

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

**MIRZO ULUG'BEK NOMIDAGI
O'ZBEKISTON MILLIY UNIVERSITETI**

**Qo'lyozma huquqida
UDK 621.315**

SOLIYEV ALISHER ZOKIRJONOVICH

**KREMNIYNING ELEKTROFIZIK XOSSALARIGA
NOYOB YER ELEMENTLARI ION IMPLANTATSIYASINING
TA'SIRINI O'RGANISH**

**Mutaxassislik: 5A140204 - "Kondensasiyalangan muhitlar fizikasi
va materialshunoslik (turlari bo'yicha)"**

**Fizika magistri
akademik darajasini olish uchun
dissertasiya**

**Ish ko'rildi va himoyaga tavsiya
qilindi.**
"Yarimo'tkazgichlar va polimerlar
fizikasi" kafedrasini mudiri:
dots. Nazirov D.E.

Ilmiy rahbar:
fizika-matematika fanlari nomzodi,
dotsent Nazirov D.E.

TOSHKENT - 2013

M U N D A R I J A

	sahifa
KIRISH	
I BOB. NOYOB YER ELEMENTLARI BILAN LEGIRLANGAN KREMNIYNING XOSSALARI	
1.1. Oʻstirish va ion implantasiya jarayonlarida noyob yer elementlari bilan legirlangan kremniyning xossalari	
1.2 Noyob yer elementlari bilan diffuziyaviy legirlangan kremniyning xossalari	
1.2. Qisqa xulosalar. Dissertasiyaning maqsadi va vazifalari	
II BOB. NAMUNALARNI LEGIRLASH TEXNOLOGIYASI VA TADQIQLASH METODLARI	
2.1. Kremniy namunalarini legirlash texnologiyasi	
2.2. Namunalarga termik ishlov berish	
2.3. Namunalarning xossalarini tadqiqlash metodlari	
2.4. Eksperimentning aniqligi va xatoliklarni baholash	
III BOB. KREMNIYNING ELEKTROFIZIK XOSSALARIGA NOYOB YER ELEMENTI ION IMPLANTATSIYASINING TAʼSIRINI OʻRGANISH	
3.1. Noyob yer elementi itterbiy bilan diffuziyaviy legirlangan kremniyning elektrofizik xossalari	

3.2. Kremniyga ion implantasiya yordamida kiritilgan noyob yer elementi itterbiy taqsimoti, kremniyning elektrofizik xossalari va ularga termik ishlovning ta`sirini tadqiqlash	
3.3. Xulosalar	
Chop etilgan ishlar ro'yxati	
Chop etilgan ishlar nusxalari	
Foydalanilgan adabiyot	

KIRISH

Zamonaviy yarimo'tkazgichlar elektronikasining zamonaviy rivojlanish darajasi yarimo'tkazgich materiallar texnologiyasining yutuqlari bilan chambarchas bog'liqdir. Hozirgi vaqtda turlicha yarimo'tkazgich asboblari ishlab chiqarishda kremniy (Si), germaniy (Ge), A^2B^2 , A^3B^5 kabi yarimo'tkazgich birikmalar keng qo'llanilmoqda. Shu bilan birga hozirgi kunda ham kremniy monokristallari eng ko'p ishlatilayotgan yarimo'tkazgichlarning oldingi o'rnini egallab kelmoqda. Yarimo'tkazgich asboblari olishning asosiy texnologik jarayonlari esa, kirishmaviy atomlarni (kimyoviy elementlar) yarimo'tkazgich materialga yuqori temperaturalarda diffuziya jarayonida, yarimo'tkazgich materialni o'stirish jarayonida, yarimo'tkazgichlarni ion implantatsiyalash metodi yordamida kiritishdan iborat bo'lmoqda. Termik ishlov jarayonida yarimo'tkazgichni oksidlash, unga legirlovchi kirishmalarni diffuziyalash (yoki yarimo'tkazgich sirtiga implantatsiyalangan ionlarni hajmga termik haydash) jarayonlari odatda yuqori temperaturalarda ($1000 \div 1300^\circ C$) olib borish, shuningdek, termik yuklash "qizdirish – sovutish" bosqichlarining ko'p marta takrorlanishi yarimo'tkazgichning, xususan kremniyning dastlabki elektrofizik parametrlarini ko'p holatlarda muqarrar o'zgarishiga olib keladi (ya'ni, zaryad tashuvchilarning konsentratsiyasi, harakatchanligi va yashash vaqtlari keskin o'zgaradi). Natijada esa, kremniy asosida yaratilgan asboblarning (diod, transistor va h.k.) sifati keskin yomonlashadi.

