

O‘ZBEKISTON RESPUBLIKASI
OLIY VA O‘RTA MAXSUS TA‘LIM VAZIRLIGI

MIRZO ULUG‘BEK NOMIDAGI
O‘ZBEKISTON MILLIY UNIVERSITETI

“YARIMO‘TKAZGICHLAR VA POLIMERLAR FIZIKASI”
KAFEDRASI

5140200 – Fizika ta‘lim yo‘nalishi

MIRJAMOLOV MIRAHROR MIROLIM O‘G‘LI

“Qiyin eruvchi kirishmalarga ega kremniyning elektrofizik xossalarini
o‘rganish” mavzusidagi

BITIRUV MALAKAVIY ISHI

BITIRUVCHI: Mirjamolov M.M.

ILMIY RAHBAR: f.-m.f.d., prof. Utamuradova Sh.B.

TOSHKENT – 2018

MUNDARIJA		
Kirish.....		3
I–bob. Kremniyning parametrlarini termik ishlov berish hamda radiatsion nuqsonlarning hozirgi holati		
§1.1	Kremniydagi sayoz va chuqur markazlarni tadqiqot qilishining hozirgi holati	5
§1.2	Kremniyning elektrofizik parametrlariga issiqlik ishlov berishning ta’siri.....	17
§1.3	Radiatsion nuqsonlar to‘g‘risidagi umumiy ma’lumotlar.....	21
II-bob. Namunalarni tadqiq qilish usullari va ularni tayyorlash texnologiyasi		
§2.1	CHuqur sathli nuqsonlarni tadqiqot qilishining sig‘imli usullari.....	27
§2.2	IQ – yutilish metodi.....	30
§2.3	To‘rt zondli usul va namunalarni tayyorlash texnologiyasi.....	38
§2.4	O‘lchash metodikasi.....	43
III-BOB. Gafniy bilan legirlangan kremniyning elektrofizikxossalarini o‘rganish		
§3.1	Gafniy bilan legirlangan kremniyning xossalari xaqida.....	46
§3.2	O‘stirish usuli bilan legirlangan kremniyning IQ-yutilish spektrini o‘rganish.....	49
§3.3	Si<Hf> namunaga yuqori temperaturali ishlov berishni solishtirma qarshilikning taqsimlanish profiliga ta’sirini o‘rganish.....	53
Xulosa.....		57
Foydalanilgan adabiyotlar ro‘yxati.....		57
Izohli lug‘at.....		63

KIRISH

Ishning dolzarbligi. Hozirgi paytda yarimo'tkazgichli materiallarni ya'ni qiyin eruvchi, o'tuvchi hamda noyob er elementlari bilan legirlash orqali kerakli tipdagi nuqsonlarni kiritish va ularda kechayotgan fizik-kimyoviy jarayonlarni o'rganish zaruriyati kundan-kunga oshib bormoqda. Chunki, bu kirindilarni kremniyga kiritish orqali radiatsiyaga va issiqlikka chidamli turli xil datchiklar olish imkoniyati mavjud, ammo bu kirindilarni to'liq xususiyatlari hali yaxshi o'rganilmaganligi sababli masala ochiq qolmoqda. Shu bois mazkur elementlarni yarimo'tkazgichli materiallarga kiritib undagi fizikaviy jarayonlarni o'rganish so'zsiz dolzarb masala hisoblanadi.

Shuning uchun kremniyga noan'anaviy kirindilarni kiritib ular hosil qilgan chuqur sathlarni parametrlarini aniqlash va ularning boshqa kirindi atomlari bilan ularning o'zaro ta'sirlashishini o'rganish lozim. Bundan tashqari yarimo'tkazgichli asboblarni tayyorlanish jarayonida turli xil issiqlik va nurlanishlardan o'tkazilishda turli xil nuqsonlar hosil bo'lishi ehtimolligi ortib boradi. Ularni aniqlash uchun o'ta sezgir va yuqori ajratish qobiliyatiga ega qurilmalarni qo'llash talab etiladi.

Shu bois mazkur Bitiruv malakaviy ishining mavzusi qiyin eruvchi kirishmalarga ega kremniyning elektrofizik xossalariga termik ishlov berish va nurlanishning ta'sirini o'rganishga bag'ishlangan.

Ishning maqsadi: Mazkur Bitiruv malakaviy ishining asosiy maqsadi kremniyning tarkibiga qiyin eruvchi ya'ni Si<Hf> elementining legirlanish, termik ishlov berish va xosil bo'lgan qo'shimcha qatlamlari parametrlariga MT-22 elektron nurlatgichning tez elektronlar nurlanishining ta'sirini va o'stirish paytida va diffuziya usulida gafniy atomlari kiritilgan kremniyga radiatsion nurlarning ta'sirini o'rganishga bag'ishlangan.

Qo'yilgan maqsadga erishish uchun quyidagi masalalar bitiruvchi oldiga qo'yildi:

1. Gafniyning diffuziya usuli bilan va eritmadan o‘stirish yo‘li bilan legirlangan kremniy namunalarining yuzasiga termik ishlov berish natijasida elektrofizik parametrlarini o‘zgarishini o‘rganish.
2. Gafniy bilan legirlangan kremniyning parametrlariga nurlanishining ta‘sirini o‘rganish.
3. Diffuziya usulida gafniy atomlari kiritilgan kremniyga nurlarning ta‘sirini tadqiq etish.

Bitiruv malakaviy ishning amaliy ahamiyati: Texnologik jarayon orqali turli (legirlash, diffuziya va o‘stirish) jarayon Gafniy bilan legirlangan kremniy asosida termik ishlov radiatsiyaga chidamli va stabil xarakteristikali yarimo‘tkazgichli material va asboblarni (fotodatchiklar) yaratish imkoniyatni beradi.

Bitiruv malakaviy ishining strukturasi va hajmi: Bitiruv malakaviy ish 65 betdan, jumladan, kirish, 3 bob (nazariy, amaliy, o‘lchov natijalari) dan, xulosa, foydalanilgan adabiyotlar ro‘yxati hamda izohli lug‘atdan iborat.

I-BOB. KREMNIYNING PARAMETRLARINI TERMIK ISHLOV BERISH HAMDA RADIATION NUQSONLARNING HOZIRGI HOLATI

§1.1. Kremniydagi sayoz va chuqur markazlarni tadqiqot qilishning hozirgi holati

Keng qo'llaniluvchi yarimo'tkazgichlardan kremniy (Si) va germaniy (Ge) Mendeleev davriy sistemasidagi IV-guruhga tegishli va kovalent bog'lar vositasida kristall sifatida bo'ladi. Yarimo'tkazgich xossalari boshqarish uchun ularga davriy sistemadagi V-guruh elementlaridan (P, As va Sb) birortasi qandaydir usul (diffuziya, o'stirish, epitaksiya va h.k.) bilan kiritilganda sayoz donor sathlar hosil bo'lishi va III- guruh elementlari (B, Al, Ga) kiritilganda esa sayoz akseptor sathlar hosil bo'lishi va asosan tugunlarga joylashishlari ma'lum.

Yarimo'tkazgichlardagi sayoz sathlar xususiyati shu paytgacha yaxshi o'rganilgan va ularning nazariyasi ham asosan ishlab chiqilgan. Sayoz sathli kirindilar to'liq vodorod tipidagi modelga bo'ysinadi va elektron (kovak)larning bog'lanish energiyasi [1] ko'ra, quyidagi formula bilan ifodalaniladi:

$$E_n = \frac{m_e \varepsilon_0 E_h}{m_0 n^2 \varepsilon^2} = \frac{\left(\frac{m_e}{m_0}\right) \varepsilon_0^2}{n^2 \varepsilon^2} 13.5 \text{ eV} \quad (1.1)$$

-bu erda m_0 – yarimo'tkazgichdagi elektronning effektiv massasi;

ε va ε_0 – kristall va vakuumning dielektrik

singdiruvchanligi; n – bosh kvant soni;

E_n – vodorod atomining ionizatsiya energiyasi.

Kremniydagi sayoz sathlar uchun elektron va kovakning ionlashish energiyasi (1.1) formuladan hisoblanganda, eksperimentda olingan natijalarga juda yaqin ekanligi aniqlangan.

Lekin, ko'pchilik kirindilar uchun ionizatsiya energiyasi (1.1) formula bilan hisoblangandagiga nisbatan katta ekanligi ma'lum. Bu kirindilarning

ruxsat etilgan zona chetidan ancha uzoqda sathlarni hosil qilishi eksperimental tadqiq etilgan. Bundan tashqari ular, faqat bitta sath hosil qilibgina qolmay balki, bir nechta sathlar ham hosil qilishi mumkin, ya'ni turli zaryadli holatlarga mos ravishda. Ayrim kirindi atomlar amfoterli xususiyatga ega bo'lib, ya'ni ham donorli va ham akseptorli sathlar hosil qilishlari mumkin. Chuqur sathli kirindilar sayoz sathli kirindilardan farqliroq, ular asosan tugunlar aro joylashishlari mumkin. Bu holatda donorli yoki akseptorli kirindi atomlarining xarakteri valentlikka bog'liq bo'lmay, elektromanfiylik qiymati bilan aniqlanadi.

Agar, kirindi atomlarining X_n elektromanfiyligi asosiy kristall X_m elektromanfiyligidan katta bo'lsa, kirindi akseptor xususiyatiga va aks holda ya'ni $X_n < X_m$ bo'lsa, kirindilar donor xususiyatiga ega bo'ladi.

Kremniyda chuqur sath hosil qiluvchi kirindilarning holati ko'p mualliflar [1-3] tomonidan o'rganilgan.

Kirindi sathlarining energetik holati asosiy panjaraning elektron va geometrik strukturasi joylashishi, ya'ni elektron bulut strukturasi va uning o'lchami hamda panjarada kirindi atomning joylashuvi bilan aniqlanadi.

Ko'pgina elementlar kremniyning taqiqlangan zonasida eneregetik sath hosil qiladilar, ulaning qiymati va tipi bir necha oddiy qoidalarga [2.3] bo'ysinadi. II va III – guruh elementlari asosan tugunga joylashganliklari uchun, o'rin almashuvchi kirindilar deb hisoblanadi va tetraedrli bog'lanish hosil qiladilar, shuning uchun ular o'zlariga elektronlarni talab etadilar. Bunday kirindilar akseptorli kirindilar deb ataladi.

II va III – guruh elementlaridan Te va In chuqur sathli kirindilar bo'lib, tugunlarga joylashganliklari uchun akseptorli kirindilar hisoblanib mos ravishda $E_v + 0.16$ eV va $E_v + 0.26$ eV chuqur eneregetik sathlarni hosil qilar ekan. Kremniyda ma'lum barcha bo'lgan chuqur sathlardan, bular yagona bir sathli stabil kirindilar hisoblanar ekan.

[1.2] ishlarda kadmiy bilan legirlangan kremniy ustida tadqiqot olib borilgan. Kadmiy ikki zaryadli akseptorli chuqur sath hosil qilishi aniqlangan bo'lib, u $E_v + 0.55$ eV (bir marta zaryadlangan) va $E_s - 0,45$ eV ga (ikki marta

zaryadlangan) teng ekanligi ko'rsatilgan. [4] ishda kadmiy kremniyga 1200°C diffuziya qilingan va undagi elektr faol markazning konsentratsiyasi $5 \cdot 10^{13} \text{sm}^{-3}$ teng ekanligi aniqlangan.

[1] ishda kumushning kremniydagi xususiyatlari o'rganilib, $E_v + 0.32 \text{ eV}$ li bitta donorli chuqur sath hosil qilishi aniqlangan, bu [8] ishdagi ma'lumotlarga mos tushadi va bundan tashqari yana $E_s - 0,22 \text{ eV}$ li akseptorli chuqur sath aniqlangan. [9] ishda $E_v + 0.26 \text{ eV}$ li donorli va $E_s - 0,29 \text{ eV}$ li akseptorli chuqur sathlar aniqlangan. [10] ishda esa $E_v + 0.405 \text{ eV}$ li donor sathli va $E_s - 0,593 \text{ eV}$ li akseptorli chuqur sathli nuqsonlar hosil bo'lishi aniqlangan.

Kumush ham oltin kabi kremniyga tez diffuziya bo'ladigan kirindilardan bo'lib, 1200°C da diffuziya koeffitsenti $D = 10^{-8} \text{ sm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ teng ekanligi aniqlangan. Ularda diffuziya tugunlar aro bo'lib, keyinchalik esa sekin asta tugunlarga o'tishi ko'zatilgan. Radioaktiv tadqiqotlarga ko'ra, Ag ning eruvchanligi 10^{17} sm^{-3} dan oshmasligi va unda elektr faol bo'lgan kumushning konsentratsiyasini 10^{15} sm^{-3} dan ortiq olib bo'lmasligi ko'rsatilgan.

Oltin kremniyda juda to'liq o'rganilgan chuqur sath beruvchi kirindilardan biri bo'lib hisoblanadi. Amaliyot uchun juda muhim nazaridan qaraydigan bo'lsak, oltin kiritilgan yarimo'tkazgichlarda zaryad tashuvchilarning yashash vaqtini boshqarish mumkin ekanligi ta'kidlangan [2] va mazkur ishlarda oltin kremniyga kiritilganda $E_v + 0,35 \text{ eV}$ li donor va $E_s - 0,54 \text{ eV}$ li akseptorli chuqur sathlar hosil qilishi aniqlangan.

Ma'lumki, o'tuvchi metallar ichida temir atomlarini kremniydagi xususiyatlarini o'rganish katta qiziqish hosil qilgandi: chunki temir texnikada keng tarqalgan metallardan bo'lib, kremniyga issiqlik ishlov berishda uning sirtiga to'satdan o'tirish ehtimolligi katta. Temirning diffuziya koeffitsenti katta bo'lganligi uchun kristallning butun chuqurligi bo'yicha tarqalishi va temir sathlaridagi zaryad tashuvchilarning ko'ndalang tutish qobiliyati katta bo'lganligi tufayli, juda oz konsentratsiyali temir atomlari ham

yarimo'tkazgichlardagi zaryad tashuvchilarning yashash vaqtini kamaytirib yuborishi mumkin. Kremniydagi temir atomlarining to'liq konsentratsiyasini aniqlash oson emas, chunki neytron-aktivatsion tahlil usuli temirga nisbatan sezgirligi o'ta past, bu degani yarimo'tkazgichli asboblarda temir hosil qiladigan chuqur sathlar yo'q degani katta miqdorda elektr faol bo'lmagan temir yo'qligini bildirmaydi. Yarimo'tkazgichli asboblarda ishlash jarayonida issiqlik ta'siriga uchrasa, temir atomlari faol bo'lmagan holatdan faol holatga o'tishi mumkin, bu esa o'z navbatida yarimo'tkazgichli asboblarning yashash vaqtini pasaytirib yuboradi. Bu esa o'z navbatida, kremniyli asboblarning ishdan chiqishining sabablaridan biri bo'lib hisoblanadi.

Temir bilan legirlangan kremniyning xususiyatlarini o'rganish bo'yicha ko'p ishlar qilingan [4-7].

Temirning kremniyda chuqur sath hosil qilishini birinchi bo'lib [4-5] ishlarda Xoll EYUKning temperaturaga bog'liqligi orqali o'rganilgan bo'lib, temir atomi kremniyda $E_v + 0.4$ eV li donor xususiyatga ega bo'lgan chuqur sath hosil qilishi tadqiq etilgan.

[2] ishda bu chuqur sath nomuvozanatli bo'lib, uy haroratida $E_v + 0.4$ eV donorli sathdan $E_s - 0,55$ eV li donorli sathga aylanishi ko'rsatilgan.

[1] ishda elektr xususiyatlarini o'lchash orqali, $E_s - 0,55$ eV li sath temir-bor juftligi bilan bog'liq ekanligi aytilgan. [4] ish mualliflari EPR spektrlari orqali tadqiqotlar olib borib, yuqoridagi sath vakansiya o'zaro ta'sirlashib akseptor xususiyatga ega ekanligini faraz qilishgan.

[5] ishda temir bilan legirlangan kremniyning elektr xususiyatlari tadqiq etilgan. Tadqiqot natijalariga ko'ra, temir kremniyda ikkita $E_s - E_{d1} = 0,10 \pm 0,01$ va $E_v + E_{d2} = 0,40 \pm 0,02$ eV li sathlar hosil qilishi aniqlangan. Mazkur ishda namuna sifatida solishtirma qarshiligi $10 \div 300$ Om sm., dislokatsiya zichligi $\sim 10^4$ sm⁻², kislorod konsentratsiyasi esa 10^{16} sm⁻³ bo'lgan n - va p - tipli monokristall kremniy qo'llanilgan. Namunalarga FeCl₂ eritmasidan elektrolitik usulda temir surtaldi va argon bilan to'lg'azilgan kvarts ampulalar

1000-1300 °C da qayta kuydirildi. Legirlash bilan bir paytda, xuddi shu temperaturalarda, vaqtlarda boshqa ampulalarda kremniyli kontrol namunalar temirsiz kuydirildi. Barcha namunalarda kuydirishdan oldin va keyin elektr o'tkazuvchanlik (σ) va Xoll doimiysi (R) 77 - 400⁰K da o'lchandi.

1230⁰C da temir atomlari bilan legirlangan n - tip kremniyning o'tkazuvchanligining temperaturaga bog'liqligi grafigi ikkita namuna uchun ko'rsatilgan. Rasmga ko'ra, tadqiqot qilinayotgan temperatura oralig'ida namunalarning o'tkazuvchanlik sohasida to'g'ri chiziqli soha kuzatilmoqda, bu esa kremniyning taqiqlangan zonasida lokal energetik sath kuzatilmoqda. Bu sath donor tabiatga ega bo'lib, o'tkazuvchanlik zonasidan $0,11 \pm 0,01$ eV pastda joylashgan ekan. Mazkur sathning bo'lishi to'g'risida oldingi adabiyotlarda axborot berilmagan.

Mazkur ishda yana diffuziya usulida temir atomlari kiritilgan p – tip kremniyda boshlang'ich kirindi konsentratsiyasi va kiritilgan temirning bir-biriga bog'liqlik orqali kerakli solishtirma qarshilikli namunalarni olish mumkinligi ko'rsatilgan.

p – tip kremniyga temir atomlari kiritilishi $N_a \geq N_{Fe}$ zaryad tashuvchilar konsentratsiyasini holatda keskin kamayishiga, $N_a < N_{Fe}$ holatda esa materialni o'tkazuvchanlik tipi o'zgarib, elektronli o'tkazuvchanlikka aylanadi.

Temir bilan legirlangan p-tip kremniyning $N_a > N_{Fe}$ bo'lgan holati uchun o'tkazuvchanlikning temperaturaga bog'liqligi ko'rsatilgan [5]. Bu ma'lumotlarga ko'ra, kremniyning taqiqlangan zonasining pastida ionizatsiya energiyasi $0,40 \pm 0,01$ eV li valent zonasining shipida yana bitta donor sath hosil qilishini isbotlaydi.

[6] ish mualliflari temir atomini kremniyga 1100⁰C diffuziya orqali kiritib, diodning sig'imini diffuziyadan oldin va keyin o'lchash orqali diffuziyadan so'ng, temir atomlari kremniyda ionizatsiya energiyasi $E_v + (0.41-0.5)$ eV li teng bo'lgan keng sathni aniqladilar.

[7] ishda kremniydagi temir atomlarining boshqa kirindi atomlari bilan o‘zaro ta‘sirini o‘rganish uchun ^{55}Fe radioaktiv izotopi orqali avtoradiografiya usulida tadqiqot olib borilgan. Tadqiqot olib borish uchun Choxralskiy usulida o‘stirilgan n-Si, boshlang‘ich solishtirma qarshiligi $5 \div 300 \text{ Om}\cdot\text{sm}$ va orientatsiyasi $\langle 111 \rangle$ bo‘lgan namunalar qo‘llanilgan.

Kremniyni legirlash $T=1200^{\circ}\text{C}$ da 2 soat mobaynida havosi so‘rib olingan kvars ampulalarda diffuziya jarayoni amalga oshirildi va diffuziyadan so‘ng ular tez sovutildi ya‘ni ampulalarni moyga tashlash yordamida. Xuddi shunday sharoitda kontrol namunalar diffuzantlarsiz kuydirildi. Diffuzantlar (Fe, Mn, Co, Ni) kremniy sirtiga kerakli metallni surtish uchun HCl da eritiladi va eritma kremniy sirtiga tomiziladi. Issiqlik ishlovi berishdan avval kremniy sirtidagi boshqarib bo‘lmaydigan kirindilardan tozalash uchun, kremniyni kislotali-perekсли qayta ishlashdan o‘tkaziladi.

