mutlaq sezuvchanligi radiatsion nazorat usuli tatbiq etilayotganda aniqlangan minimal nuqson yoki etalon elementining o'lchamlari bilan aniqlanadi.  $W_{huc}$  usul bo'yicha nisbatan sezgirligi minimal aniqlanishi mumkin bo'lgan nuqson yoki etalon  $\Delta\delta$  elementining mahsulotning qalinligigacha  $\delta$  bo'lgan hajmining nisbati:

$$W_{huc} = \Delta\delta \cdot 100\%$$

Yo'naltirilgan ionlashtiruvchi nurlanishni shakllantirish uchun kollimatorlar (odatda, asosan, qo'rg'oshin yoki uning qotishmalaridan tayyorlangan) (10.16-rasm) ishlatiladi.



10.16-rasm. Yo'naltirilgan nurlash oqimini hosil qilish sxemasi

Olingan rentgenografiya tasvirini dekodlash jarayoni ko'plab omillar, jumladan nazorat ob'ektining geometrik xususiyatlari, nazorat vositalarining texnik xususiyatlari va operatorning malakasi bilan ta'sirlanadi. Ayniqsa, mas'ul bo'lgan ob'ekt nazorat ostiga olinadigan bo'lsa, kamchiliklarning mavjudligi qabul qilinmaydi, kamida ikkita malakali operatorni jalb qilish tavsiya etiladi.

### **NAZORAT SAVOLLARI:**

1. Rentgen nurining tabiati va xossasi o`anday?
2. Doimiy nurlanuvchi rentgen o`urilmalarining umumiy tuzilishi.
3. Doimiy nurlanuvchi rentgen lampasining tuzilishi va ishlash printsipi.
4. Impuls rentgen nurlanuvchi apparatli tuzilishi.
5. Impuls nurlanuvchi rentgen lampasining tuzilishi va ishlash printsipi o`anday?
6. Rentgenografik nazoratda fokus masofasi nima deyiladi?
7. Rentgenografik nazoratning asosiy parametrlarini ayting.
8. Doimiy nurlanuvchi apparatni ekspozitsiya va?ti ?anday ani?lanadi?
9. Impuls apparatlarning nazorat kŷrsatgichlarini ayting.
10. Kuchaytiruvchi ekranning vazifasi nimadan iborat?
11. Rentgen nazoratini ŷtkazishning tartibi.

## АДАБИЁТЛАР

1. Арутнов П.А., Толстшина А. Атомно-силовая микроскопия в задачах проектирования приборов микро- и нанoeлектроники. Ч. 1. - М.: Микроэлектроника, 1999. - Т. 28. - № 6.
2. Бахтизин Р.З. Сканирующая туннельная микроскопия - новый метод изучения поверхности твердых тел // Соросовский образовательный журнал. - 2000. - № 11.
3. Бирке Л. С. Рентгеновский микроанализ с помощью электронного зонда. - М.: Металлургия, 2018. - 315 с.
4. Бехтерев А.В. Современные тенденции развития оборудования для атомно-эмиссионного спектрального анализа / В.А. Лабусов, В.И. Попов, А.Н. Путьмаков, Д.О. Селюнин. - Труды 4 междунар. симпозиума «Применение МАЭС в промышленности». - Новосибирск, 2003. - С. 4-9.
5. Брандон Д., Каплан У. Микроструктура материалов. Методы исследования и контроля. - М.: Техносфера, 2004. - 384 с.
6. Практическая металлография. - М.: Высшая школа, Богомолова Н.А. 2012.-272 с.
7. Выборное Б.И. Ультразвуковая дефектоскопия. - М.: Металлургия, 2004.-240 с.
8. Встченко В.Н. Контроль качества сварных конструкций - М.: Машиностроение, 2015 - 152 с.
9. Гиваргизов Е.И. Кристаллические висеры и наноострия // Природа. - 2003. - № И.
10. Дробышев А.И. Основы атомного спектрального анализа: учеб. пособие / А.И. Дробышев. - СПб.: Изд-во С.-Петербург, ун-та, 2013. - 200 с.
11. Данилов А.И. Сканирующая туннельная и атомно-силовая микроскопия в электрохимии поверхности // Успехи химии. - 1995. - № 8. - С. 818-833.
12. Илюшин В.А., Величко А.А. Процессы нанотехнологии. - Новосибирск: Изд-во НГТУ. -2004. - 108 с.
13. Кузяков Ю.Я. Методы спектрального анализа / К.А. Семененко, Н.Б. Зоров. - М.: Изд-во МГУ, 1998. - 213 с.
14. Кустанович КМ. Спектральный анализ / И.М. Кустанович. - М.: Высшая школа, 1998.-351 с.



- 15.Металловедение и термическая обработка стали. В 3 т. / Под ред. М.Л. Бернштейна, А.Г. Рахштадта. - Т.1. Методы испытаний и исследования. - В 2 кн. Кн. 1. -М.: Металлургия, 2014.-304 с.
- 16.Микроанализ и растровая электронная микроскопия / Под ред. Ф. Мо Морис, Л. Мени, Р. Тискье. - М.: Металлургия, 2001. - 392 с.
- 17.Методы акустического контроля металлов / Н.П. Алешин, В.Е. Белый, А.Х. Вopilкин и др. - М.: Машиностроение, 2012.-456 с.
- 18.Методы спектрального анализа: учебник для ун-тов / Под ред. В.И. Левшина. - М.: Изд-во МГУ, 2003. -3 509 с
19. Неразрушающий контроль металлов и изделий. Справочник / Под ред. Г.С. Самойловича - М.: Машиностроение, 2007.-456 с.
- 20.Пилянкевич А.Н. Пилянкевич А.Н. Практика электронной микроскопии. Методы препарирования. - М.: Машиностроение, 2011.-230 с.
- 21.Практические методы в электронной микроскопии / Под ред. Одри М. Глоэра. - Л.: Машиностроение, 2013. - 375 с.
- 22.Практическая растровая электронная микроскопия / Под ред. Дж. Гоулд-стейна и Х. Яковица. - М.: Мир, 2011. - 656 с.
- 23.Рид С. Введение в микрозондовый анализ. - М.: Металлургия, 2001. - 305 с.
24. Тушинский Л.М. Структурная теория конструктивной прочности материалов. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. 400 с.
- 25.Уманский Я.С., Скоков Ю.А., Иванов А.Н., Расторгуев Л.Н. Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия. - М.: Металлургия, 1999. - 632 с.
26. Электронная микроскопия в металловедении: справ, изд. / А.В. Смирнова, Г.А. Кокорин, С.М. Полонская и др. - М.: Металлургия, 2012. - 192 с.
27. <http://www.geokniga.org/labels/6621>
28. <http://www.bgshop.ru>
29. [www.livelib.ru](http://www.livelib.ru)
30. <http://www.teor-meh.ru/books/>
31. <https://ftfsite.ru>
32. <https://www.chitai-gorod.ru>
33. <https://dic.academic.ru>
34. <https://markmet.ru>
36. <http://www.berl.ru>
37. [www.ibmcm.sk.ru/](http://www.ibmcm.sk.ru/)
38. <https://scienceforum.ru>

39. <https://cyberleninka.ru>
40. <https://studref.com>
41. <http://www.ndt-club.com>