Elektrofizik parametrlarning yuqorida keltirilgan o'zgarishlari natijasida, birinchi navbatta kremniyning taqiqlangan zonasidagi lokal energetik sathlar spektrlari o'zgaradi. Ya'ni ushbu hollarda taqiqlangan zonada termik ishlovlar bilan bog'liq ravishda termik nuqsonlar – "termik markaz"lar paydo bo'ladi. Termik nuqsonlar – termik nuqsonlarning hosil bo'lishining asosiy jarayonlari –

kirishmaviy atomlarning va nuqsonlarning elektrik faol komplekslarining paydo bo'lishi (yoki parchalanishi), kirishmaviy atomlarning sirtidan kristall hajmiga kirishi, shuningdek qattiq eritma holatidagi kirishmaning parchalanishi kabi holatlardan iborat bo'ladi.

Termik nuqsonlarni hosil bo'lish sharoitlarini va elektrik tabiatini o'rganishda ularning kremniyning taqiqlangan sohasida chuqur sathlar hosil qiluvchi kirishmaviy atomlar bilan o'zaro ta'sirlashuvi muhim ahamiyatga egadir. Chuqur sathlar yarimo'tkazgich materiallar va ular asosidagi asboblarning parametrlariga ta'sir qilishi (zaryad tashuvchilar konsentratsiyasini va yashash vaqtini o'zgartiradi) ma'lum. Hozirgi vaqtda shunday kirishmalar qatoridan o'ttizga yaqin kirishmaviy atomlarning tabiati o'rganilgan. Kremniyning taqiqlangan sohasida chuqur sath hosil qiluvchi elementlarning ba'zilari uning hossalarni barqarorlashtiradi; ushbu kirishmaviy atomlar bilan legirlangan kremniyning elektrofizik parametrlari temperaturaning (shuningdek, radiatsiyaviy nurlanishning) ta'sirlariga yetarlicha barqarordir. Boshqa chuqur sathlar hosil qiluvchi kirishmaviy elementlar bilan legirlangan yarimo'tkazgichlar esa, aksincha, boshlang'ich materialga nisbatan, temperatura yoki radiatsiyaning ta'siriga nisbatan sezuvchan bo'lib qoladi. Ushbu holat esa shunday atomlar kristall bo'ylab harakatlanib panjara nuqsonlari bilan o'zaro ta'sirlashib, taqiqlangan sohada zaryad tashuvchilarning yangi lokal markazlarini hosil qilish bilan bog'liqdir.

Kosmik fazoni tadqiqlashlar va atom energetikasining rivojlanishi tadqiqotchilar oldiga nafaqat termik barqaror, balki radiatsiyaga chidamli yarimo'tkazgich materiallar va ular asosidagi asboblarni yaratish vazifasini qo'ydi. Ushbu vazifani amalga oshirish tabiiy ravishda kremniyning radiatsiyaviy barqarorligini oshirish yo'llarini izlashni taqazo etadi. Shunday yo'llardan biri, radiatsiyaviy nurlashdan avval, kremniyni yetarlicha katta konsentratsiyalarda ma'lum bir kirishmaviy atomlar bilan legirlashdan iboratdir. Ushbu tanlab olingan atomlar radiatsiya ta'sirida faol bo'ladigan birlamchi "radiatsiyaviy nuqsonlar"

bilan kremniy hajmida mavjud texnologik nazorat qilib bo'lmaydigan kirishmalarning (kislorod, uglerod, temir, nikel, natriy va h.k.) o'zaro elektrik faol komplekslar hosil bo'lishini passivlovchi (kamaytiruvchi) vazifasini bajaradi. Boshqa yo'l esa, radiatsiya ta'sirida generatsiyalanuvchi – hosil bo'luvchi birlamchi radiatsiyaviy nuqsonlar bilan maxsus kiritilgan kirishmaviy atomlar o'zaro elektrik neytral “kirishma – nuqson” turidagi komplekslar hosil qilishidir.

Yuqori termik barqaror va radiatsiyaviy chidamli yarimo'tkazgich materialni izlash bilan bog'liq ravishda so'nggi yillarda noyob yer elementlari bilan legirlangan kremniyga qiziqish ortdi [1-3]. Ammo shu vaqtgacha mavjud mos ma'lumotlar hozirgacha juda kam, noizchil, tarqoq va ko'p hollarda qarama-qarshidir. Ammo ushbu ma'lumotlar kelgusidagi tadqiqotlar yo'nalishi uchun o'ziga hos qiziqish ham uyg'otdi.