Temirning radioaktiv izotopi ^{55}Fe metall sifatida HCl da eritiladi. Radioaktiv temirni namunaning bir tarafiga surtiladi. Namuna havoda quritilgandan so‘ng, temirning bir jinsli taqsimotini aniqlash uchun RF-3 plenkaning sirtida radiograflash amalga oshirildi.

[8] ishda p –tipli kremniydagi temirning metastabil markazlari tadqiq etilgan. p–tipli kristallarda chuqur nuqsonlarning metastabilligi Pining effekti hisobiga sodir bo‘lishi kristall sirtida Fermi sathi namunaning xajmida nomuvozanatli kovaklarning indutsirlangan diffuziyasi hisobiga bo‘lar ekan.

O‘tuvchi metallardan yana biri bu marganets bo‘lib, temirga o‘xshab donorli tabiatga ega. Marganetsni kremniydagi diffuziya koeffitsenti juda katta bo‘lganligi sababli, marganets kemniyda tugunlararo joylashar ekan, ammo oxirgi marta Vudberi va Lyudvig [9] tomonidan olingan natijalar yuqoridagi fikrga to‘g‘ri kelmasligini tasdiqlamoqda.

Mazkur ishda farz qilinishicha, marganets kremniyning tugunlarida joylashganda stabillashgan holatda ya‘ni (Mn^+ yoki Mn^{2-}) ko‘rinishida

bo'lishligi aniqlangan va agar vakansiya mavjud bo'lgan holda (Mn^+ yoki Mn^{2-}) tugunlararo joylashgan bo'lib harakatchan bo'lib qolar ekan.

Marganets bilan legirlangan kremniydagi chuqur sathlarni o'rganish bo'yicha bir necha yillar davomida turli usullar bilan ko'pgina ishlar qilingan. Bu ishlari asosan ikki yo'nalishda olib borilgan. Birinchi yo'nalish bo'yicha quyidagi mualliflar [10,11-12] chuqur sathlarni tegishli energetik holatlarini va rekombinatsion tavsiflarini o'rganishga qaratilgan. Ikkinchi yo'nalish bo'yicha quyidagi mualliflar [2,9] kristall panjaradagi lokal simmetriya, zaryadli holatning tabiati va kiritilgan markazning strukturalarini aniqlashga qaratilgan. Bu tadqiqotlar shuni ko'rsatdiki, marganets atomi kremniy panjarasida turli xil kristallografik va zaryadli holatlarda Mn^{++} , Mn^+ , Mn^0 , Mn^- , Mn^- , $(Mn^0)_4$, $(Mn^{++}V^-)$ va h.k. bo'lishligi aniqlangan. Marganetsning bunday holatlarda bo'lishi, turli xil komplekslar va uy haroratida ham nostabil bo'lgan holatlarda bo'lishi o'z navbatida marganetsga tegishli chuqur sathlarni parametrlarini aniqlashda qiyinchiliklar tug'dirmoqda, olingan natijalarni va eksperimental natijalarni interpretatsiya qilishda bir-biriga qarama-qarshi bo'lishiga olib kelmoqda. Ikkila yo'nalish bo'yicha ish olib borayotgan mualliflar bir-biriga bog'liq bo'lmagan holda tadqiqotlarni olib borishgan va shuning uchun olingan natijalar orqali kremniy panjarasidagi marganets atomlarni hosil qilgan chuqur sathlarini aniqlashda yoki identifikatsiya qilishda tushunmovchiliklar ko'p.

[11] ishda mualliflar kremniydagi marganets bilan bog'liq chuqur sathlar o'rganilgan. Ular bu ishda bir xil namunalarda EPR va sig'imli spektroskopiya usullari yordamida marganetsning kremniydagi chuqur sathlarini hosil bo'lishi o'rganilgan bo'lib, unda marganetsga tegishli paramagnit va lokal sathlarning mutanosibligi o'rganilgan.

Bu ishda marganets atomlari kremniyga havosi so'rib olingan kvarts ampulalarda parli faza $1250\text{ }^{\circ}\text{C}$ da 2 soat vaqt mobaynida diffuziya qilingan. Boshlang'ich kremniy sifatida elektronli-fosforli kremniy (EFK) markasi ishlatilgan bo'lib, solishtirma qarshiligi $\rho = 0,3\div 110\text{ Om}\cdot\text{sm}$ ni tashkil etgan. Diffuziyadan so'ng namunalarda, 3 xil tezlikda sovutilgan: 1). Pechkadan kvarts

ampulali namuna to'g'ridan-to'g'ri suvga tushirilib kvarts sindirligan bo'lib, namuna suvga tushirilgan (v_1) – tezlikka ega bo'lib A seriyali; ampula pechdan suvga tushirilib ampula sindirmay shunday holatda sovtilgan bo'lib (v_2) – tezlikka ega bo'lgan B seriyali; ampula pechni ichidan olinib havoda sovutilgan bo'lib (v_3) – tezlikka ega bo'lgan V seriyali.

Chuqur sathlarning parametrlari oz o'zgargan bo'lib, ularning konsentratsiyasi esa sovutish tezligi ϑ bog'liq ekanligi aniqlangan. Diffuziyadan so'ng, marganets kiritilgan n-kremniyning solishtirma qarshiligi 300 K da salgina kamayganligi kuzatilgan. Paralell xuddi shunday sharoitda kontrol namunalari ham tayyorlangan.

Sig'imli o'lchashlarni amalga oshirish uchun vakuumda oltinni kremniy siritiga purkalib Shottki bareri tayyorlangan. Chuqur sathlarni aniqlovchi nostatsionar sig'imli spektroskopiya (DLTS) usulida emissiya tirqishi $t_1=10$ va $t_2=60$ ms va temperatura esa 77-300K oralig'ida o'zgartilib o'lchovlar olib borilgan. Olingan natijalarga ko'ra, marganets bilan legirlangan n-Si da, energiya ionizatsiyasi fiksirlangan 3 ta 0.20, 0.42 va 0.54 eV li chuqur sathli nuqsonlar hosil bo'lishi va mos ravishda elektron ko'ndalang kesimi σ_n : $7 \cdot 10^{17}$, $8 \cdot 10^{15}$ va $8 \cdot 10^{14}$ sm^2 teng ekanligi aniqlangan [11]. Sovutish tezligi eng katta bo'lgan legirlangan namunalarning barchasida marganetsning konsentratsiyasi 10^{14} sm^{-3} tartibda ekanligi va kuzatilayotgan chuqur sathlarning ya'ni I va III sathlari sovutish tezligiga katta bog'liq ekanligi kuzatilgan. Boshlang'ich kristalldagi fosforning konsentratsiyasi II va III sathlar konsentratsiyasiga ta'sir etmasligi va fosforning konsentratsiyasi oshishi bilan I sath konsentratsiyasi kamayishi kuzatilgan.

V seriyali namunalarda energiya ionizatsiyasi $E_s-0.20$ i $E_s - 0.54$ eV teng bo'lgan ikkita chuqur sath kuzatilgan bo'lib, bu sathlarning konsentratsiyasi va tutish qobiliyati σ_n A va B seriyali namunalarga nisbatan sal farq qilishi aniqlangan.

Kontrol namunalarda esa, energiya ionizatsiyasi $E_s-0.20$ va $E_s - 0.47$ eV [11] teng bo'lgan chuqur sathlar kuzatilgan. Chuqur sathlar hosil qilgan

piklarning temperatura diapazoni, legirlangan namunalarga nisbatan farq qilishi aniqlangan. Bundan tashqari ϑ_1 sovutish tezligi bilan sovutilgan namunalarning DLTS spektrida past signalli $E_s - 0.31$ eV li energetik sath mavjudligi aniqlangan. Olingan natijalarga ko'ra, izotermik relaksatsiya sig'imi va DLTS spektrlari bir-birga mos ekanligi aniqlangan.

[12] ishda DLTS, IQ yutilish, rentgen topografiyasi va elektron mikroskopiya usullari yordamida kompleks tadqiqotlar olib borish, shuni ko'rsatdiki elektr faol marganets va elektr faol bo'lmagan marganets atomlarining o'zini tutishi kislorod va uglerodga ham bog'liq ekanligi ko'rsatilgan. Haqiqatan o'stirish paytida kiradigan kislorod va uglerod atomlari kremniy panjarasida doim mavjud. DLTS spektrlarni o'rganish orqali marganetsga tegishli chuqur sathlarning Mn^0 va $(Mn^0)_4$ bilan n-Si ($E_s - 0.42$ i $E_s - 0.54$ eV bilan $\sigma_n \sim 8 \cdot 10^{-15}$ va $2 \cdot 10^{-4}$ sm^2) hosil bo'lish effektivligi kislorod va uglerodning miqdoriga bog'liq ekanligi aniqlangan.

Optik faol kislorodning kremniyda bo'lishi, diffuziya paytida marganets atomlarining konsentratsiyasini oshishiga olib kelar ekan.

IQ yutilish spektriga ko'ra, kremniyga marganets kiritilganda kislorod va uglerod atomlarining optik faol konsentratsiyasi kamayishi aniqlangan. Kisloroddan farqli o'laroq, qaysiki kislorodning optik faol konsentratsiyasi 10 - 50% ga kamayishi, o'z navbatida mazkur effektning kuchayishiga va optik faol uglerod konsentratsiyasining 1 – 1,5 tartibga kamayishi mumkin ekanligi ko'rsatilgan. Bunda optik faol uglerod konsentratsiyasining kamayishi o'z navbatida yutilish chizig'ini 607 dan 620 sm^{-1} ga so'rilishini ko'rsatgan. 400÷4000 sm^{-1} diapazonida IQ yutilish spektrida qo'shimcha chiziq kuzatilmagan.

N_o^{opt} va N_s^{opt} konsentratsiyalarining bunday kuchli kamayishiga marganets atomining kremniyga diffuziya qilinishi bilan bog'liq bo'lib, kontrol namunalarda (Mn siz) esa kislorod va uglerod atomlari konsentratsiyasining kamayishi kuzatilmagani aniqlangan.

[13] ishda mualliflar solishtirma qarshiligi $\rho = 10^3 \div 10^5 \text{ Om}\cdot\text{sm}$ bo'lgan namunalarda ya'ni marganets atomlari bilan kompensirlangan kremniyda o'zgaruvchan tok xususiyatiga ega bo'lan effekt aniqlangan. Bunda namunaga qo'yilayotgan bo'sag'a energiya E_n qiymatidan salgina oshirilgan va temperatura oralig'i $250 - 350 \text{ K}$ bo'lgan qorong'ulikda tokni qo'zg'atish tebranishi amalga oshirilgan. Temperaturasi oshishi bilan E_n ning qiymati $210\text{-}250 \text{ V/sm}$ kamayishi va bo'sag'a chastotasining $10^2 - 1.8 \cdot 10^4 \text{ Hz}$ ga oshishi kuzatilgan.

Tokning tebranish parametri ularni qo'zg'atish sharoitiga bog'liqligi aniqlangan. Elektr maydon va temperatura oshishi bilan tok qiymatining $10^{-7} \div 5 \cdot 10^{-4} \text{ A}$ oralig'ida amplitudasi oshishi va temperatura oshishi tebranish chastotasini eksponensial o'sishiga hamda maydon bir muncha kamayishiga va nisbatan yuqori maydonlarda qo'shimcha garmonik qo'zg'alish tebranish chastotasini oshishiga olib keladi.

Qo'zg'atish sharoitiga ko'ra, tebranish toki parametrlarining o'zgarishiga tavsifi tahlilini solishtirish asosida va boshqa materiallarda kuzatilgan tebranish tokining xuddi shunday parametrlari hamda marganets bilan legirlangan kremniy namunalarning parametrlari hisob-kitobi orqali kuzatilayotgan tokning tebranishi kristalldagi sekin rekombinatsion to'lqinlarning qo'zg'alishi hisobiga ekanligi faraz qilingan.

Yaqinda [14] I shda temir guruhidagi o'tuvchi metallarning xususiyatlari muammosi sifatida, kremniyga kiritilgan marganets ionlari misolida ko'rilgan. Ishda fenomenologik model faraz etilib, unda oldingi ishlardan farqliroq ikkilamchi nuqson ya'ni marganets ioni va kremniy vakansiyasi ekanligi ta'kidlangan. Mazkur model nuqtai nazaridan tugunlararo marganets markazi ekanligi ko'rib chiqilgan.

Keyingi yillarda yarimo'tkazgichli tezkor ishlovchi asboblarni tezkorligini oshirish maqsadida asosiy bo'lmagan zaryad tashuvchilarning yashash vaqtini kamaytirish uchun oltin bilan bir qatorda titan atomlarini

kremniyga legirlash yaxshi natijalarni bermoqda. [15-16] ishlarda titan kremniyda chuqur sath beruvchi kirindi bo'lib, u o'z navbatida asosiy bo'lmagan zaryad tashuvchilarning yashash vaqtini kamaytirishi mumkinligi aniqlangan.

Titanni polikristallik kremniy asosidagi quyosh elementlarini ifloslovchi yoki metallurgik kremniydan olingan "Quyosh tozaligiday" material asosda tayyorlangan monokristallik element sifatida qarash mumkin. Kremniyni kimyoviy tozalash yo'li bilan ya'ni xlorosilanni redistilyasiya qilish orqali sifatli va qimmatbaho turuvchi yarimo'tkazgichli material olish mumkin. Ma'lumki, "Quyoshli element" [17] nomi bilan kremniyga yaqin bo'lgan metallurgik kremniyni kerakli sathgacha tozalab, hozirgi kunda arzonroq usulda olinadigan jarayonlarga katta vaqt ajratilmoqda.

Titan konsentratsiyasi 0.05% ni tashkil etsa va segregatsiya koeffitsienti esa 10^{-6} oralig'ida bo'lsa, u holda metallurgik kremniyni tortib o'stirish orqali titanni konsentratsiyasini 10^{14} sm^{-3} ga chiqarish mumkin ekan. Mazkur material ya'ni titan atomlari asosida tayyorlangan $n^+ - p$ quyosh elementi orqali olib borilgan o'lchashlar FIK ni keskin kamayishiga olib kelar ekan.

O'tuvchi elementlar yoki 3d elementlar elektron asboblarning ishga tushirish va ishlatish xarakteristikalariga kuchli ta'sir etib ularning kremniydagi holatini o'rganish ko'pgina ilmiy-tadqiqot ishlarining predmeti bo'lib hisoblanadi [1-3,18].

Keyingi yillarda metall silitsidlarni hozirgi texnologiyada qo'llash ya'ni bunaqa tadqiqotlarni olib borishga so'zsiz qiziqishlarni orttirib bormoqda. Shunaqa silitsidlar ichida (HfSi_2) disilitsid Gafniyni maxsus texnologiyada qo'llanishi so'zsiz keraklidir [11].

Bu oxirgi jarayonda HfSi_2 silitsidi kremniy tagligi bilan to'g'ridan-to'g'ri kontaktga ega bo'lib, yuqori haroratli ishlov berishda [16] metallik ifloslanish manbai bo'lib hisoblanadi.

Masalan oxirgi diffuzion ishlardan [15] da $950 \text{ }^\circ\text{C}$ da 30 min. issiqlik ishlov berish orqali Gafniyni 10 mkm chuqurlikkacha 10^{12} sm^{-3} gacha

to'yintirish orqali amalga oshirishgan. Shuning uchun barcha texnolog va tadqiqotchilarni titanni kremniydagi elektr faol qiymatini bilish zarurdir.

Oxirgi yillarda [17] ishda gafniy atomlari kiritilgan kremniyning chuqur sathlar hosil qilishi va xususiyatlarini o'rganishga doir ma'lumot chop etilgan. Ayrim ishlarda kremniyning taqiqlangan zonasining $E_s-0.50$ eV dan $E_s-0.54$ eV oralig'ida chuqur sathlarni hosil bo'lishi DLTS o'lchovlari orqali aniqlanganligi ma'lum, bundan tashqari yana ikkita donorli sath, bittasi taqiqlangan zonaning yuqori qismida $E_s-0.28$ eV va ikkinchisi taqiqlangan zonaning pastki qismida joylashgan $E_v+0.25$ eV li sathlar aniqlangan. Bulardan tashqari, [15,16] ishlarda titan kremniyda $E_s-0.08$ eV li akseptorli sath hosil qilishi to'g'risida ma'lumot berilgan.

Yana shuni takidlash lozimki, xuddi shu namunalar qatoridagi namunalarda $E_s-0.28$ eV li sath kuzatilgan. Xoll effekti orqali olib borilgan tadqiqotlarga ko'ra, gafniy kremniyda $E_s-0.21$ eV li sath kuzatilgan va oldingi natija bilan solishtirish ishlari qilinmagan. Bulardan tashqari, donorli sath $E_s-0.27$ eV [15] ishda ma'lumotga ko'ra, elektronlarni emissiya tezligi elektr maydoni qiymatiga bog'liq ekan hamda kutilgan katta o'zgarishlarning teskariligi Pul-Frenkel effekti orqali sodir bo'lar ekan.

[15] ishdagi ma'lumotlarga ko'ra, ikkita $E_s-0.27$ eV va $E_v + 0.24$ eV li sathlar faol gafniyning birinchi ham ikkinchi tartibli elektr sathi mos ekan. Bundan tashqari, [18] ish mualliflari tomonidan energiya ionizatsiyasi $E_s-0.09$ eV li yana bitta sath kuzatilgan. Ularning konsentratsiyalari teng ekanligi aniqlandi va shu ma'lumotga ko'ra bu uchala sath ham Gafniyning kremniydagi turli zaryadli holatiga to'g'ri kelishi aniqlangan.

[16] ishda DLTS spektri orqali gafniyning kremniydagi taqsimot profilini aniqlash usuli orqali gafniyning diffuziya koeffitsienti va eruvchanligi aniqlandi.

[16,18] ishlarda gafniy kremniydagi energetik sathlarni MDYa strukturalarda sig'imli spektrskopiya usuli bilan o'rganish natijasida, 0.17- 0.23 eV oralig'ida donorli sath hosil bo'lishi aniqlangan. Mazkur ishda, gafniy

kremniyda ikkita donorli sath hosil qilishi va ko'ndalang kesimi 300 K da 10^{-15} va 10^{-17} sm² ga teng ekanligi aniqlangan.

Ayrim ishlarda [16] ko'ra, gafniy kremniyda amfoterli kirindi ekanligi to'g'risida faraz qilingan. Adabiyot sharhiga ko'ra, titanni kremniydagi xususiyatlarini o'rganish bo'yicha tizimlangan ishlar qilinmagan, olingan natijalar turli va bir-biriga qarama-qarshi ekanligini ko'rish mumkin.

Shunday qilib, ko'pgina mualliflar tomonidan aniqlangan natijalarga ko'ra, titanning kremniydagi ionizatsiya energiyasi bir-biridan juda katta farq qilishi, titanning tabiati hali aniq emasligi ko'rinib turibdi. Adabiyotlarda o'stirish jarayonida gafniy atomlarini kremniyga kiritishga doir ishlar umuman qilinmagan. Gafniy atomlarni kremniydagi texnologik va boshqa kirindilar bilan o'zaro ta'siri ham o'rganilmagan.

§1.2 Kremniyning elektrofizik parametrlarigi issiqlik

ishlov berishning ta'siri

Hozirgi paytda ishlab chiqarilayotgan yarimo'tkazgichli asboblarda va integral sxemalar u yoki bu jihatdan issiqlik ta'siriga duchor bo'lar ekan. Shuning uchun, issiqlik ishlov berish jarayonida, kremniyda qanday o'zgarishlar sodir bo'lishini aniqlash lozim. Kremniyni qisqa vaqtda va nisbatan yuqori haroratda qizdirish, uning elektrofizik xususiyatlarini (konsentratsiya va zaryad tashuvchilar yashash vaqti) o'zgartirib yangi strukturaviy nuqsonlar va boshlang'ich materialdagi nuqsonlarning qayta o'zgartish olib kelar ekan.

Termik ishlov berish natijasida kremning elektrofizik xususiyatlari o'zgaradi, kremniyning taqiqlangan zonasida murakkab spektrli lokal sathlarning (issiqlik markazlari) hosil bo'lishi bilan bog'liq ekan. Mazkur issiqlik markazlari manbai, bu kristall hajmi va sirti ekan.

Past haroratli ishlov berishda hosil bo'ladigan markazlar, odatda elektr faol kremniy-kislorod komplekslari hosil qilishi va undan tashqari kristallning turli chala nuqson komplekslari bilan bog'liq [2].

Kremniyga issiqlik ishlov berish jarayonida asosan donor tipdagi nuqsonlar hosil bo'lar ekan. Bunday kremniydagi termik nuqsonlarning hosil bo'lishida kislorod asosiy rolini o'ynaydi. Ma'lumki, Choxralskiy usulida o'stirilgan kremniyga past haroratli ishlov berilganda, ya'ni 300-500 °C da issiqlik donorlari (termodonorlar) hosil bo'lar ekan. Donor tipidagi markazlarning hosil bo'lishi, SiO₄ tetraedr tipidagi birinchi yoki ikkinchi tartibli kremniy-kislorod komplekslarining hosil bo'lishi bilan tushuntiriladi.

Past haroratli ishlov berishda issiqlik nuqsonlarini hosil bo'lishi, kislorodning kremniydagi tuingan qattiq eritmasining ertaroq bo'linishi hisobiga ekan. Haqiqatan, 450 °C da uzoq vaqt temperaturaviy ishlov berilsa, termik nuqsonlar maksimal konsentratsiyaga erishishgandan so'ng, ularning konsentratsiyasi kamayishi aniqlangan.

Kislorod miqdoriga qarab, kremniydagi termik nuqsonlarning maksimal konsentratsiyasi kubik bog'lanishga ega ekanligi, kislorod kompleksni 4 atomdan katta elektr faol bo'lmay kattalashish jarayoni sodir bo'lar ekan. Shunday qilib berilgan temperaturada muvozanatga erishish statsionar holat deyilar ekan. Mazkur markazning keraklicha to'planishi temperaturani oshishiga kattiq eritmaning tez bo'linishiga, natijada kurtaklarni o'ta yuqori konsentratsiyasi ($>10^{15}\text{sm}^{-3}$) hosil bo'lishiga olib kelar ekan. To'yinish darajasini kamayishi sirtiy energiyaning ortishi hisobiga pretsipitatlarning ittifoqini xosil qilar ekan.

[1-2] ishlarda $T= 600-800^{\circ}\text{C}$ da issiqlik nuqsonlar intensiv hosil bo'lishining ikkinchi sohasi bo'lishi ko'rsatilgan. Oldindan issiqlik ishlovini 300-500 °C olib borilganda, issiqlik nuqsonlarining ikkinchi maksimumi hosil bo'lishining zaruriy sharti bo'lib hisoblandi.

Issiqlik ishlov berishning harorati oshirilganda o'ta murakkab komplekslar SiO_x (x=4) hosil bo'ladi, ular donor xususiyatga ega emas ekan. Haroratni yana ham oshirish ya'ni 600-900 °C ga yuqoridagi komplekslar bo'linishi sodir bo'lib, natijada erkin strukturali SiO₄ guruhi hosil bo'lib, u

Issiqlik nuqsonlar o'sishining ikkinchi sohasiga to'g'ri kelar ekan. Namunalarga oldindan uzoq vaqt 350-500 °C da ishlov berilsa, issiqlik nuqsonlar konsentratsiyasining ikkinchi sohasida o'sishi aniqlangan.

[17] ishda Choxralskiy usulida o'stirilgan kremniyga 600-800 °C da issiqlik ishlovi ta'siri tadqiq etilgan. Tadqiqotlar solishtirma qarshiligi 40 Om·sm, dislokatsiyasiz fosfor bilan legirlangan kremniydagi kislorodning konsentratsiyasi $\sim 10^{18}\text{sm}^{-3}$ (IQ yutilish usulida olingan ma'lumot) bo'lgan teng namunalarda olib borilgan. Materialning elektrofizik xususiyatlariga izotermik va izoxorik otjig'larning ta'siri o'rganildi. Izotermik otjigning to'g'ri chizig'i keltirilgan. Temperatura oshishi bilan 2 ta pik kuzatiladi, ular issiqlik donorlarining o'sishi va keyin pasayishiga javob beradi. Birinchi pik 350-500°C sohada va kislorodli tetraedrlar generatsiya sohasiga mos tushadi va donorli xususiyatga ega. Temperatura oshishi bilan ularning konsentratsiyasi pasayadi, keyin qaytadan donornlarni oshishi kuzatiladi., ular 800°C dan yuqori temperaturada yo'q bo'lib ketadi. Izotermik otjig 700°C da zaryad tashuvchilarning konsentratsiyasini o'zgartirmaydi va xuddi shu namunani dastlabki past haroratli otjig 450°C da 20 soat otjig qilinsa, boshida kinetik egri chiziq past haroratda ham donor xususiyatini bermaydigan yana ham murakkab komplekslar hisobiga kuzatiladi. Ayrim vaqtlardan keyin donor holatlarda generatsiya boshlanib, mazkur jarayonning tezligi kislorodni tetraedrlarini polimerlanishi tezligiga nisbatan ancha sekinlashgan holatda ekan.

Yuqorida aytilgan fikrlarga, ko'ra 1-chi va 2-chi issiqlik donornlari bir xil tabiatga ega ekanlar [3]. Mazkur ishda 600-800°C da hosil bo'ladigan issiqlik donornlari to'g'risida quyidagi fikrlarni aytdilar. Issiqlik donornlarining hosil bo'lishlarining bosh sharti, bu 350-500°C da past haroratli ishlov berish ekan. Unda kislorodning elektrofaol komplekslari, balki kislorod elektr faol bo'lmagan atomlari ham hosil bo'lishidir.

Issiqlik ishlovi jarayonida, ya'ni temperaturaning 600-800°C da, qachonki, tuyingan qattiq eritmaning bo'linish kompensatsiya hodisasi natijasida kislorod komplekslarining dissotsiatsiyasi oddiy holga utib borar ekan. Bunda

kislorod tetraedrining elektr xususiyatlari yana ham o'zni namoyon qiladi. Yuqori harorat ishlov berishda markazlarning hosil bo'lishi kristallning hajmi va sirtida bo'layotgan jarayonlarning yuzaga kelishi bilan bog'liq ekan. Yuqori haroratli ishlov berish jarayonida uzoq vaqtli otjigda sirtning roli ochilib, sirtning nisbiy roli hajm maydon munasabati hisobiga sirtoldi, undan tashqari yana diffuziya koeffitsienti oshishi, masalan: dislokatsiya zichligining oshishi hisobiga.

800-1250⁰C da yuqori haroratli ishlov berishda yashash vaqtini o'zgarishi sodir bo'ladi, bu o'z navbatida kristall hajmida sodir bo'lishi jarayoni bilangina bog'liq bo'lmay, balki sirtidagi kirinilarni diffuziyasi bilan ham bog'liqdir [18]. Maxsus choralar ko'rilmasa, asosiy bo'lmagan zaryad tashuvchilarning kamaytirilishi kirindilarni diffuziyasi asosiy rolni o'ynashi mumkin.

Qator ishlarda asosiy bo'lmagan zaryad tashuvchilarning 2-3 mk.sek gacha kamayishi mumkinligi ko'rsatilgan. 1200⁰C da asosiy bo'lmagan zaryad tashuvchilarning kamayishi katta tezlikda sovutilgandamaksimal bo'ladi, otjigga olib kelishi natijasida rekombinatsion markazlar konsentratsiyasining kamayishiga olib keladi, sekin sovutilganda hosil bo'lgan rekombinatsiya maxsus energetik holat energiya intervaliga $E_v+(0,1\pm 0,02)$ eV mos tushar ekan.

Yuqori haroratli ishlov berishganda ($T>1000^0C$) va albatta sovutish tezligida ($\leq 10^3$ grad/s) donor $E_s+0,55$ eV tipidagi issiqlik markazi va akseptorli $E_v+0,55$ eV, yana donor tipidagi 2 zaryadlangan markaz sathlari $E_s+0,26$ eV va $E_s+0,54$ eV kiritilar ekan.

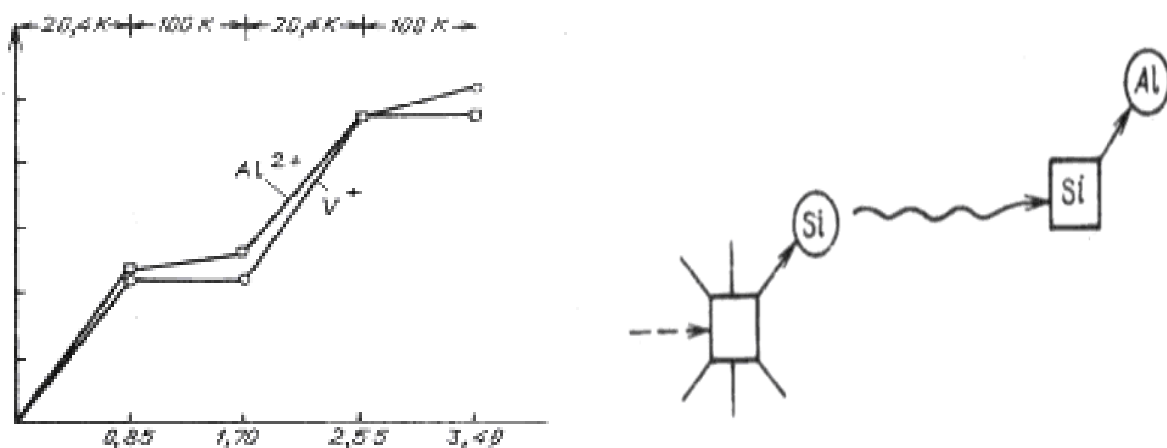
Issiqlik ishlovi oshishi bilan rekombinatsiya rekombinatsiyada toblangan markazlar eksponensial oshadi $N \sim \exp(-E_z / kT)$, bu erda $E_z= 0,83\pm 0,02$ eV, issiqlik ishlov berish paytida kiritilgan toblangan markazlar rekombinatsiyasi energiya hosil qilish bilan utma-ust tushadi.

Kuzatilayotgan toblangan markazlar rekombinatsiya markazariga past hararatli ishlov berishdan ko'rinib turibdiki, ular strukturaviy nuqsonlarni yoki boshqarib bo'lmaydigan kirindi – nuqson strukturaviy komplekslar yuzaga keltirar ekan.

Texnologik ishlov berish jarayonida kremniyning sirti quyidagi Au, Fe, Cu va h.k. kirindilar bilan ifloslanishi mumkin. Modomiki, bu kirindilar yuqori haroratda katta koefitsient diffuziyaga ega bo'lganligi uchun, u holda mos ravishda issiqlik ishlov berishda ular kristallni parametrlarini o'zgartirib, uning hajmiga kiradi.

§1.3 Xususiy tugunlararo atomlar hamda kislorodli kremniyning optik xususiyatlarini o'rganish

Kristall nurlantirilganda vakansiya va tugunlar nuqson konsentratsiyalari bir xil miqdorda hosil bo'lar ekan. Ammo alyuminiy bilan legirlangan kremniyda ($\text{Si}\langle\text{Al}\rangle$), past haroratli nurlantirishda ($T < 4 \text{ K}$) da EPR spektri bilan bir qatorda, vakansiyaga tegishli EPR spektri hosil bo'ladi, buni Al^{2+} spektri kabi identifikatsiya qilingan [29]. Spektrlar izolyatsiyalangan vakansiya kabi 1:1 munosabatda generatsiya qilinadi, u 1.3-rasmda keltirilgan. Bu fizik hodisani tushuntirish uchun, quyidagi sifatli ko'rsatkichli model taklif qilingan.



1.3-rasm. Past haroratli elektronlar bilan nurlantirilgan p-Si da nuqsonlarni hosil bo'lishi. Birinchi to'qnashish vaqtida generatsiyalangan Si dagi tugunlararo atom kremniyga chuqurroq kirib va tugunda Al atomlari bilan o'zaro ta'sirlashadi (1.4-rasm). 1.4-rasm. Uotkins modeli. Bunda, tugunlararo kremniy atomi, Al atomi bilan o'rin almashib, Al tugunlararo joylashib qoladi. Mazkur mexanizm, ya'ni o'rin almashish aniq o'rnatilgan bo'lib, bunaqa

ta'sirlashish boshqa III-guruh elementlari va uglerod atomi bilan ham kuzatilgan [29,31,1]. Kremniydagi tugunlararo atomning ko'chishi ehtimoli termik mexanizmda sodir bo'lib, ya'ni nuqsonning zaryad holatining o'zgarishi hisobiga ekan [20].

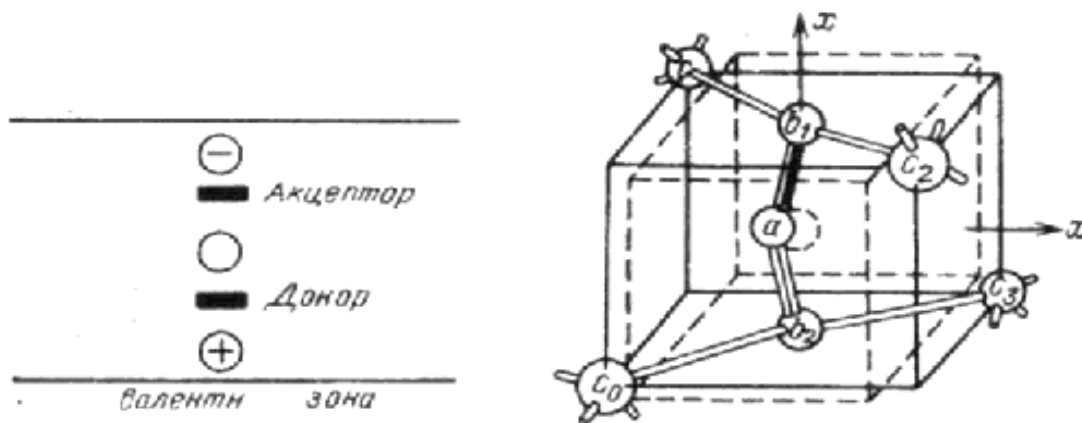
Olmos tipidagi panjaradagi tugunlararo atom turli holatlarni egallashi mumkin: tetraedr (T), geksagonal (G), ikki atom orasidagi ikki holatli (to'g'ri chiziqli va buklangan) va parchalangan holda.

Xyukkel usulida olib borilgan hisoblashlarga ko'ra, $\langle 100 \rangle$ yo'nalishda kengayotgan tugunlararo atom kremniydagi eng kichik energiyaga teng bo'lib, uning o'sib borib – geksagonal va tetraedr holatda bog'lanishi ko'rsatilgan. Uning zaryad holati o'zgarishi orqali $\langle 100 \rangle$ yo'nalish holatidan nuqsonni ko'chirish bog'lanish holatidan boshqa holatga o'tishining ehtimolligi katta ekan [2].

Oxirgi paytlarda kremniyning tugunlararo atomining elektron strukturasi, kelishilgan hisob-kitoblar orqali Grin funksiyasi usulida amalga oshiriladi. Olingan natijalarga ko'ra, klassterlardan farqliroq, kremniyning tugunlararo atomi tetraedr holatda bo'lishi maqsadga muvofiqdir. Bu holatda u taqiqlangan zonada chuqur sath qosil qilar ekan. $E_v - 0,8$ eV li A_1 sath valent zonada joylashgan va T_d sath o'tkazuvchanlik sohasida esa $E_c + 2$ eV teng ekan. Shuning uchun tugunlararo atom kremniyda tetraedr holatda EPR va ChSNSS usullari orqali kuzatiladi. Kremniydagi tugunlararo atomni siqish orqali T-tugunlararo 2 ta elektron A_1 sathni to'ldiradi, shu sababli n –tip Si da tugunlararo atom 1 ta elektron yoki 2 ta elektron lokallashgan vodorodsimon orbitali, u bitta karrali musbat zaryadlangan yoki neytral holatda bo'lar ekan.

n-tip Si ni past haroratda nurlantirsak, u holda 80% da vakansiya, 140 K da yo'qolar ekan [46]. Shu paytgacha qilingan ishlarning tahliliga ko'ra, kremniydagi tugunlararo atomning energetik sathi va zaryadli holati to'liq yechilmagan. Birinchi bo'lib [20,26] ishlarda kremniyning tugunlararo atomi amfoterli deyilgan, ya'ni tugunlararo atom n –tip Si da akseptorli va p –tip Si da esa donorli ekanligi 1.5-rasmda keltirilgan.

Shu paytgacha kremniyning izolyasiyalangan tugunlararo atomi kuzatilmagan, lekin kremniyning tugunlararo atomi o'ziga qo'shgan holda ikkilamchi radiatsion nuqsonlar hosil qilar ekan.



1.5-rasm. Blaunt modeli.

Bu komplekslarga Si-P6 [48] va Si-B3 [49] markazlar kiradi va bundan tashqari, ichki ishqalanish usulida ion implantatsiya qilingan kremniy namunalarida tadqiqot o'tkazildi [50].

Mazkur ishda yana, Bor ionlari bilan legirlangan kremniyda ikkita markaz borligi identifikatsiya qilindi $\langle 110 \rangle$ va $\langle 100 \rangle$ yo'nalishlarga bo'linishi, ya'ni ular tugunlararo musbat va neytral zaryad holatlarida joylashgan ekanlar. O'ttig temperaturasini o'lchashda Si-P6 va Si-B3 markazlarni bir-biriga uxshashligi borligiga qaramasdan, bir tarafdin piklar kremniy tugunlararo atomining joylashishi, ikkinchi tarafdin komplekslarning atomlarini qayta qurilishi energiya aktivatsiyasining farqi (0,92 eV Si-P6 uchun va 2,73 Si-B3 uchun) va simmetriya o'qidagi (Si-P6) farqi hisobiga ekan. Shuning uchun, EPR va ichki ishqalanish usulida o'lchangan tadqiqotlarga ko'ra, kuzatilayotgan nuqsonlar turli xil tabiatga ega ekanliklari aniqlangan.

Kislorodli kremniyning optik xususiyatlari. IQ yutilish spektrida kislorodli kremniy uchta polosaga (chiziqqa) ega: 8,3 mkm; 9,1 mkm va 19,4

mkm. Ko'p atomli molekullarning tebranishi bo'yicha umumiy nazariyasiga [57] ko'ra, ma'lumki, tebranishning teskari garmonik ekanligini hisobga olgan holda 3 atomli chiziqiy bo'lmagan molekula (masalan, Si - O - Si) va bundan tashqari asosiy chastotalarda IQ spektrida obertonlar hamda qo'shilgan chastotalar dipol momenti o'zgarishga bog'liq holda, ammo, Si - O -Si ossilyatorning teskari garmonik tebranishi qanchalik kichik bo'lsa, ularning amplitudasi ham shuncha past bo'lar ekan. Haqiqatan shu orqali 8,3 mkm va 19,4 mkm li polosadagi intensivliklarning kuchsizligi tushuntiriladi. Odatda 8,3 mkm li polosa uy haroratida hosil bo'lmaydi. Bu simmetrik valentli tebranish turi bo'lib jadval 1.1. da ν_1 bilan belgilangan.

[58] ishda mualliflar to'lqin vektori $\sim 1205 \text{ sm}^{-1}$ li polosani suyuq geliy temperaturasida kuzatishdi. Nosimmetrik tebranish turi bo'lgan ν_3 molekula Si - O - Si to'lqin uzunligi 9,1 mkm (1110 sm^{-1}) polosada kuzatilgan. ν_2 tipidagi deformatsion tebranish to'lqin uzunligi 19,4 mkm (515 sm^{-1}) teng bo'lgan polosada kuzatilgan. ν_2 va ν_3 tipidagi tebranishlar asosan uy haroratida kuzatilgan. Yuqorida keltirilgan polosalardan intensivligi eng katta bo'lgan to'lqin uzunligi 9,1 mkm dagi polosa hisoblanadi.

[55] ishda mualliflar spektrlarni tadqiq etish jarayonida kislorodli kremniyda temperatura pasayishi bilan yutilish polosasida siljish bo'lib qisqa to'lqin tebranishi sohasiga siljib, 120 K da to'lqin vektori 1127 sm^{-1} va 1135 sm^{-1} larda ikkita maksimum hosil qiladi. Bunda to'lqin vektori 1128 sm^{-1} dagi pikning amplitudasi kattalashadi va to'lqin vektori 1135 sm^{-1} da yangi pik hosil bo'ladi. Yana ham pastroq haroratga tushgan sari ya'ni 55 K da ikkala polosaning ham intensivligi tenglashib boradi. 47 K esa to'lqin vektori 1121 sm^{-1} da uchinchi polosa hosil bo'lar ekan, bu polosa 4 K da umuman yo'q bo'lar ekan. [57] ishda mualliflar tomonidan kremniy sovutilganda uning panjarasida kengayish sodir bo'lishiga sabab, uncha katta bo'lmagan kislorod atomlarning orientatsiyasi o'zgarishi hisobiga ekanligi ko'rsatilgan. [54] ishda suyuq geliyda 3 ta polosa (1135 , 1127 va 1121 sm^{-1}) hosil bo'lishi

ko'rsatilgan . Bu nozik strukturaning tabiati haqida adabiyotlarda bir nechta fikrlar mavjud.

1. [53] ishda muallif Xrostovskiy kislorodning kremniydagi xususiyatlarini o'rgangan birinchi tadqiqotchilardan biri bo'lib, Si-O-Si ossilyatorini 9,1 mkm to'lqin uzunligi sohasida yutilishini ko'rsatgan. Bu xulosa, yutilish polosada kislorodning ikkita ^{18}O va ^{17}O izotoplari kremniyga kiritilib ularning munosabatlaridan aniqlangan. Ularning fikriga ko'ra [56], to'lqin vektori 1135 va 1128 sm^{-1} polosadagi Si-O-Si molekulali chiziqli bo'lmagan tebranishlarga tugunlararo kislorod kirishini [55,56] ish mualliflari ham qo'llab – quvvatlashgan.

2. Keyinroq qilingan ishlarda [53,54] kislorodli va kislorodsiz kremniydagi to'lqin vektori 1128 sm^{-1} da hosil bo'lgan polosa tugunlararo kislorodga tegishli ekanligi, to'lqin vektori 1135 sm^{-1} da kuzatilgan polosa esa SiO_2 kompleksi tarkibiga kiruvchi kislorod ekanligi ko'rsatilgan. [52] ish muallifining ta'kidlashicha, [54] ishda berilgan fikr bo'yicha 4,2 K da kremniyda to'lqin vektori 1135 sm^{-1} da bitta polosa bo'lishini to'liq tushuntirilmagan. Shuning uchun SiO_2 ga KKK tegishli ekanligi faraz qilingan.

[54,56] ishlardagi mulliflar yana ham aniqroq fikrlarga kelib, IQ yutilish spektrining to'lqin vektori 1230 sm^{-1} da SiO_2 dagi II – faza topilgan. Bu fikrga IQ yutilish spektri orqali II-fazaning hosil bo'lishini kuzatish orqali tushuntirilgan.

3.[57] ishda Malishev tomonidan kvarsning turli modifikatsiyalari tahlil etilganda kremniydagi barcha kislorod atomlari bog'langan holatda II -faza zarrachasi holatida bo'lishi va barcha ma'lum adabiyotlarga ko'ra, kislorodli kremniyning IQ yutilish spektrlarining o'zgarishini ikkinchi faza ichidagi zarrachaning kerakli temperaturada ishlov berilganda fazoviy o'tishlar sodir bo'lishi bilan tushuntirilgan. Bizning fikrimizcha, nozik strukturaning tabiatini ochish uchun, faqat past haroratlarda IQ yutilish spektrini tadqiq etish orqali solishtirish yetarli emas.

4. [54] ishda Payot tomonidan spektrning strukturasi to'g'risida qiziqarli fikr aytilgan. Bu fikrga ko'ra, kremniy izotopga ega ekanligi va ularning konsentratsiyalari 99,28 % - ^{28}Si , 4,67 % - ^{29}Si va 3,05 % - ^{30}Si tashkil etishi, to'liq vektori 1100 cm^{-1} dagi yupqa struktura polosasi past haroratda kremniyning mos izotopi Si - O - Si ossilyatorini tebranishiga olib kelishi aytilgan. Izotoplar orasidagi munosabatlar to'liq vektorlari 1137 cm^{-1} , 1128 cm^{-1} va 1121 cm^{-1} teng bo'lganda yutilishning maksimal qiymatlari bilan mos tushishi ko'rsatilgan.

Optik faol kislorod tashqi ta'sirlarga o'ta sezgir bo'lib ya'ni temperatura, nurlanish va plastik deformatsiya ta'sirida kislorod-kremniy komplekslarini hosil qilar ekan. Bunda, to'liq vektori 1100 cm^{-1} da yutilish polosasi intensivligining kamayishi (agar ta'sir juda kuchli va KKK lari sodir bo'lsa) kuzatiladi. Mazkur ishda komplekslarning yangi polosalari, spektrning boshqa sohalarida hosil bo'lishi ko'rsatilgan.

II -BOB. NAMUNALARNI TADQIQOT QILISH USULLARI VA ULARNI TAYYORLASH TEXNOLOGIYASI

§2.1. Chuqur sathli nuqsonlarni tadqiqot qilishning sig‘imli usullari

Mazkur ishda kremniydagi nuqtaviy nuqsonlarni (xususiy, kirindili, radiatsion) tadqiq etish uchun sig‘imli usullardan 3 tasi qo‘llanilgan: izotermik relaksatsiya sig‘imi usuli (IRS), chuqur sathli nostatsionar sig‘imli spektroskopiya usuli (ChSNSS, inglizcha DLTS) va yorug‘lik sig‘imi usuli (YoS).

Bu usullar ham boshqa elektr usullari kabi elektr faol nuqsonlarni tadqiq etishga asoslangan bo‘lib, ya‘ni nuqsonlar yarimo‘tkazgichlarning taqiqlangan zonada diskret sathlarni hosil qilganda va qo‘shimcha xususiyatlarga ega bo‘lganda tegishli usullar orqali aniqlanadi. Sig‘imli usullar asosan yarimo‘tkazgichlarning taqiqlangan zonasida chuqur sathlar hosil qiladigan nuqsonlarni aniqlashga mo‘ljallangan. Bunday nuqsonlar odatda, chuqur markazli nuqsonlar deb yuritiladi. Bizning ishda ionizatsiya energiyasi $E_i > 0.15\text{eV}$ katta bo‘lgan chuqur sathlar tadqiq etiladi. Shuni aytish joizki, yarimo‘tkazgichli materiallarning parametrlarini sig‘imli usullarda o‘lchash ancha ilgari ma‘lum bo‘lishiga qaramasdan, hozirgi paytlarda ham kun sayin intensiv ravishda rivojlanib bormoqda. Sig‘imli usullarni yaratish va ularni rivojlantirishga bir nechta olimlar o‘z xissalarini qo‘shganlar shular jumlasidan: D.V.Leng ChSNSS [63], L.S.Berman IRC usulini [51-53], A.A.Lebedev o‘z xodimlari bilan – DLTS, YoS usullarini [22,54-56] va V.YA.Prins o‘z xodimlari bilan – doimiy sig‘im usuli [57].

[58] ish mualliflari tomonidan yaqindagina barcha sig‘imli usullarni ishlash jarayonlari va ularni qo‘llanilish sohalari bo‘yicha to‘liq ma‘lumotlar keltirilgan kitob nashr etildi.

p - n o'tish sig'imi

p - n o'tishni ikkita o'tkazuvchi sohadan iborat sistema deb va ular birbiridan hajmiy zaryad sohasi (HZS) orqali ajratilgan holda ko'rib chiqamiz [58]. Endi p - n o'tishga kontaktlar farqidan φ_k kattaroq V teskari kuchlanish beramiz. Bunda, harakatchan zaryad tashuvchilar HZS ning katta qismida ham ionlashgan kirindilar konsentratsiyasiga nisbatan kichik bo'lar ekan. $W = f(V)$ bog'lanishni (bu erda W - HZS ning qalinligi) aniqlash uchun, p⁺-n o'tish yoki n-Si tipidagi Shottki barerini ko'rib chiqamiz. Bu holda $N_A \gg N_d$ va HZS qalinligi n - Si dagi HZS qalinligi bilan aniqlanadi. HZS dagi harakatchan zaryadlar konsentratsiyasini hisobga olmagan holda, W ning qiymati Puasson tenglamasi orqali aniqlanadi:

$$d^2V/dW^2 = -e N_d(w) / \epsilon \epsilon_0 \quad (2,1)$$

va agar $N_d(w) = \text{const}$ bo'lsa, u holda

$$W = [2(\varphi_k + V)\epsilon \epsilon_0 / e N_d]^{1/2} \quad (2,2)$$

bu erda ϵ - yarimo'tkazgichning nisbiy dielektrik singdiruvchanligi,

ϵ_0 - vakuumning dielektrik doimiysi,

e - elektron zaryadi,

φ_k – kontakt potentsiallar farqi,

N_d – o'lchash temperaturada to'liq ionlashgan diod bazasidagi sayoz donorlar konsentratsiyasi.

S maydonli p⁺ - n o'tish sig'imi bu holda, quyidagi ko'rinishda bo'ladi.

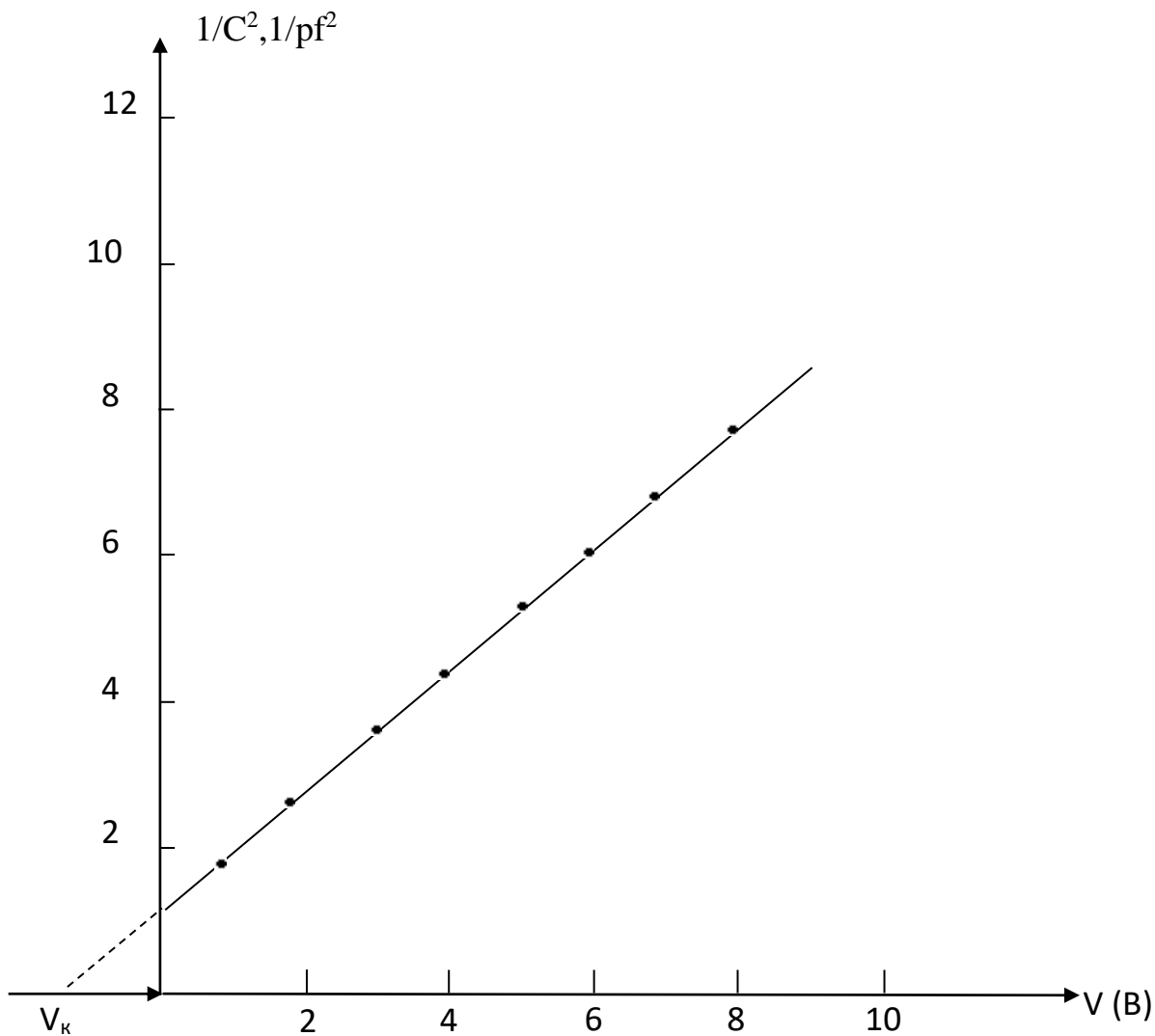
$$S = \epsilon \epsilon_0 S / W = S [\epsilon \epsilon_0 N_d e / 2 (\varphi_k + V)]^{1/2} \quad (2.3)$$

yoki

$$1/C^2 = 2(\varphi_k + V) / (e \epsilon \epsilon_0 S^2 N_D) \quad (2.4)$$

(2.4) formulaga ko'ra, $1/S^2$ ning V ga bog'liqligi Shottki bareri yoki

keskin p^+ -n o'tish uchun to'g'ri chiziqdan iborat bo'lib, u 2.1-rasmda keltirilgan. Mazkur diod bazasidagi kirindilar konsentratsiyasini burchak tangensidan, φ_k esa V to'g'ri kesishish joyidan aniqlanadi.



2.1-rasm. Keskin p^+ - n o'tish uchun $1/C^2$ ning V kuchlanishga bog'liqligi.

§ 2.2. IQ yutilish usuli

Kislorodning kremniyda mavjudligini ifodalovchi IQ yutilish spektri keltirilgan. Mazkur chastotada 1100 cm^{-1} kremniyning panjaraviy yutilish polosasi ham mavjud. Adabiyotlardan ma'lumki $\alpha_{\text{resh}} = (0,46+1) \text{ cm}^{-1}$ [2,64] teng. Bunaday farqning bo'lishi, kremniyning kislorod va boshqa kirindilar bilan bir xilda tozalanmaganligi hamda qo'llanilayotgan spektrometrlarning chiziqli bo'lmaganliklari va boshqa sabablardir.

Kislorodli kremniyda yutilish koeffitsienti α^{tax} 9,1 mkm polosada α_{resh} ayirib tashlasak, kislorod konsentratsiyasiga bog'liq holda $1 \div 7 \text{ cm}^{-1}$ oraliqda o'zgarishi mumkin ekan.

Kayzer [56] ishda $N_0 = f(\alpha)$ bog'liqligi bo'yicha kalibrovka qiluvchi chiziq yaratdi. Bunda IQ yutilish usuli bilan N_0 o'lchangandan so'ng, namuna vakuumda eritilib N_0 gazli tahlil usulida aniqlanadi.

Keyingi tadqiqotlar shuni ko'rsatdiki, N_0 Kayzer chizig'i orqali olinganda boshqa usullar bilan olinganga nisbatan ancha pastroq ekan.

Ehtimol, kremniyni eritishda hamma kislorodni hisobga olmaslik (ya'ni SiO_2 zarrachaga kiruvchi) maqsadga muvofiqdir. N_0 ning qiymatini qo'shimcha koeffitsientga 1,8 [64] ko'paytirishdan oldin Kayzerning darajalarga bo'luvchi chizig'idan foydalanish maqsadga muvofiq.

Kislorod konsentratsiyasini aniqlash uchun, kremniyni o'tkazish spektrini o'lchash va yutilish spektri maydonini hisoblash orqali amalga oshiriladi. Odatda yutilish koeffitsienti o'tkazish spektridan hisob-kitob qilinadi.

$$T(\nu) = \frac{I(\nu)}{I_0} = \frac{(1 - R_0)^2 e^{-\alpha(\nu)^2}}{(1 - R_0^2 e^{-2-\alpha(\nu)^d})} \quad (2,5)$$

bunda, R_0 - yarim cheksiz namunaning qaytarish koeffitsienti;

d - namunaning qalinligi;

$I(\nu)$ - namunadan o'tgan nurlanish intensivligi,

I_0 - namunaga tushayotgan nurlanish intensivligi;

$R_0-R=(n-1)^2/(n+1)^2$ formula orqali hisoblanadi, bunda n – kremniyning sindirish koeffitsienti.

$\lambda = 1,5 - 11$ mkm spektr sohasida $R_0^{Si} = 0,3 \pm 0,003$ teng ekan.

Kremniyning sindirish ko‘rsatkichi katta bo‘lib, u $n_{Si} = 3,6$ teng, shuning uchun aniq natijalar olish uchun namunaning qalinligi katta rol o‘ynaydi. Mazkur masalaga doir savollarga javob [64] ishda to‘liq yoritilgan. α ni aniqlashdagi eng kichik xatolik $\alpha_d = 0,5 \div 2$ % holga to‘g‘ri kelishi aniqlangan.

[3,20] ishda amaliyotda keng qo‘llanilayotgan kremniydagi kislorodni aniqlovchi formula keltirilgan $N_0 = 4,25 \cdot 10^{15} A \cdot \text{sm}^{-3}$, bu erda A – 9,1 mkm da kislorod yutilayotgan polosaning yuzasi. Bu usul orqali $N_0 \geq 10^{16} \text{ sm}^{-3}$ konsentratsiyani aniqlash uchun 3 % dan katta bo‘lmagan xatolikka yo‘l qo‘yiladi.

O‘lchashlarni katta aniqlikda bajarish uchun, kremniyning sirtini silliqlashdagi tekismaslik holati, yutilish polosasi maksimumida $\leq 1 / 4\lambda$ shartga bo‘ysinishi lozim. Taraflaridagi yassi-parallellik bo‘yicha og‘ishi 0,5 % dan katta bo‘lmasligi kerak. Erkin zaryad tashuvchilarda yutilish hisobiga xatoliklar oshib ketmasligi uchun, namunalarning solishtirma qarshiliklarini quyidagicha tanlash maqsadga muvofiq: n-Si uchun $N_0 > 2 \cdot 10^{17} \text{ sm}^{-3}$ bo‘lganda $\rho \geq 0,04 \text{ Om} \cdot \text{sm}$ bo‘lishi va p-Si uchun esa $\rho > 1 \text{ Om} \cdot \text{sm}$ bo‘lishi kerak; n-Si uchun $N_0 \sim 8 \cdot 10^{15} \div 2 \cdot 10^{17} \text{ sm}^{-3}$ bo‘lganda, $\rho > 20 \text{ Om} \cdot \text{sm}$ bo‘lishi va p-Si uchun esa $\rho > 50 \text{ Om} \cdot \text{sm}$ bo‘lishi lozim.

Mazkur ishda kislorod konsentratsiyasi N_0 kirindili yutilish polosasining maksimumida α^{tax} , yutilish koeffitsienti qiymatiga ko‘ra aniqlangan va differensial usulli spektr orqali yozib boriladi. Bunda ikki nurli spektrometr kanalida o‘lchanayotgan namuna qalinligi bilan bir xil bo‘lgan ($\pm 0,5$ %) etalon namuna ham joylashtirilgan bo‘lib, undagi kislorodning konsentratsiyasi $N_0 \leq 5 \cdot 10^{15} \text{ sm}^{-3}$ ni tashkil etadi. Differensial usulda spektr yozilayotganda faqat kirindili kislorod ro‘yxatdan o‘tkazilib, panjaraning fonli yutilishi va erkin

zaryad tashuvchilar inkor etiladi. Bu esa o'z navbatida N_0 ni o'lchashdagi aniqlikni yanada oshiradi.

(2.5) tenglamani echishda spektrlarni differensial usulda yozish, ya'ni $T(\nu_2)/T(\nu_1)$ uchun aniqlik $5\div 7\%$ tashkil etadi va uni quyidagi formula orqali aniqlash mumkin.

$$\ln I(\nu_2)/I(\nu_1) = \alpha d \quad (2.6)$$

9,1 mkm sohasidagi yutilish koeffitsienti kislorod konsentratsiyasiga proporsional ekan, ya'ni

$$\alpha = \chi N_0 \quad (2.7)$$

bunda χ - bitta kislorod atomi (Si – O bog'lanishi) bilan fotonni tutish kesimi. χ ning turli mualliflar tomonidan (1100 sm^{-1}) da aniqlangan qiymati, uy haroratida $\sim (2\div 4) \times 10^{18} \text{ sm}^2$ [61] teng ekan.

[64] ishda SiO_2 ikki oksidli kremniydagi yutilish spektri, kislorodning kremniydagi yutilish spektri bilan to'liq mos tushishi ko'rsatilgan, unda birinchi yaqinlashish bo'yicha yutilish bitta va usha bog'lanish Si-O aniqlanishi hamda fotonni tutish kesimini baholash mumkin ekan.

Kremniydagi SiO_2 yupqa pardasini yutilish koeffitsientini o'lchasak (differensial usulda o'lchashda kremniy shaffof hisoblanadi), u holda SiO_2 parda qalinligini yuqori aniqlikda Si – O ni ko'nadalang tutishini yoki monolit bo'lmagan oksidni aniqlash mumkin va mazkur ma'lumotlardan kremniydagi yutilish kesimiga yaqin bo'lishligi aniqlanadi deyish mumkin.

Shuning uchun, temperaturasi $T=1250^\circ\text{C}$ da sayqallangan kremniy sirtiga quruq va nam kislorodni o'stirish orqali yupqa SiO_2 pardadagi yutilishni tadqiq etdik. Pardaning qalinligi MII-11 interferension mikroskop yoki ranglar jadvali orqali aniqlanganda uning qalinligi 0,06 dan 0,27 mkm gacha ekanligi aniqlangan [3,64]. SiO_2 pardaning zichligi nam kislorodda olingan $\rho \approx 2,18 \div 2,21 \text{ g /sm}^3$ va quruq kislorodda olinganda esa $\rho \approx 2,24 \div 2,27 \text{ g/sm}^3$ teng ekan, SiO_2 pardadagi kislorod atomlarining konsentratsiyasi $N_0 = 1,47 \cdot 10^{22} \text{ sm}^{-3}$ teng ekanligi baholandi.

Unda SiO_2 pardaning yutilish koeffitsienti qiymatiga ko'ra, SiO_2 pardadagi Si – O bog'lanishdagi fotonning tutish kesimi hisoblandi va uning qiymati $\approx 3,2 \cdot 10^{-18} \text{ sm}^2$ teng ekanligi aniqlandi [34]. Kremniyda kislorod atomi bilan fotonni tutishi va amorfli pardada ham bir xil tabiatga ega ekanligi ehtimolligi ko'rsatilgan. Biz o'zimizni hisob-kitoblarda kislorodning konsentratsiyasini N_0 ni optik yutilishni qiymatini $\chi = 3,2 \cdot 10^{-18} \text{ sm}^{-2}$ eksperimentda aniqlagan holda yoki [64] mualliflari tomonidan taklif etilgan $\chi = 3,3 \cdot 10^{-18} \text{ sm}^2$ qiymat kremniydagi kislorod konsentratsiyasining IQ yutilish va ^3Ne ionlaridagi aktivatsion analiz ma'lumotlari orqali aniqlangan natijalardan foydalandik.

χ ning kichik qiymatda bo'lishi, IQ yutilish usulini sezgirligini chegaralab 300 K da kislorodning konsentratsiyasini aniqlashning past chegarasi qiymati $\approx 2 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-3}$ teng ekanligi, tigelsiz kremniyda esa $N_0 \leq 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ bo'lganligi uchun yutilish koeffitsiyenti α panjaraning yutish koeffitsiyentiga nisbatan teng yoki kichik bo'lar ekan. Kislorodning bunaqa konsentratsiyasini (N_0) uy haroratida ham differensial usulni qo'llab ham o'lchab bo'lmas ekan. Odatda temperaturani 80-90 K ga kamaytirib, usulning sezgirligini $5 \cdot 10^{15} \text{ sm}^{-3}$ ga va $T = 8 \text{ K}$ da esa χ qiymatini 20 barobarga o'stirish mumkin ekan.

(2.6 va 2.7) formulalarni $\alpha_{\max} \cdot d = \chi N_0 d = \ln I_0 / I(v)$ kislorodni bir jinsli maydonda joylashgan deb qo'llash mumkin. Agar, kremniy plastinkalarida kislorod atomlarining to'planishi yoki yig'ilishi mavjud bo'lsa, u holda N_0 ni aniqlash mumkin bo'lar ekan.

Yutilishini o'lchaydigan ko'pgina spektrometrlarning yorug'lik dog'i katta maydonga ega bo'lib, ularning o'lchami asosan $10 \div 20 \text{ mm}^2$ ni tashkil etar ekan. Mazkur maydon chegarasida optik faol konsentratsiyaning bir jinsli bo'lmasligi, namunadagi kirindilarning o'rtacha konsentratsiyani qiymatni aniqlashda bir jinsligi bo'lmagan holda ekanligini (2.6) formula orqali ya'ni chiziq shakllarining buzilishini ham boshqa effektlar orqali aniqlash mumkin ekan.

Agar $\chi=f(N_0)$ kirindilar bir jinsli bo‘lmagan holda taqsimlansa, u holda namunadan o‘tadigan nurlanish (yorug‘likning sochilishi va qaytishi hisobga olingan holda) va bir jinsli bo‘lmaganlik o‘lchami zondlanuvchi yorug‘lik to‘lqin uzunligidan bir necha barobar katta bo‘lishi, yorug‘lik dog‘ini $S_0=hl$ maydoning integrali bilan o‘lchanar ekan.

$$\frac{I}{I_0} = \frac{\int_0^h \int_0^l I_l(x,y) \exp(xd - N(xy)) dx dy}{\int_0^h \int_0^l I_l(x,y) dx dy} \quad (2.8)$$

bu yerda, I, I_0 – namunaga tushayotgan va undan o‘tayotgan yorug‘lik intensivligi;

d – namunining qalinligi;

I_l - nurlanishning lokal intensivligi,

x, u – namuna sirti bilan yoritilgan dekart koordinatasi.

Agar $I_l=\text{const}$ bo‘lsa, namunaning barcha nuqtalarida (2.8) formulaga ko‘ra, $\chi d N(x, u) \ll 1$ shart bajariladi va namunadagi N_0^{sr} ni aniqlash mumkin. Qolgan hollarda esa, spektrlarni an’anaviy usullarda hisob-kitob qilinganda tekis bo‘lmagan legirlash N_0^{sr} noto‘g‘ri aniqlashga sabab bo‘ladi.

Misol tariqasida d, I_l va χ lar doimiy bo‘lganda, N keskin tekis bo‘lmagan holni ko‘ramiz. Agar, kirindi konsentratsiya doimiy o‘rtachaga ega namunaning $S \leq S_0$ maydon qismida bir jinsli taqsimlangan bo‘lsa, u holda qolgan qismi $N=0$ bo‘lar ekan. Unda yuqorida qilingan farazlarga ko‘ra,

$$\frac{I}{I_0} = 1 - \left\{ \frac{S}{S_0} \left[1 - \exp\left(-\chi N_{\text{cp}} d \frac{S}{S_0}\right) \right] \right\} \quad (2.9)$$

(2.9) formuladan I/I_0 ni $\alpha_{\text{tax}} = \chi N_{\text{sr}} d$ ning turli qiymatlarida va uni (2.6) ga qo‘ysak, u holda N^l larning konsentratsiyasi N_{sr} 2.5 – rasmdagi haqiqiy qiymatidan farq qilar ekan. Rasmga ko‘ra, kirindilarning bir jinsli bo‘lmay joylashishiga ko‘ra, N^l/N_{sr} bir tartibga farq qilishlari mumkin. α_{tax} ($1 \div 7 \text{ sm}^{-1}$) katta qiymatlarida ya’ni kirindilarning yig‘ilish joylarida namunadan yorug‘lik o‘tmaydi, I/I_0 qiymati S/S_0 qiymatiga chiziqiy bog‘langan bo‘lib va

namunaning qalinligi d ga bog‘liq emas ekan. Bu holda, kirindi namunalarning qalinligi $\alpha_{tax} = f(d)$ [30] bog‘liqlik orqali o‘lchash N_0 ni (2.8) formuladan aniqlangan qiymati o‘sadi, ammo kamaymaydi kirindilar hajm bo‘yicha tekis taqsimlangani kabi. Bu effekt, haqiqatan ham ayrim notipik holatlari kabi, kislorodning kremniydagi taqsimoti tadqiqi kabi ko‘rinadi. Bir jinsli bo‘lmaslik o‘z navbatida χ qiymatini noto‘g‘ri baholashga olib kelar ekan. Haqiqatan ham χ qiymati turli mulliflarda turlicha ekanligini ta’kidlash mumkin. N_{sr} va χ aniqlashdagi eng katta xatoliklardan biri, bu SiO_2 da kislorod atomlarining yig‘ilishi II fazani hosil bo‘lishigacha davom etishidir.

Kirindilarning bir jinsli bo‘lmagan holda taqsimlanishi, yutilish spektri chiziqlarida buzilishlarni hosil qilar ekan. Yutilishdagi chiziq formasining ya’ni Lorens profilini S/S_0 bog‘liqligi.

$$\alpha/\alpha_{max} = K/(v/v_{max} - 1)^2 + K \quad (2.10)$$

bu erda, v_{tax} – chiziqning maksimal chastotasi;

K- normallashtirilgan koeffitsient.

Rasmga ko‘ra, kirindi atomlarining lokalizatsiya darajasining kattalashuvi, pikning amplitudasi chetlari kabi tez kamayib boradi va pik umuman tekislashib ketishi mumkin ekan. Mazkur effekt, eksperimentda ko‘rilayotgan qayta taqsimlanish hisobiga qalinlashgan chiziqlar hosil bo‘lishi sababli va issiqlik ishlov berish orqali kremniyda lokallasuvi bo‘lsa kerak, deyiladi [1-2] ishda.

N_0 aniqlash uchun $T=300\text{K}$ va $T=90\text{K}$ larda differensial ko‘priqli spektrometrlar UR- 20 va Specord- IR-75 orqali yutilish o‘lchovi olib borilgan. O‘lchashlar asosan kremniyli asboblardan ishlab chiqarishga mo‘ljallangan tipik namunalar bo‘lib, ularning solishtirma qarshiliklari $\rho = 15 \div 100 \text{ Om} \cdot \text{sm}$ ga teng ekan. Kremniy plastinkalarining qalinligi 1-3 mm iborat bo‘lib, ularga kimyo-mexanikaviy ishlov berilgan. Kremniy plastinkasi

gomogen taqsimotga ega bo'lib, ko'pgina tigelsiz o'stirilgan kremniy bo'lib hajmidaga kislorod N_0 konsentratsiyasi $5 \cdot 10^{15}$ do $(1,5 \div 2) \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-3}$ oralig'ida ekan. Bundan tashqari $N_0 = (2 \div 5) \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-3}$ slitkali namunalar, ya'ni kislorod konsentratsiyasi N_0 kislorodli kremniy yaqin namunalar ham ishlatildi. Choxralskiy usulida o'stirilgan kremniyda esa, $(3 \div 7) \cdot 10^{17} \text{ sm}^{-3}$ qiymatga ega bo'lib, undan tashqari yana maxsus o'stirilgan namunalar bo'lib, ulardagi kislorodning konsentratsiyasi $N_0 \sim 10^{18} \text{ sm}^{-3}$ teng bo'lgan silikatlar ishlatilgan.

IQ usulida o'lchangan N_0 ning zaryadlangan zarrachalar tahliliga nisbatan 1,5 martaga ($\chi = 3,3 \cdot 10^{-18} \text{ sm}^2$ teng hol uchun) farq qilar ekan. Agar uning o'rniga [3,20] ishda ko'rsatilganday 293 K uchun $\chi = 2,1 \cdot 10^{-18} \text{ sm}^2$ va 77 K uchun esa $\chi = 4,1 \cdot 10^{-18} \text{ sm}^2$ qiymatlar olinsa, u holda optik faol kislorod konsentratsiyasi bilan umumiy kislorod orasida farq unchalik katta bo'lmay qolar ekan.

Noma'lum kirindilarni sig'imli usullarda aniqlash uchun, maxsus legirlangan diodlarda chuqur sathlarning xarakteristikalari o'lchanishi maqsadga muvofiq. Shuning uchun biz, $900 \div 1250^\circ\text{C}$ oralig'ida diffuziya usuli bilan kreakli kirindilar bilan legirladik. Chuqur sathlar parametrlari o'lchanganda, masalan biror bir kirindi atomi kiritilgan kremniy o'rganilganda (bu nuqson kirindimi yoki panjara nuqsonimi) har doim savollar tug'iladiki bu nuqsonlar shu kirindiga tegishlimi yoki panjara nuqsonmi yoki bosharib bo'lmaydigan kirindimi ya'ni legirlash jarayonida?

Boshqarib bo'lmaydigan chuqur sathli kirindilarni asosiy manbalari:

1) elektr faol holatda bo'lmagan holatda, boshlang'ich kremniydagi boshqarib bo'lmaydigan nuqsonlar va yuqori haroratli ishlov berilganda ularning faollashishi hisobiga hosil bo'ladigan nuqsonlar;

2) Kremniy plastinkalarini sirtini termik ishlov berishdan avval yoki diffuziyadan oldin yaxshi yuvmaslik, termik ishlov berishda o'rab turgan muhit (kvars, pechning hajmi va h.k.) hisobiga hosil bo'ladigan nuqsonlar;

3) Diffuzantni ifloslanishi. Chuqur sathli kirindilar uchun xarakterli narsa bu, eruvchanliklarining cheklanganligi ya'ni turli elementlarda turlicha ekanligi ayrim hollarda bir va bir necha tartibga farq qilishi [54-56] hisobiga hosil bo'ladigan nuqsonlar;

Yuqoridagi xatoliklarga yo'l qo'ymaslik uchun quyidagi usullarni qo'lladik:

a) Reaktiv va diffuzantlarning eng tozasini (OSCH –eng toza);

b) Bir xil yuqori haroratli ishlov berilgan diffuzantsiz kontrol namunalari tayyorlash rejimidan foydalanish.

Bir xil sharoitda kimyoviy va mexanikaviy ishlov berilgan kontrol va legirlangan namunalardan tayyorlangan diodlardan foydalanish orqali aniqlangan chuqur sath kirindining qaysi biriga tegishli ekanligini aniqlash mumkin. Bu usul ham hamma xatoliklarni yo'qotadi deb bo'lmaydi, chunki eksperiment hamma joyda bir xil bo'lmaganligi va diffuzantning tozzaligiga katta bog'liq bo'ladi. Bu degani eksperimentni bir necha bor takrorlanishi va eksperiment shartlarini boshqarilishiga katta bog'liq.

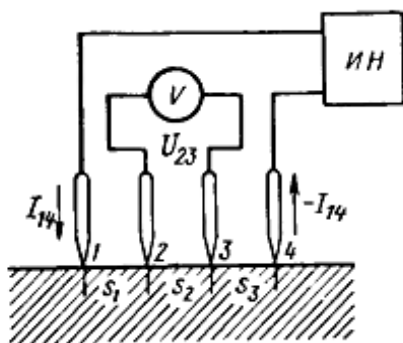
Misol uchun: diffuzantni almashtirish, yuqori haroratli ishlov berishdan avval kremniy sirtini tozalash va h.k.

Sig'imli usullarda olingan natijalarni boshqa (fotoo'tkazuvchanlik, EPR) usullari bilan o'lchash va adabiyotlardagi olingan natijalarni solishtirilishi orqali aniqlash mumkin. Shunda ko'pgina mualliflarning turli laboratoriyalarda olgan natijalari bir-biriga mos kelishi orqali kiritilgan kirindiga (elementga) tegishli yoki tegishli emasligini aytish lozim bo'ladi. Olingan eksperimental natijalarning bir-biriga mos kelmasligi, boshqa kirindi atomlarini kirib qolishi yoki qo'llanilgan usulni imkoniyatlari cheklanganligi va kiritilgan kirindining murakkab ekanligi bilan tushuntirish mumkin. Bunday holatlarda kirindilar boshqa elementlar hosil qilayotgan komplekslar ekanligi: sayoz donorlar, akseptorlar, kislorod va uglerod va boshqa chuqur sathlar ekanligi [1,64] ishda ko'rsatilgan. Berilgan kirindi atomining bir necha assotsiatsiyasi ekanligi ham aytilgan. Bunday faol atomlarga (ya'ni kompleks va assotsiatsiya hosil

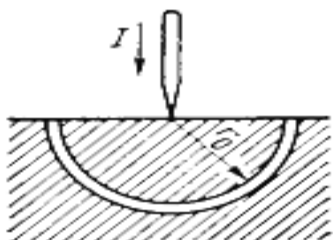
qiladiganlar) asosan, C_i , C_o , S va boshqa elementlar kiradi [3,64]. Bundan tashqari kirindilar tugunda yoki tugunlararo panjarada joylashishi va chuqur yoki sayoz sathlar hosil qilishi yoki qilmasligi mumkin. Shu sababli, hozirgi paytgacha barcha adabiyotlardagi ma'lumotlarni bir-biriga to'g'ri kelmasligi, mos tushmasligi ya'ni chuqur sathlarning ionizatsiya energiyalarining turlicha bo'lishi ayrim elementlarning donor yoki akseptor tabiatli ekanligini aytishga imkoniyat bo'lmay qolyapti.

§ 2.3. To'rt zondli usul

Monokristall, diffuziyaviy qatlamli namunalar solishtirma qarshiligini o'lchashda to'rt zondli usul qulaydir. Bunda namuna sirtiga kontaktlar tushirish talab qilinmaydi, ulchash va hisoblash ancha soddadir, qisqacha bu usulda o'lchashni ko'rib chiqamiz. Eng qulay, ya'ni zondlar bir chiziqda joylashgan hol uchun tenglamalarni ko'rib chiqamiz. Avvalo yarimo'tkazgich yassi sirti bilan kontaktdagi bir zonda tok o'tishidan elektr maydonda tok va potensial bog'lanishini keltirib chiqaramiz. Maydon sferik simmetrikligidan bu holda Laplas tenglamasini echish kifoya. $\Delta U = 0$ Masalani soddalashtirish uchun sferik koordinatalarga o'tamiz



$$\Delta U(r) = \frac{1}{r^2} \cdot \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{dU}{dr} \right) = 0$$
, bunda potensial $r=0$



nuqtada musbat va u cheksiz kattalashganda nolga intilishi olinadi. Bu integrallashni ko'rsatilgan shartlarda amalga oshirsak $U(r) = C/r$ echimga kelamiz. Integrallash doimiysini biror $r=r_0$ nuqtada elektr maydon kuchlanganligi ϵ uchun ifodadan topishimiz mumkin :

$$U(r_0) = - \frac{dU(r)}{dr} .$$

r_0 yarim sfera orqali o'tayotgan tok zichligi $j = I / 2\pi r_0^2$, bo'lib Om qonunida $j = \frac{\varepsilon}{\rho}$, yoki $\varepsilon_{q_0} = I \cdot \frac{\rho}{2\pi r_0}$. Natijada $U_{q_0} = I \cdot \frac{\rho}{2\pi r}$. (1.2). Ifodani olamiz.

Ravshanki zond kontakt shakli shunday chekli yarim sfera holda potensial taqsimoti ham shu kabi bo'ladi. Kontakt radiusi r_1 bo'lsa, namunadagi elektr kuchlanish zondagi elektr potensialiga teng:

$$U_{q_1} = I \cdot \frac{\rho}{2\pi r_1}. \quad (2.11)$$

$r_2 - r_1$ qalinlikdagi kontakt oldi soxasidagi kuchlanishni taqqoslashdan

$$U_{q_2} - U_{q_1} = \frac{I \cdot \rho}{2\pi r_1} \cdot \frac{r_2 - r_1}{r_2 \cdot r_1}$$

va namunada kuchlanish ifodasidan, potensialning asosiy o'zgarishi zond yaqinida bo'lishi ko'rinadi. Masalan, $r_2 = 10r_1$ namunada kuchlanish $r_2 - r_1$ qalinlikdagi qatlamdan bori yo'g'i 10% farq qiladi. Demak zond orqali o'tayotgan tok qiymati asosan kontakt oldi soxasi qarshiligi bilan belgilanadi, bu soxa kengligi kontakt radiusi kam bo'lsa kam bo'ladi.

Keng qo'llaniladigan hollardan biri zondlarning chiziqli joylashishidir. Solishtirma qarshilikni aniqlovchi to'rt zondli metodi uchun quyidagicha shartlarni kiritamiz: Zondlar bir jinsli namuna yarim cheksiz namuna yassi sirtida chiziqli joylashgan. Namuna hajmiga tok tashuvchilar injeksiyasi yoki.

Elektr potensial superpozitsiya prinsipiga asosan namuna har bir nuqtasida uning qiymati shu nuqtada har bir zond hosil qilgan potentsiallar yigindisiga teng. Bu holda namunaga kirayotgan tok uchun musbat (1-zond), va namunadan chiqayotgan tok uchun manfiy (4-zond). Oraliqlari S_1 , S_2 va S_3 bo'lgan 2 va 3 zondlar sistemasi uchun potentsillar:

$$U_2 = \frac{I_{1*} \cdot \rho}{2\pi} \left(\frac{1}{S_1} - \frac{1}{S_2 + S_3} \right);$$

$$U_a = \frac{I_{1*} \cdot \rho}{2\pi} \left(\frac{1}{S_1 + S_2} - \frac{1}{S_a} \right);$$

potensiallar farqi,

$$U_{2a} = U_z - U_a = \frac{I_{1*} \cdot \rho}{2\pi} \left(\frac{1}{S_1} - \frac{1}{S_2 + S_3} - \frac{1}{S_1 + S_2} + \frac{1}{S_a} \right) \quad (2.12)$$

(1.4) ga ko'ra namunaning solishtirma qarshiligi quyidagicha ifodalanadi:

$$\rho = \frac{2\pi}{\frac{1}{S_1} - \frac{1}{S_2 + S_3} - \frac{1}{S_1 + S_2} + \frac{1}{S_a}} \cdot \frac{U_{2a}}{I_{1*}}$$

Agarda zondlar orasidagi masofalar bir xil, yani $s_1=s_2=s_3=s$ bo'lsa, u holda

$\rho = 2\pi S \frac{U_{2a}}{I_{1*}}$ (1.5). Agarda namuna chetigacha bo'lgan masofa L, namuna chetigacha bo'lgan masofalar nisbati L/S bo'lsa, bu nisbatga qarab tuzatma kiritiladi. SHuni bilish kerakki, kontaktlar simmetik bo'lmaganidan va turli kinetik hodisalar natijasida xatoliklar yuzaga kelishi mumkin. Ularni o'lhashlar natijasida kamaytirish mumkin. [63]

Namunalarni tayyorlash texnologiyasi

Kremniyga chuqur sath beruvchi kirindilarni legirlab kiritishning bir necha xil usullari mavjud:

1. Monokistalni legirlash uchun, unga kirindini qo'shib o'stirish;
2. Epitaksiya usulida o'stirish;
3. Ion implantatsiya orqali o'stirish;
4. Diffuziya usuli.

Chuqur sath beruvchi kirindilarning kremniydagi diffuziya koeffitsienti $800 \div 1250^\circ\text{C}$ da $D=10^{-8}-10^{-5} \text{ sm}^2 / \text{s}$ teng ekan. Ularning segregatsiya koeffitsientlar esa $(10^{-5} \div 10^{-7})$ bo'lib, temperaturaga katta bog'liq ekan.

Chuqur sathli kirindilarda diffuziya dissotsiativ mexanizimga bo'ysunar ekanlar: bunda avval tez diffuziya jarayoni ya'ni panjaraning tugunlar orasiga joylashishi, keyin tugunlararo kirindilar tugunlarga o'tishi sodir bo'lar ekan.

Natijada, katta kristallarda kirindilarning uncha tekis bo'lmagan taqsimlanishi sodir bo'lar ekan. Shuning uchun kremniyga koeffitsient diffuziyasi katta kirindilarni kiritish uchun diffuziya usulini qo'llash maqsadga muvofiqdir.

Mazkur malakaviy bitiruv ishni bajarish uchun, kremniyga chuqur sathli kirindini legirlash uchun diffuziya usulidan foydalandik. Bu usul o'z orqali temperaturani va diffuziya vaqtini o'zgartirish bilan kirinidi konsentratsiyasini boshqarish imkoniyati berar ekan.

1. Yuqori (1 Pa dan ortiq) elastiklikka ega bo'lgan kirindi atomlari kremniyga legirlash orqali kiritilib, ya'ni havosi so'rib olingan kvarts ampulalarga diffuzantlar solinib diffuziya jarayoni yuqori haroratli temperaturalarda amalga oshirildi.
2. Diffuzant yuqori vakuumda (10^{-5} - 10^{-6} mm.sim.ust.) kremniy sirtiga yuqori vakuumli past (VUP -5) markali qurilma orqali kremniy sirtiga purkalgan. Diffuziya jarayoni ikki usulda, havosi so'rib olingan kvarts ampula va havoda amalga oshirildi.
3. Havoda diffuziyani amalga oshirish uchun, kerakli kirindining xlorli tuzlari spirtida eritilib kremniy sirtiga surkalgan holda, quritilib ochiq kvarts ampulaga solingan holda amalga oshirildi.

Diffuziya vaqti va temperaturasi quyilgan topshiriq bo'yicha amalga oshirilib, temperatura oralig'i $T_d = 900^{\circ}\text{C} \div 1250^{\circ}\text{C}$ va diffuziya vaqti esa $t = 0,5 \div 100$ soatgacha (T_d va t -temperatura va diffuziya vaqti mos ravishda).

Chuqur sathli kirindilarning eruvchanligi temperaturaga katta bog'liqligi va diffuziya koeffitsientning kattaligi [1-3] o'z navbatida, diffuziyadan so'ng kristallning sovutilish tezligiga bog'liq ekanligi, ya'ni asta sovutish orqali qattiq eritmaning emirlishi orqali kirindi atomlari sirtga diffuziya bo'lishi yoki kristall strukturasining boshqa nuqsonlari klasterlarni hosil qilishlari mumkin.

Diffuziyadan so'ng, kristallarni sovitish turli usullarda amalga oshirilib, uning tezliklari $10 \text{ grad/s} \div 25 \text{ grad/soat}$ tashkil etadi. Kremniyni tez sovitish uchun, yuqori haroratli diffuziya pechkasidan kvarts ampula sovuq suvga

tushiriladi, o'rtacha sovutish esa kvarts ampulalarni vakuum yog'iga (VM-4) tushurildi. Asta sovitish yuqori haroratli diffuziya pechni uchirib qo'yish orqali amalga oshirildi, bunda sovitish tezligi 25 grad/soat teng ekan.

Diffuziyani amalga oshirishdan avval, boshlang'ich namunalari M-17, M-14, M-10, M-7, M-5 markali **karborundli** poroshoklarda ishqalash (shlifovka) amalga oshirildi. Namunalarning boshlang'ich va diffuziyadan keyingi solishtirma qarshiliklari to'rt zondli usulda o'lchash orqali amalga oshirildi. Namunaning diffuziyadan oldingi va keyingi tipini esa o'tkazuvchanlik tipini aniqlovchi (OTP-2) qurilmasi orqali amalga oshirildi. Shundan so'ng namunalari, o'ta toza toluolda yog'lari ketkazilib, distillangan suvda yuvilib quyidagicha ishlov berildi:

1. HF:HNO₃:CH₃COOH (5:3:3) qorishmasi orqali ishlov;
2. H₂O:H₂O₂:HCl (5:4:1) qorishmada qizdirish;
3. HCl:HNO₃ (3 : 1) qorishmada qizdirish;
4. Ftorid kislotada chayish;
5. Distillangan suvda oxirgi marta yuvish.

Xar bir ishlov berishdan so'ng, namunalari distillangan suv oqimida yuvilib, keyin kerakli kirindilar yotqazilib kvarts ampulalarga solinib yuqori haroratli ishlov berish uchun diffuziya pechga joylashtirildi.

Diffuziya jarayoni yuqori haroratli (SUOL -4) markali pech orqali amalga oshirildi. Pechning temperaturasi platina –platinorodiyli termopara orqali o'lchanib, uning aniqligi $\pm 5^{\circ}\text{C}$ tashkil etadi. Diffuziyani amalga oshirish uchun kerak bo'lgan, ampula va trubkalar toza optik kvarts orqali amalga oshirilgan. Ampulaga yoki trubkaga ampulani solishdan avval toza optik kvarts ampula va trubkalar distillangan suvda tozalab yuvilib, diffuziya temperaturasidan yuqori bo'lgan haroratda 1250-1270⁰C qayta ishlov berilib kuydirilgan. Diffuziyadan so'ng, kremniy plastinkasining buzilgan joylari ya'ni sirti shlifovka qilinib, to'rt zondli usulda solishtirma qarshiligi o'lchanadi va o'tkazuvchanlik tipi aniqlanadi. Yuqori haroratli ishlovning ta'sirini bilish uchun, boshlang'ich namunalardan diffuziya uchun qanday tayyorlangan bo'lsa, aynan shu usulda

namunalar tayyorlanib, ular kontrol namunalar deyilib ularga ham bir xil temperaturada ishlov berilib kuydiriladi.

§ 2.4. O'lchash metodikasi

Sig'imni o'lchash 465 kGs chastotada L2-7 ko'prik sxemasida, ya'ni parallel sxemada ishlaydigan qurilma orqali amalga oshirildi. Qurilmadan diodlarga beriladigan o'zgaruvchan signal 50 mV ni tashkil etdi. Sig'imni qiymatini o'lchash uchun, R534 markali o'zgaruvchan etalonli kondensatorni o'lchanadigan diodga parallel ulagan holda amalga oshirildi.

Sig'imni o'lchash aniqligi 0,2 pF bo'lib, xatolik 1% ni tashkil etadi. O'lchashni amalga oshirishdan oldin kabellar sig'imlarini kompensatsiya qilib olindi.

Doimiy vaqtdagi sig'imning relaksatsiyasini o'lchashda 10 s kam bo'lgan vaqtlarni o'lchash uchun, generator rezonansi usuliga mo'ljallangan avtomatik ravishda yarimo'tkazgichli strukturalarning barer sig'imini tez o'lchovchi qurilmadan foydalandik.

Bu erda, S_n – kondensatroning sig'imi bo'lib, tebranuvchi LC generator konturiga parallel ulangan. S_p – ajratuvchi sig'im konturga kiritilgan bo'lib, u diodga v doimiy siljish kuchlanish berishni ta'minlaydi. Generatsiya qilingan tebranish kuchaytiriladi, amplitudasi bilan chegaralanadi va chastotali detektorga uzatiladi.

O'lchashlar amalga oshirilishidan avval, L va S larning qiymatlari o'zgartirilib generatorni rezonans chastotasiga moslashtiriladi, chunki chastotaviy detektorning chiqishi no'l bo'lishigacha sozlanadi. Shundan so'ng, ΔS_n o'zgarishi chastotani o'zgarishiga va chastotali detektorning chiqishida kuchlanish hosil bo'lishiga olib keladi, uning qiymati va qutbi ΔS_n bilan so'zsiz bog'liqligini ko'rsatadi. Bu kuchlanish o'zi yozuvchi qurilma (samopiss) orqali qayd etiladi yoki o'zgarish tez bo'lsa, u holda ossillograf xotirasiga yoziladi. O'lchashdagi eng katta siljish $\Delta S_n = \pm 30$ pF bo'lib, sxema 2 soatdan

ortiq qiziganda, generator chastotasining o'z o'zidan o'zgarishi tufayli absolyut xatolik qiymati $0,05 \div 0,1$ nF/soatni tashkil etar ekan. Nisbiy xatolikda esa generator amplitudasining nostabilligi 1% dan ortmas ekan.

Yorug'lik sig'imi usuli orqali o'lchashni amalga oshirishda IKS-21 monoxromatorning chiqish tirqishidan chiqayotgan yorug'lik LiF yig'uvchi linza va oynasi sappirdan yasalgan Dyura idishi diodning sirtiga fokuslanadi.

Namunalar p-n o'tish tekisligiga perpendikulyar holda baza tomonidan o'tish maydonining butun yuzasi bo'yicha yoritiladi. Yorug'lik intensivligini oshirish uchun, IKS-21 monoxromatoridagi global o'rniga vakuumda kizdiriladigan [3]. SaF_2 dan yasalgan grafitli nurlatkich joylashtirilgan.

Manbadagi kvantlar oqimining maksimal zichligi $I \sim 10^{16}$ kv./sm².s. teng. Yorug'lik sig'imni o'lchash uchun namunalarni safir oynali dyuraga joylashtirilib suyuq azot tushiriladi. Diodlar metalli ekran orqali yorug'likning sochilishidan 77 K da yaxshilab ekranlashtiriladi. Bundan tashqari, yorug'lik sochilishini yo'qotish uchun, monoxromatorning kirish tirqishiga interferensiyali filtrning o'tkazish qobiliyati 0.2 - 0.3 eV, 0.3 - 0.5 eV yoki qisqa polosali filtrlar 0.36 eV, 0.46 eV, 0.63eV, 0.84 eV o'tkazish qiymatining yarimi bilan o'lchanadigan 60 nm (0,1 eV dan 0,5 eV gacha) filtrlar mos ravishda kerakli diapazonlarda ishlatilar ekan.

Namuna temperaturasini nostabilligini temperatura o'zgarishi ni kichik xatoliklar bilan o'lchash $\Delta T = 0.5$ K, med - konstantan termoparasi orqali amalga oshiriladi.

p-n o'tish sig'imi diodning ko'priqli parallel ekvivalent sxemali orqali o'lchandi va uni quyidagi formula orqali aniqlash mumkin [27]..

$$S_m = S_p [(1 + (R_b / R_p)^2 + \omega_e^2 R_b^2 S_p^2)^{-1}] \quad (2.13)$$

bu erda, R_p - o'tish qarshiligi;

C_m - o'lchayotgan ko'prik sig'imi;

ω_e – o‘zgaruvchan signal chastotasi;

R_b – diod bazasining qarshiligi;

S_p – yarimo‘tkazgichning sig‘imi. (2-11) formulaga ko‘ra $\omega_e^2 R_b^2 S_p \sim (1 + R_b/R_p)^2$ bo‘lsa, u holda $S_p > C_m$ tengsizlik bajariladi va sig‘im qiymati pasaygan holda aniqlanadi. Shuning uchun o‘lchashni aniqlinigni oshirish uchun (bitta chastotada), har doim $R_n \gg R_b$ shart bajarilib, shunday chastota diapazonini tanlash kerakki unda $\omega_e R_b S_p \ll 1$ shart bajarilsin.

III-BOB. GAFNIY BILAN LEGIRLANGAN KREMNIYNING ELEKTROFIZIK XOSSALARINI O'RGANISH

§ 3.1. Gafniy bilan legirlangan kremniyning xossalari xaqida

So'ngi yillarda yarimo'tkazgichlarining parametrlarini boshqarish maqsadida ularga qiyin eruvchi elementlarni legirlash keng qo'llanilmoqda. SHunga asoslangan mazkur dissertatsiya ishining maqsadi xam kremniyning elektrofizik xossalari tadqiq qilish, ilmiy ishda foydalanayotgan namunalarga gafniy diffuziya metodi bilan kiritish jarayonini hamda eritmadan o'stirish jarayoni bilan namuna xossalari o'zgarishi o'rganildi.

Namuna sifatida n- va p- tipdagi o'tkazuvchanlikka ega bo'lgan va turli solishtirma qarshilikka ega bo'lgan kremniy monokristallidan foydalanildi. Diffuziya usuli bilan amalga oshirilayotgan legirlash jarayonida o'ta sof bo'lgan gafniy kremniyning yuzasiga 10÷20 soat davomida 900÷1200°C temperaturalari intervalida o'tqazildi (changlatildi). Hf ning diffuziya qilgandan so'ng namunalarni sovutish jarayoni turli xil tezliklarda o'tkazildi. Solishtirish namunasi sifatida n- va p – Si dan foydalanildi, ushbu namuna xam gafniy bilan legirlangan kremniy kabi ayni bir xil sharoitda termik ishlovdan o'tkazilgan.

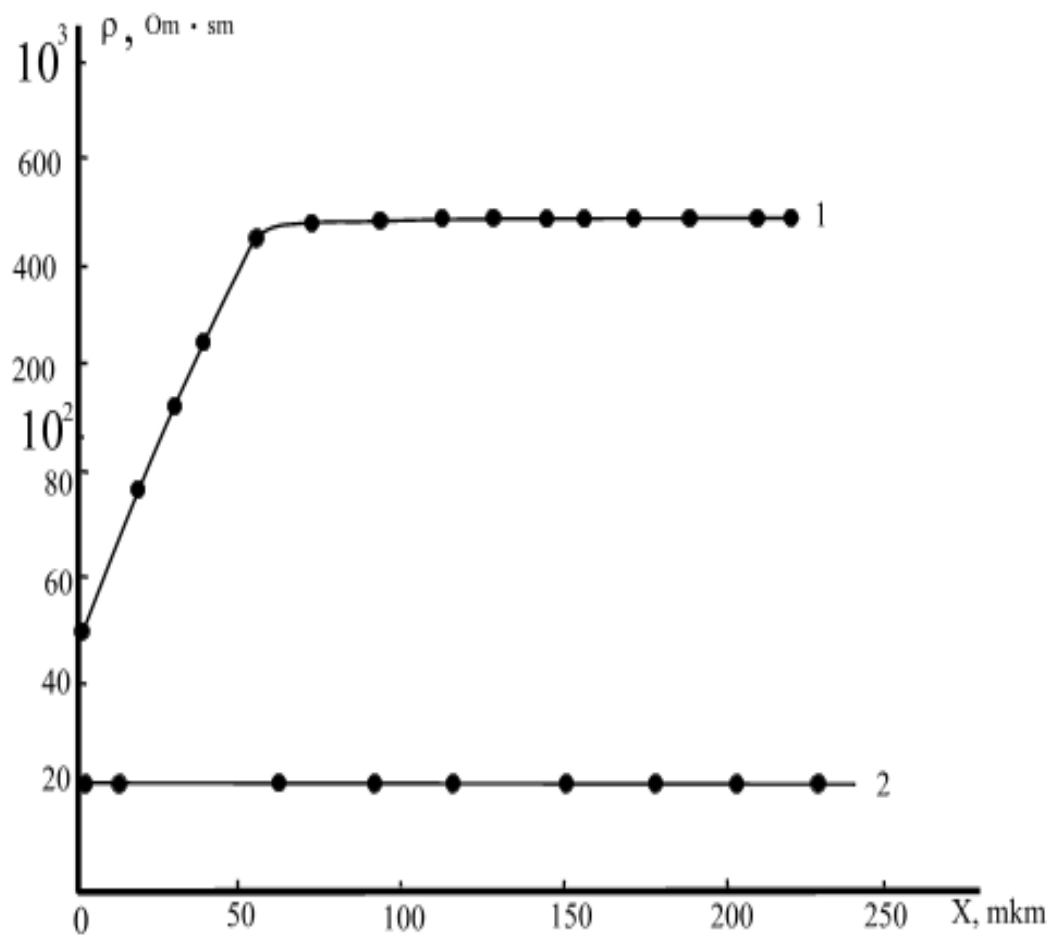
Diffuzion legirlashdan so'ng kremniy Si<Hf> ni to'rt zondli usul bilan namunaning (ρ) solishtirma qarshiligi o'lchandi hamda (ρ) ning kremniyning ρ_{bosh} boshlang'ich xolatidagi ko'rsatkichlari bilan solishtirib ko'rildi. O'lchov natijalari shuni ko'rsatdiki, Hf bilan legirlangan n-Si ning barcha namunalarida solishtirma qarshilik kattaligining o'zgarishi, p – Si da esa solishtirma qarshilik o'zgarmasdan qolishi kuzatildi.

Namunalarning natijalarini taqqoslash uchun 0,5÷100 soat mobaynida 1200°C temperaturada solishtirma qarshiligi 20 Om·sm. bo'lgan n –Si va p –Si qilingan qayta termik ishlov berildi. O'lchash ishlari turli tipdagi bir necha namunalarda o'tkazildi. Natijalar shuni ko'rsatdiki, n – Si va p – Si o'tkazuvchanlik tiplari qayta termik ishlovda o'zgarmay qolar ekan. Shu bilan bir qatorda n – tipdagi namunalarda ρ kattaligining kamayishi, p – tipdagi

namunalarda esa bu xolatning teskarisi ρ solishtirma qarshilikning ortishi kuzatildi.

Gafniy bilan diffuziya usulida legirlangan, bundan tashqari sinov termik ishlovi ta'sirida bo'lgan Si namunalari uchun chuqur satx bo'yicha solishtirma qarshilikni taqsimlanishi o'lchashlar amlaga oshirildi. 3.1 rasm (chiziq 1) Gafniy bilan legirlangan hamda sinov (Hf kirishmasi bo'lmagan) Si ning solishtirma qarshilikni taqsimlanish profili keltirilgan. Rasmdan ko'rinib turibdiki, Si<Hf> namunalarning taqsimlanish profili ikkita soxadan iborat: boshida solishtirma qarshilik ρ ning 60 mkm chuqurlikkacha shiddat bilan o'sishi kuzatiladi. Shundan so'ng ρ stabil xolatga kelib sezilarli darajada solishtirma qarshilikning o'zgarishi kuzatilmaydi. Bu Hf mavjud bo'lganda kremniyning xajmi bo'ylab ρ ning teng miqdorda taqsimlanishini ko'rsatib turibdi. Shunga aynan o'xshash ρ ning taqsimlanishini Ni, Mn va boshqa metallar uchun xam kuzatilgan. Birinchidan, sirt oldi soxasi ρ ning 1.5÷2 tartibda tez o'sishi bilan, ikkinchidan kremniyning xajmida ρ ning deyarli tekis taqsimlanishi tushuntiriladi.

Ta'kidlash joizki, ρ ifodasi sinov (Hf kirishmasi bo'lmagan) namunalarda chuqur satxga joylashgan sari o'zgarmaydi. 3.1 rasm (chiziq 2)



3.1.-rasm . Kremniyning namunalarida ρ solishtirma qarshilikning taqsimlanish profili, (1) Gafniy bilan legirlangan va (2) sinov namunalarida

§ 3.2. O‘stirish usuli bilan legirlangan kremniyning IQ-yutilish spektrini o‘rganish

Mazkur paragrafda Si<Hf>_{diff} ni o‘stirish jarayonida diffuziya qilingan Hf diffuziya qilingan Si namunalarining natijalari keltirilgan. O‘stirish usuli bilan legirlangan GIREDMET (Moskva sh.) da o‘tkazildi.

Namuna sifatida o‘stirish jarayonidagi eritmadagi Hf atomlari mavjud bo‘lgan n – Si dan foydalanildi. Sinov namunasi sifatida Si<Hf>_{diff} kabi bir xil boshlang‘ich solishtirma qarshilikka ega bo‘lgan Si dan foydalanildi. Boshida namunalar M-14, M-10, M-5 **karborund** kukunlari yordamida ketma-ket shlifovka qilindi, avvalroq (2-bobga qarang) uning solishtirma qarshiligi to‘rt zondli usul bilan o‘lchangan, OTP-2 qurilmasi yordamida uning o‘tkazuvchanligi aniqlangan.

Eksperimentlar natijasi shuni ko‘rsatadiki n – tipdagi Si<Hf> namuna va sinov namunalarning solishtirma qarshiliklari $\rho \approx 20 \text{ Om}\cdot\text{sm}$ tashkil qildi. Hf atomlarining miqdori neytron-aktivatsiyali metodi analizi bilan aniqlandi. Bu eksperimentlar shuni ko‘rsatdiki, Hf konsentratsiyasi $1\cdot 10^{16} \div 5\cdot 10^{17} \text{ sm}^{-3}$ ni tashkil qildi.

Si<Hf> namunalarini yuzasini IQ-yutilish spektrini o‘lchash ishlarini o‘tkazishda namunalarning yuzasi yuqorida aytilganidek maxsus metodika bo‘yicha tayyorlandi, IQ-yutilishning spektrini analizi shuni ko‘rsatdiki, Si ning xajmida gafniyning mavjud bo‘lishi IQ-aktiv bo‘lgan kislorod N_o^{opt} konsentratsiyasini sezilarli darajada kamaytiradi. Choxralskiy usuli bilan o‘stirilgan n – Si sinov namunalardan farqli n - Si<Hf>_{diff} namunalarda N_o^{opt} $10 \div 20\%$ kamroq.

Shu narsa aniqki, kremniy namunalarida Hf miqdori qancha ko‘p bo‘lsa, optik aktiv kislorodning shuncha kam bo‘lishi ma’lum bo‘ldi. Natijalarni solishtirish Hf diffuzion legirlangan hamda eritmadan o‘stirish paytida legirlangan Hf namunalarini solishtirish shuni ko‘rsatdiki, Hf atomlarining ikkala tur namuna

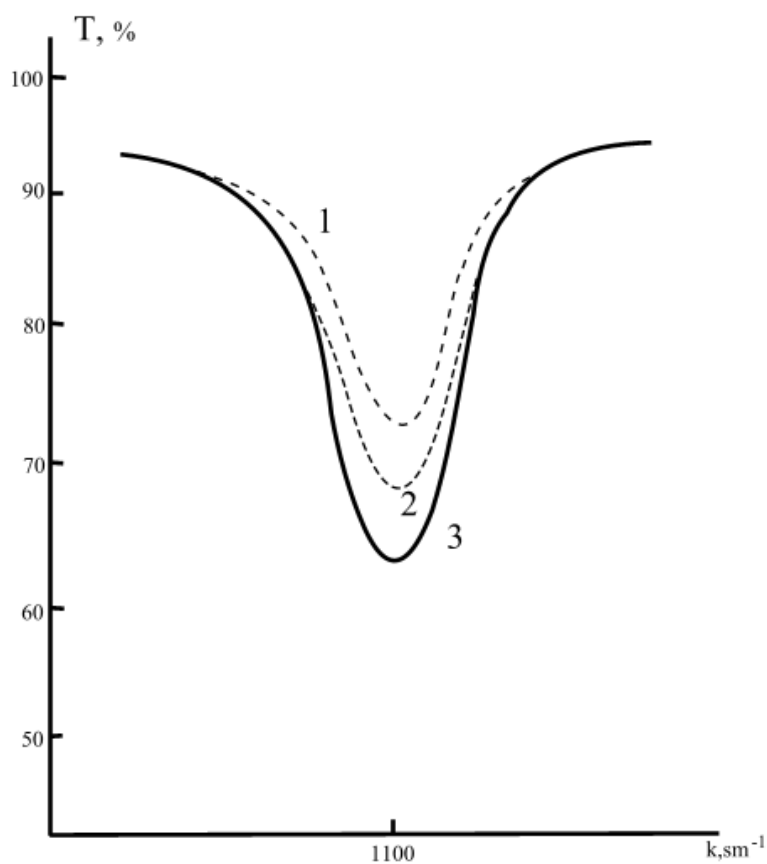
uchun bir xil bo'lgan taqdirda xam N_o^{opt} kamayishi effekti $Si\langle Hf \rangle_{diff}$ namunalari da ancha katta bo'lar ekan. Bu farq sezilarli $Si\langle Hf \rangle_{diff}$ va $Si\langle Hf \rangle_{o'stir}$ larda deffekt strukturalarini shakllanishi bilan bog'liq Si gafniy atomlarining o'zini tutishi va unga termik ishlovning ta'sirini o'rganish.

Hisoblashlardan, YuTI da legirlangan namunalarda N_o^{opt} konsentratsiya $8\div 15\%$ ortishi (3.3-rasm. 2-egrilik) ya'ni N_o^{opt} qisman tiklanishi n- $Si\langle Hf \rangle$ ga nisbatiga olganda (3.3-rasm. 1-egrilik).

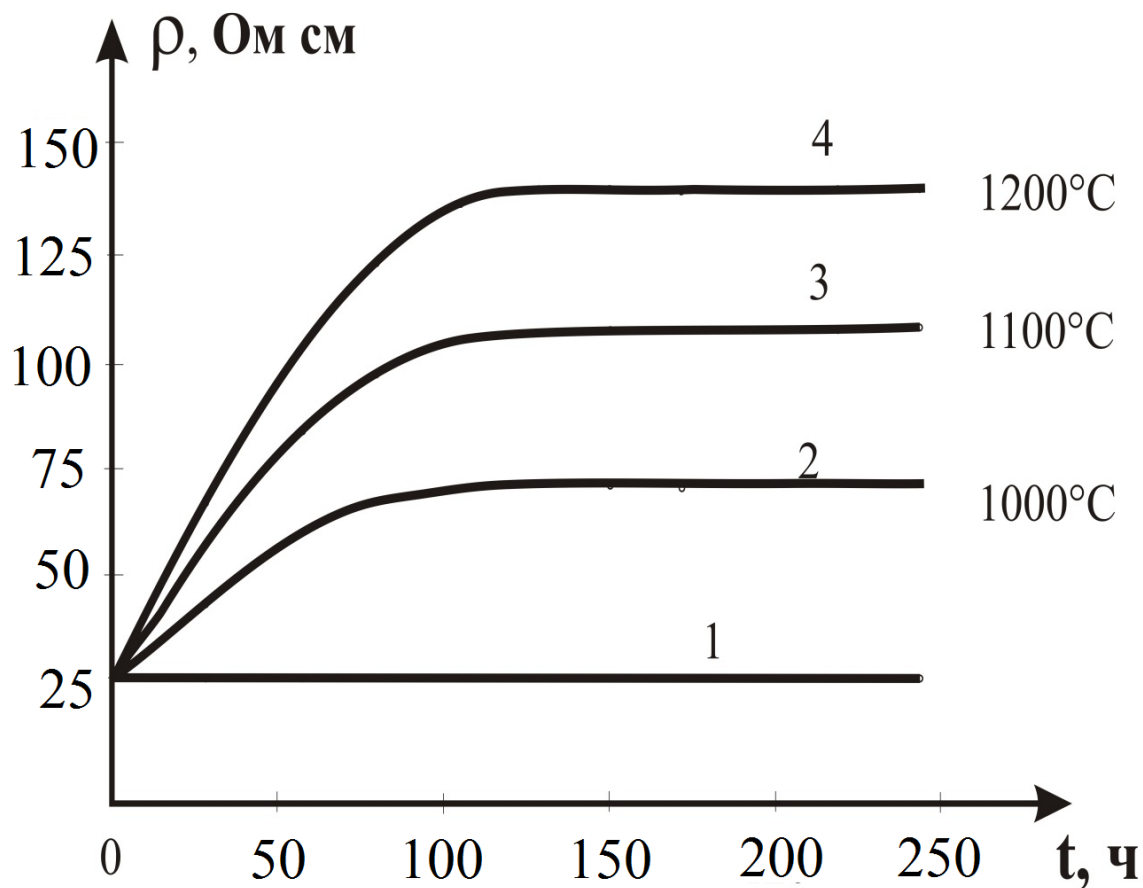
YuTI ta'sirida bo'lgan $Si\langle Hf \rangle_{o'sish}$ namunalarning ρ o'lchash, shuni ko'rsatdiki, ρ bu jarayonda ortib bordi extimol bu YuTI ta'sirida Hf atomlarning aktivlanishi uning akseptor xarakteridan dalolat berib turibdi.

Hf atomlari mavjud Si namunalarining YuTI dan oldin va keyingi solishtirma qarshiliklarining turli rejimlarida o'lchash (T_{YuTI} , $v_{sov.}$) shuni ko'rsatdiki, termik ishlov qizdirish vaqtini ortishi, termik ishlov natijasida ρ ning ortishi kuzatiladi. 3.4-rasmda keltirilgan n- $Si\langle Hf \rangle$ namunalarining ko'p uchraydigan ρ ning termik ishlov berish vaqtiga bog'liqligi berilgan, xususan xususan $1000^{\circ}C$ (2-egrilik), $1100^{\circ}C$ (3- egrik), $1200^{\circ}C$ (4-egrik). Hf legirlangan Si namunalarning ρ solishtirma qarshiliklarini ortishi, shundan dalolatki, turli yuqori temperaturali ishlov berish jarayonlarida namunada kompensatsiyalovchi markazlar kiritilishi kuzatilgan. Jarayondan shunday xulosa qilish mumkinki, chuqur satxlar yuqor termik ishlov paytida gafniy atomlarining aktivlanishiga asoslanadi yoki mos keladi va akseptor xarakterga ega bo'ladi.

YuTI natijasida shunga o'xshash o'zgarishlar ρ ning o'zgarishi sinov namunalari da kuzatilmagan.(3.4-rasm 1-egrik)



3.3. rasm. Sinov namunalarining IQ-yutilish spektri, n-Si<Hf>_{diff} (1), yuqori temperaturali ishlov berishdan so‘ng 1000⁰C da (2) va 1200⁰C (3) Si da termik ishlovning ta’siri gafniy atomlarining kremniydagi xolatini o‘zini tutishini o‘rganish maqsadida diffuzion Hf kabi Si<Hf>_{diff} namunalariga xam (YuTI) yuqori termik ishlov berildi.



3.4-rasm. n- Si<Hf>_{0'stir.} hamda sinov Si solishtirma qashiligini o'zgarishini YuTIB harorati. Temperaturadan chiziq 2 - 1000⁰C, chiziq 3 - 1100⁰C va chiziq 4 - 1200⁰C, chiziq 1 sinov Si namunasi.

§ 3.3. Si<Hf> namunaga yuqori temperaturali ishlov berishda solishtirma qarshilikning taqsimlanish profiliga ta'sirini o'rganish.

Xozirgi paytda kremniydan tayyorlanuvchi pribor va integral sxemalar ma'lum ma'noda termik ta'sir bilan bog'liq. Shu sababli, o'ta muhim masala kremniyga yuqori harorat bilan ta'sir qilganda qanday jarayon kechadi, uning elektrik xossalarini o'zgartirishi qisqa vaqtli qizdirish bo'ladimi yoki yuqori bo'lmagan temperaturalardagi ta'sirida (konsentratsiya va zaryad tashuvchilarni yashash vaqti) o'rganilayotgan namunada yangi strukturaviy defektlarni xosil qilishi, va dastlabki xolatidan defektlarni qayta joylashuvga olib kelishi mumkin.

Ishdan maqsad Si<Hf> namunalarida solishtirma qarshilikning taqsimlanishi profiliga yuqori temperaturali ishlov berish (YuTI yoki YuHIB) ta'sirini o'rganish.

Bu masalaga oydinlik kiritish maqsadida gafniyni diffuzion legirlangan n-Si namunalarida turli temperaturalarda ishlov berish jarayonlari $T_{VTO} = 900 \div 1200^{\circ}\text{C}$ oralig'ida 0,5÷10 soat davomida o'tkaziladi. n-Si<Hf> plastinalarida termik ishlovdan oldin kislota-peroksidli ishlov berildi. Qizdirish ochiq xavoda kvardsdan yasalgan idishchalarda o'tkaziladi. Bir xil shart-sharoitda sinov (gafniysiz) namunalar kuydirildi, YuTIBdan keyingi namunani sovutish tezliklarida v_{sov} amalga oshirildi: namuna solingan ampulalarni suvga tez tashlash (tez sovutish) yoki o'chirilgan pech rejimida (sekin sovutish), bu rejimda pechda ampulalalar ma'lum vaqt ushlab turiladi.

Gafniy kirishmali kremniy namunalarida va Hf bo'lmagan sinov namunalarida to'rt zondli usul yordamida solishtirma qarshilikning taqsimlanish profili o'lchandi.

Hf kirishmali kremniy namunalarida qo'shimcha YuTIB qilinishidan oldin va keyingi ρ solishtirma qarshilikni o'lchash, turli rejimlarda (T_{yutib} , v_{sov}) olib borilgani shuni ko'rsatdiki, temperaturaning ortishi ρ solishtirma

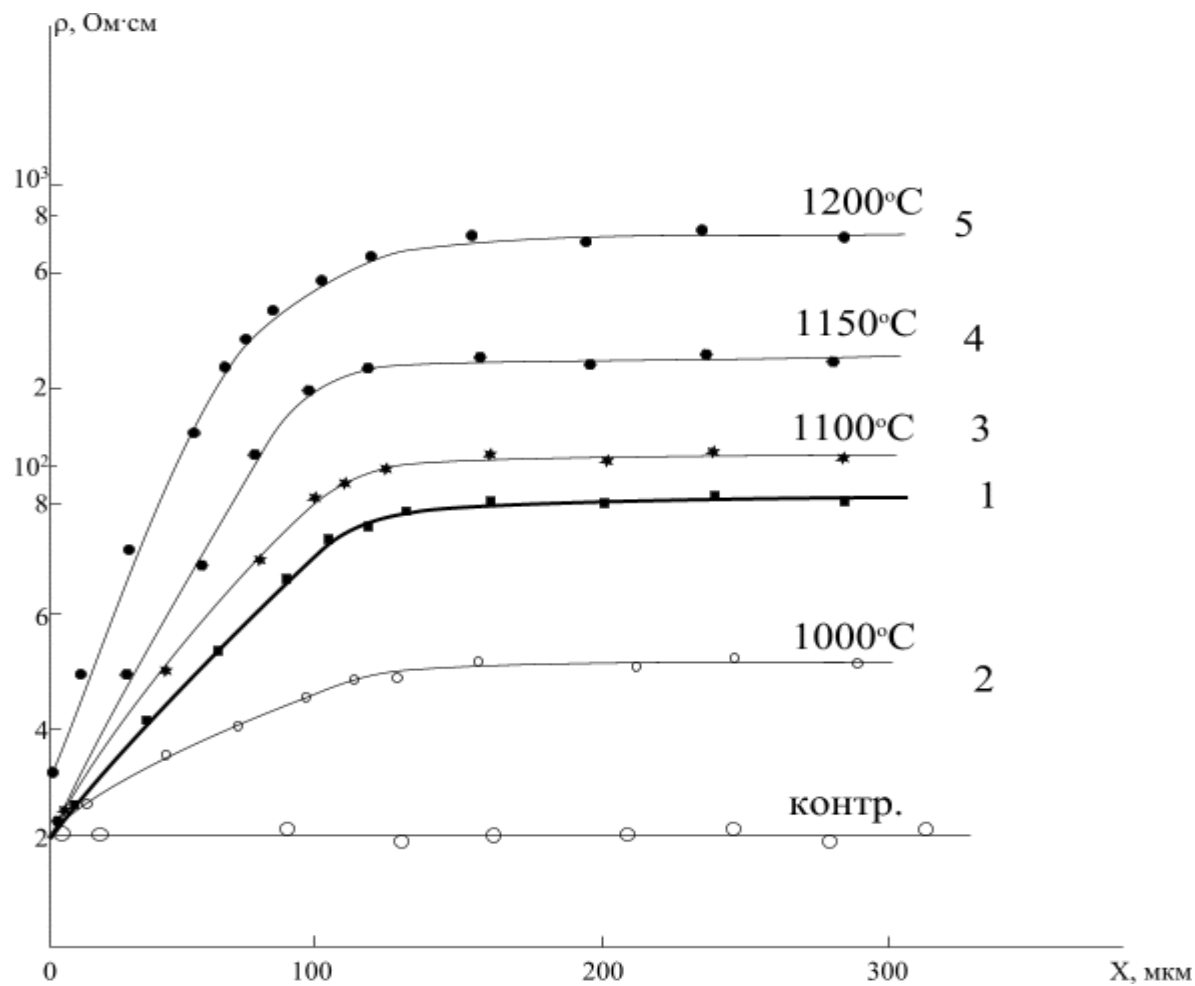
qarshilikning ortishiga olib keladi. 3.5-rasmda n-Si<Hf> namunalarining ρ solishtirma qarshiligining taqsimlanish profilini odatiy ko‘rinishi berilgan, jumladan, n-Si<Hf> legirlanish temperaturasi 1100°C (1-egrilik) tashkil qilgan xolda, uning namunaga qo‘shimcha YuTI berishdan keyingi bosqichma-bosqich 1000°C (2-egrilik), 1100°C (3-egrilik), 1150°C (4-egrilik), 1200°C (5-egrilik) temperaturalarda tez sovutilgan. Ushbu bog‘liqliklar taxlili shuni ko‘rsatmoqdaki, diffuziya temperaturasi qo‘shimcha YuTIB temperaturasidan $T_{\text{yutib}} < T_{\text{diff}}$ katta bo‘lganda (T_{diff} –diffuziya temperaturasi) (2-egrilik) ρ solishtirma qarshilikning kamayishiga olib keladi, bu o‘z o‘rnida gafniy atomlarining dezaktivatsiyalanishidan dalolat beradi. Diffuziya temperaturasidagi YuTIB sezilarli darajada ρ taqsimlanish profilini o‘zgartirmaydi (3-egrilik). Taqsimlanish xarakteri sezilarli o‘zgarmaydi.

$T_{\text{YuTI}} > T_{\text{diff}}$ shartiga muvofiq yuqori temperaturali ishlov berilgan (chiziq 4 va 5) gafniy bilan legirlangan kremniy namunasida ρ solishtirma qarshiligining o‘zgarishi gafniyning aktivlanish energiyasi mavjudligini ko‘rsatadi.

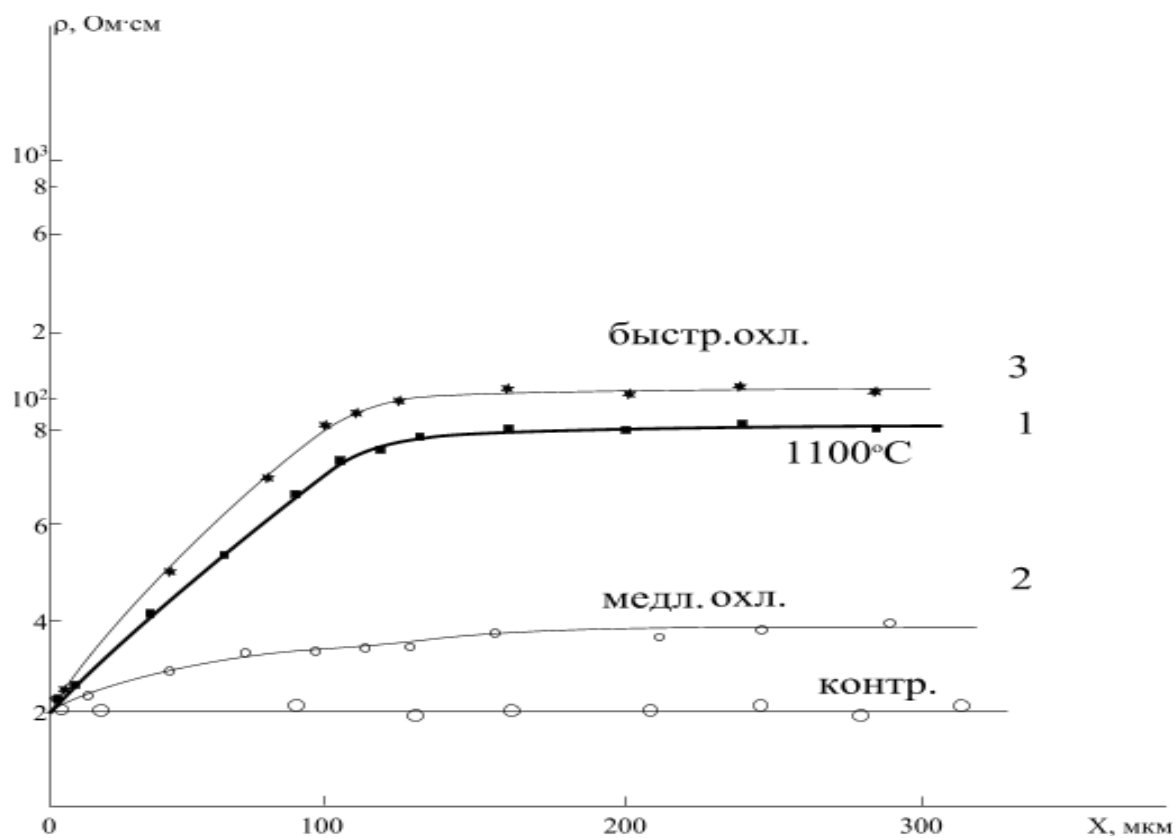
Gafniy bilan diffuzion legirlangan n-Si namunalariga qo‘shimcha yuqori temperaturani berishdan keyingi ketma-ket sekinlik bilan sovutilish (3.6-rasm. chiziq 1-2-3) ρ solishtirma qarshilikning keskin kamayishiga olib keladi, bu o‘z navbatida, gafniy markazlarini tez kuyishidan dalolat beradi.

Gafniy atomlarining qo‘shimcha aktivlanish shartiga muvofiq kirishmaning elektroaktiv markazlari yuqori temperaturali ishlovda, akseptor xarakterga ega bo‘lishini xulosa qilish mumkin.

Analogik xolda sinov namunalarida YuTI berish ta’sirida ρ solishtirma qarshilikning o‘zgarishi kuzatilmadi.



3.5-rasm. 1100°C da n-Si<Hf> namunalarida, qo‘shimcha YuTIB dan so‘ng keskin sovutilishidagi ρ solishtirma qarshilikning taqsimlanish profili



3.6-rasm. 1100°C da n-Si<Hf> namunalarida, qo'shimcha YuTIB dan so'ng sekin sovutilishidagi ρ solishtirma qarshilikning taqsimlanish profili

XULOSA

1. Gafniyning diffuzion usulda legirlangan n – Si namuna panjaraga kiritish solishtirma qarshilikning kattaligini ortishiga olib keladi. p – Si namunada ρ solishtirma qarshilik kattaligi o'zgarmay qoladi. Bundan shunday xulosa keladiki gafniy atomlari xam ko'pgina NEE kabi akseptor markazlar kiritadi.

2. Turli rejimlardagi (T_{YuTI} , $v_{sov.}$) qo'shimcha yuqori termik ishlov berishdan oldin va keyigi xolati uchun shu narsa ma'lum bo'ldiki, termik ishlov paytida ρ solishtirma qarshilikning o'zgarishi kuydirish temperaturasi ortishiga bog'liq ekan.

3. $T_{YuTIB} < T_{diff}$. diffuziya temperaturasidan T_{YuTIB} temperaturasi kichik bo'lsa, (bu erda T_{diff} -diffuziya temperaturasi) ρ solishtirma qarshilikning kamayishiga olib keladi. Bundan gafniy atomlarining dezaktivatsiyalanishi aniq bo'ldi.

4. Diffuziya temperaturasiga T_{YuTIB} temperaturasi teng bo'lsa xech qanday ρ taqsimlanish profilini o'zgarishiga olib kelmaydi. Shu bilan bir qatorda taqsimlanish xarakteri sezilarli o'zgarmaydi. Gafniy kirishmali kremniy namunasi $T_{VTO} > T_{diff}$ ta'sirida solishtirma qarshiligining ortishi namunada (4-5 egrilik) gafniyning atomlarining qo'shimcha aktivlanishi aniqlandi

5. Gafniy kirishmasi diffuzion legirlangan n-Si namunalarini qo'shimcha T_{YuTI} berilishi va shundan so'ng bosqichma-bosqich sovutilishi ρ solishtirma qarshilikning keskin kamayib ketishiga sabab bo'ladi, bundan xulosa qilish mumkinki, gafniy markazlarining tezda kuyishi ma'lum bo'ldi.

6. Hf kremniyning kristall panjarasiga diffuzion usul bilan kiritilishi yutilish polosasining intensivligini kamayishiga olib keladi, bu jarayon tugunlararo optik aktiv $9 \div 15\%$ dagi kislorodning xossalari xarakterlaydi.

Foydalanilgan adabiyotlar ro'yxati

1. Milns L. Primesi s glubokimi urovnyami v poluprovodnikax. – M., Mir, 1977, 547s.
2. Boltaks B.I., Вахадьрханов M.K., Gorodetskiy S.M., Kulikov G.S. Компенсированный кремний. – L. Nauka, 1972, 122 s.
3. Zaynabidinov S.Z., Daliev X.S. Defektoobrazovanie v kremnii. Tashkent, Universitet, 1993, 191s.
4. Bendik N.T., Garnik V.S., Milevskiy L.S. Issledovanie metodom EPR prirody urovney jeleza v kremnii. FTT, 1970, t.12, s.1693
5. Boltaks B.I., Вахадьрханов M.K., Kulikov G.S. Elektricheskie svoystva i raspad tverdogo rastvora jeleza v kremnii. FTT, 1971, t.13, вып.9, s.2675.
6. Abdugaffurova M.A., Kapitonova L.N., Kostina L.S., Lebedev A.A., Maxkamov SH. Issledovanie fotoemkosti diodov iz r-Si s primesьyu jeleza. FTP, 1975, t.9, вып. 4, s.685-689.
7. Abduraxmonov K.P., Daliev X.S, Kulikov G.S., Lebedev A.A., Nazirov D.E., Utamuradova SH.B. Issledovanie vzaimodeystviya jeleza s drugimi elementami v kremnii. FTP, 1986, t.20, вып.1, s.185.
8. Bagraev N.T., Polovsev I.S., Reaksiisentrovi jeleza, indutsirovannyye pininingam urovnya Fermi v kremnii r-tipa. FTP, 1989, t.23, вып.9, s.1643-1645
9. Woodbury H.H., Ludwig J.W. Phys. Rev., 1960, 117, p.102 Carlson R.O. Properties of silicon doped with Manganese. Phys. Rev.,1956, 104, N.4., p.937.
10. Carlson R.O. Properties of silicon doped with Manganese. Phys. Rev.,1956, 104, N.4., p.937.
11. Abduraxmanov K.P., Lebedev A.A., Kraysly Y., Utamuradova SH.B. Glubokie urovni v kremnii, svyazannyye s marganssem. FTP, 1985, t.19, вып.2, s.213-216.
12. Lebedev A.A., Abduraxmanov K.P., Vitman R.F., Guseva N.B., Daliev

- X.S., Utamuradova SH.B. Vliyanie kisloroda i ugleroda na povedenie margansa v n-Si. FTP, 1989, t.23, vьp.12, s.2227-2229.
13. Вахадьрханов М.К., Parmankulov I.P. Neustoychivost' toka v kremnii, kompensirovannom margansem, svyazannaya s rekombinatsionnymi volnami. FTP, 1989, t.23. vьp.9, s.1646 – 1650.
 14. Yakubyan S.M. Povedenie ionov margansa v kremniissentry vnedreniya. FTT, 1991, t.33, vьp.5, s.1462.
 15. W.Spielmann, West German Patent, No. 1.171, 536 4 June (1964).
 16. M. Schulr, Appl. Phys. 4, 225 (1974).
 17. Gntsche H.W., Hill D.E. Monsanto Corp. Quarterly Research Reports 1976, ERDA/JPL.
 18. Weber E. R. Transition Metals in silicon. Appl. Phys., 1983, v. A30, p.1.
 19. Poluprovodniki / Pod red. N.B. Xenneya. - M.: Izd-vo inostr. lit.,1962.
 20. Salli I.V., Fалькеvich E.S. Proizvodstvo poluprovodnikovogo kremniya. - M.: Metallurgiya, 1970.
 21. Reyvi K. Defekty i primesi v poluprovodnikovom kremnii. – M.:Mip1984.
 22. Mильvidskiy M.G., Osvenskiy V.B. Sgrukturnye defekty v monokristallax poluprovodnikov. - M.: Metallurgiya, 1984.
 23. GrossmanL.D., BakerJ.A. // Semiconductor Silicon 1977, Proc. 3rdIntern. Symp.Silicon Material Science and Technology / Ed. H.R. Huff and E. Sirtl. –N.Y.: Elect-rochem. Soc. - P. 18-31.
 24. Kem E.L., Yaggy L.S., Baker J.A. Ibid. P. 52-61.
 25. Baron R., YongM.H, NeelandJ.K, Marsh O.J. Ibid.
 26. Carlson II Semiconductors and Semimetals, Hydrogenated Amorphous Silicon. PartD: Device Application / Ed. J.I. Pankove. - V. 21. - Acad. Press., 1984. –735.
 27. Revel G., Hank D., Pastol J.L. // Poly-micro-crystalline and Amorphous Semicon- ductors / Eds. P. Pinard, S. Kalbitzer. - Strasbourg, 1984, - P. 147-160.

28. Aulich H.A., Bernewitz L., Penzi H.J. e. a. f/ Poly-microcrystalline and Amorphous Semiconductors/ Eds. P. Pinard, S. Kalbitzer. - Strasbourg, 1984. -P 175-180.
29. Matlock J.H. I Semiconductor Silicon 1977, Proc. 3rd Intern.Symp. Silicon Material Science and Technology / Ed. H.R. Huff, E. Sirtl. - N.Y.: Electrochem. Soc. -P. 32-52.
30. Matlock J.H. II Proc. Symp, Defects in Silicon, 1983 / Ed. W.M. Bullis, L.C. Kimerling. - N.Y.: Electrochem. Soc. - P. 3-28.
31. Newman R.C. II Rep. Prog. Phys. - 1982. - V. 45. - P. 1163-1210.
32. Kock A.F.R., Roksnoer P.J., Boonen P.G.T. // Semiconductor Silicon 1973, 2nd Intern. Symp. Silicon Material Science and Technology / Ed. H.R. Huff, R. Burgers. N.Y.: Electrochem. Soc. - P. 83-94.
33. Abe T., Abe Y., Chikawa J.I. // Semiconductor Silicon 1973, 2nd Intern. Symp. Silicon Material Science and Technology / Eds H.R. Huff, R. Burgers. - N.Y.: Electrochem. Soc. - P. 96-106.
34. Benson K.E., Lin W., Martin E.P. // Semiconductor Silicon 1981, 4th Intern. Symp. Silicon Material Science and Technology / Eds H.R. Huff, R.J. Kreiger, Y. Takeishi. N.Y.: Electrochem. Soc. - P. 33-47.
35. Abe T, Kikuchi K., Shirai S., Muraka S. Ibid.
36. Jastezebski L., Zanzucchi P. Ibid.
37. Kock A.J.R. I Defects in Semiconductors / Ed. J. Narayan, T.Y. Tan. - North Holland, N.Y. - Oxford, 1981. - P. 309-316.
38. Abe T., Harada H-, Chikawa J.I. // Defects in Semiconductors II / Ed. S. Mahajan i. Corbett. - North Holland, N.Y. - Amsterdam, 1983.
39. Voronkov V. V. II J. Cryst. Growth. - 1982. - V. 59, No 3. - P. 625-629.
40. Пычishin V.A., Stepchenkov V.N. 11 Elektronnaya texnika. Ser.

- Materialy. 1982. - Выр. 9 A70). - S. 3-10.
41. Пьчishin V.A., Stepchenkov V.N. // Elektronnaya texnika. Ser. Materialy 1983. -V. 14A75). -S. 3- 10.
 42. Milns A. Primesi s glubokimi urovnyami v poluprovodnikax. - M.: 1977.
 43. Kryuchkov SM., Lavrenev A.A., Xaynovskiy V.I. //Mikroelektronika. – 1982. T. 9, №2.-S. 150-154.
 44. SeegerA., Chik K.R. // Phys. Stat. - 1968. - V. 29. - P. 455-543.
 45. Van J.A. II Phys. Rev. - 1978. - V. B17. - P. 3197-3207.
 46. Zeeger A., Felb X., Frank V. Tochechnые defekty v tverдых telax. - M.: Mir, 1978.
 47. Frank W., SeegerA., Gosele V. /I Defects in Semiconductors / Eds. J. Narajan, T.Y. Tan. - North Holland, N.Y. - Oxford, 1981. - P. 31-54.
 48. Gosele U., Frank W. Ibid.
 49. Gosele U., Tan T.Y. // Defects in Semiconductors II // Ed. S. Mahajan, J. Corbett. North Holland, N.Y. - Amsterdam, Oxford, 1983.
 50. Lang D.V. Deep-level transient spectroscopy A new method to characterize traps in semiconductors. J. Appl. Phys. 1974. Vol. 45.N. 7.p. 3023 – 3032.
 51. Berman L.S. Vvedenie v fiziku varikapov. L., Nauka, 1968.108s.
 52. Berman L.S. Emkostные методы issledovaniya poluprovodnikov - L., Nauka, 1972, 104s.
 53. Berman L.S. Opredelenie profilya konsentratsii glubokoy primesi v diffuzionnom r-p- perexode - FTP, 1976, t 10, v11, s 2157-2159.
 54. Lebedev A.A. Opredelenie secheniya fotoionizatsii metodom fotoemkosti pri nalichii neskolbкix glubokix urovney v zapreщennoy zone - FTP, 1974, t 8, v 3, s. 457-562.
 55. Kapitonova L.M., Kostina L.S., Lebedev A.A., Mamadalimov A.T., Maxkamov SH. Issledovanie fotoemkosti v diodax iz Si<Zn> - FTP, 1974, t 8, v 4, s. 694-701.

56. Mamadalimov A.T., Lebedev A.A., Astrova E.V. Spektroskopiya glubokixsntrov v poluprovodnikax.. Tashkent. "Universitet", 1999. 164s.
57. Prins V.YA., Bulatetskiy N.G. Spektroskopiya glubokix primesnykh urovney kompensatsionnym metodom. - PTE, 1979, v 4, s.255-258.
58. Lebedev A.A., Berman L.S. Emkostnaya spektroskopiya glubokix urovney. L., 1983.
59. Zaynabidinov S.Z., Daliev X.S. Defektoobrazovanie v kremnii. Tashkent, Universitet, 1993, 191s.
60. A.P. Dolgolenko, P.G. Litovchenko, M.D. Varen-tsov, G.P. Gaidar, A.P. Litovchenko. Particularities of the formation of radiation defects in silicon with low and high concentrations of oxygen // *Phys. stat. sol. (b)*. 2006, v. 243, N 8, p. 1842-1852..
61. Boltaks B.I., Вахадырханов M.K., Gorodetskiy S.M., Kulikov G.S Kompensirovannyy kremniy. – L. Nauka, 1972, 122 s.
62. Lang D.V. Deep-level transient spectroscopy A new method to characterize
63. Mamatkarimov O.O., Vlasov S.I., Nazirov D.I. YArimo'tkazgich materiallar va asboblar fizikasi praktikumi. Toshkent. 2006 y. Str. 165-173
64. Zaynabidinov S.Z. Fizicheskie osnovy obrazovaniya glubokix urovney v kremnii. Tashkent, Fan, 1984, 160 s.
65. Xivrich V.I. Radiatsionnyye efekty v kremnii. - Kiev: Nauka , 1974.
66. L.F.Makarenko. Proverka primenimosti modeli monovalentnogo defekta dlya opisaniya svoystv kompleksa vakansiya-kislород v kremnii // FTP. 2000, t.34,№10, s 1162-1165.
67. V.P. Markevich, L.I. Murin. Selektivnyy захват mezhuzel'nykh atomov ugleroda v obluchennom kremnii // *FTP*. 1988, t. 22, № 5, s. 911-914.
68. P. Pellegrino, P. Leveque, J. Lalita, A. Hallen, C. Jagadish, B.G. Svensson. Annealing kinetics of vacancy-related defects in low-dose MeV self-ion-implanted n-type silicon // *Phys. Rev. B*. 2001, v. 64, N 19, r. 195211-10.

69. J. Coutinho, R. Jones, S. Oberg, P.R. Briddon. The formation, dissociation and electrical activity of divacancy-oxygen complexes in Si // *Physica B*. 2003, v. 340-342, r. 523-527.
70. A. Mattoni, F. Bernardini, and L. Colombo. Self-interstitial trapping by carbon complexes in crystalline silicon // *Phys. Rev. B*. 2002, v. 66, N 19, r. 195214-6.
71. A.P. Dolgolenko, P.G. Litovchenko, M.D. Varen-tsov, G.P. Gaidar, A.P. Litovchenko. Particularities of the formation of radiation defects in silicon with low and high concentrations of oxygen // *Phys. stat. sol. (b)*. 2006, v. 243, N 8, p. 1842-1852.

Izohli lug‘at

1. NEE – nodir er elementlar
2. CHS – chuqur sath
3. DLTS – Deep Level Transient Spectroscopy (chuqur sathlar nostatsionar sig‘im spektroskopiyasi)
4. RN – radiatsion nuqsonlar
5. FS – fotosig‘im
6. NAT – neytron faollashtirilgan tahlil
7. TN – termik (qizdirib ishlov berilgandagi) nuqsonlar
8. SD – sinxrodetektor
9. SU – selektiv kuchaytirgich
10. IQ – infraqizil
11. YUTQ (YUTIB) – yukori temperaturali ishlov berish
12. PTI – (PTIB)- past temperaturali ishlov berish
13. HZQ – hajmiy zaryad qatlami
14. V_k - kontakt potentsiallar farqi
15. ρ – solishtirma qarshilik

16. σ_n - elektronni tutish kesimi
17. v_2 - elektronning issiqliq tezligi
18. N_c – o‘tkazuvchanlik zonasidagi effektiv holatlar zichligi
19. E_s - o‘tkazuvchanlik zonasi eng past energiyasi
20. E – energiya
21. k - Bolʻsman doimiysi
22. T - absolyut temperatura
23. t - vaqt
24. k - kirishma taqsimot koeffitsienti
25. ε - yarimo‘tkazgich nisbiy dielektrik singdiruvchanligi
26. ε_0 – vakuum dielektrik doimiysi
27. e - elektron zaryadi
28. N_D – diod bazasidagi o‘lchash temperaturasida to‘la ionlashgan donorlar konsentratsiyasi
29. e_n - elektron uchun emissiya sur'ati
30. W – HZQ qalinligi
31. I_1 – o‘tgan nur intensivligi
32. I_2 – yutilgan nur intensivligi