Shuningdek, noyob yer elementlarining kremniy matritsasiga kiritilishi, kremniy optoelektronikasining rivojlanishi uchun keng spektral diapazondagi mominessent (elektrolyuminessensiya, fotolyuminessensiya) xossalarga ega asboblarning strukturalarining element bazasini yaratish uchun imkon beradi [5-7]. Ushbu holat noyob yer elementlarining ichki 4f-qobig'ida elektronlarning o'tishlari nurlanish chastotasining temperaturaga bog'liq bo'lmasligi va spektral chiziq kengligining kichikligiga bog'liq bo'ladi.

Masalan, noyob yer elementlari vakili – erbiy kirishmasi (Er^{+3} ionlari) eng katta qiziqish uyg'otadi. Chunki erbiyning aynan 4,54 mkm to'lqin uzunligida nurlanishi tola – optik aloqa tizimlarida keng qo'llaniladi. Shu nuqtai nazardan ham noyob yer elementlarilarning kremniyning elektrofizik xossalariga ta'sirini tadqiqlash kremniy materialshunosligining o'ta dolzarb muammosi hisoblanadi va xarakteristikalarini yaxshilangan yangi materiallar yaratish, shuningdek optoelektronikaning yangi elementlarini olish uchun amaliy ahamiyatga egadir.

Quyidagi magistrlik dissertatsiyasida shu vaqtgacha chop etilgan adabiyotlar sharhi, eksperimentning metodlari va texnologiyasi, tadqiqotlar asosida olingan

natijalar, xulosa, chop etilgan ishlar, chop etilgan ishlar nusxalari va adabiyotlar ro'yhati keltirilgan.

I BOB. ADABIYOTLAR SHARHI.

I.1 Noyob yer elementlari bilan legirlangan kremniyning elektrofizik xossalari

Noyob yer elementlari vakillari gadolinii va samariy akseptor kirishmalar sifatida birinchi marta [7-10] ishlarda o'rganilgan. Kremniyga o'stirish jarayonida kiritilgan ittriy sayoz fnor sath hosil qilishi aniqlangan. Kremniyni gadolinii bilan legirlash esa, akseptor tabiatli markazlarning paydo bo'lishiga sabab bo'lgan. 0,03 dan 1,8 massa foizlarida kiritilgan golmiy elementi namunaning o'tkazuvchanlik turini o'zgarishiga olib kelishi, ammo u kremniydagi kovaklar konsentratsiyasini o'zgartirmasligi Xoll effekti va elektr o'tkazuvchanlik metodlari yordamida aniqlangan. Ushbu holda golmiy bilan bog'liq yangi akseptor chuqur sath $E_v+0,35$ eV paydo bo'lishi kuzatilgan.

Agar [11] ishda qudratli yarimo'tkazgich asboblari uchun qo'llaniladigan kremniyning termik barqarorligi ortishi kuzatilgan bo'lsa, boshqa ishlarda aksincha teskari natijalar olingan.

Masalan, n -kremniyda samariyning xossalarini o'rganish, $Si<Sm>$ namunalarining o'tkazuvchanlik turi va solishtirma qarshiligi samariyning kremniy eritmasiga qo'shilgan miqdoriga mos ravishda o'zgarmagan, shuningdek ushbu ishda yuqori temperaturalarda termik ishlov natijasida kremniyning termik barqarorligi, samariyning mavjud bo'lishiga qaramay yomonlashgan. Bundan tashqari, zaryad tashuvchilar konsentratsiyasining noyob yer elementining miqdoriga bog'liqligi kuzatilmagan.

Shuningdek, noyob yer elementlarining kremniyda elektrik neytralligi kuzatilib, noyob yer elementlarining miqdori τ_{nzt} ga ta'sir qilmagan.

Kremniyni neodim va terbiy bilan ionlar implantatsiyasi yordamida legirlanganda taqiqlangan zonada $E_c-0,29$ eV va $E_c-0,33$ eV donor chuqur sathlarning paydo bo'lishi kuzatilgan.

Balichenko A.A. va boshqalarning [12] ishida kremniyga ionlar implantatsiyasi yordamida kiritilgan *Gd*, *Yb* va *Sm* ning tabiatini tadqiqlashgan va diffuziyaning faollanish energiyasi uchun 4 eV; 4,4 eV va 3,9 eV qiymatlarni mos ravishda *Yb*, *Gd*, va *Sm* uchun aniqlangan. Yuqoridagi barcha elementlar kremniyda akseptor tabiat namoyon qilganligi, ularning elektrik faollanish darajasi namunalarga kiritilgan *Yb*, *Gd* va *Sm* ning umumiy konsentratsiyasining $1 \div 2 \%$ ni tashkil etishi aniqlangan.

Ion implantatsiyasining dozasi ortishi bilan elektrik faol qism sezilarsiz ortgan. Elektron mikroskopik tadqiqotlar lantanoidlarning asosiy qismi pretsipitatlar ko'rinishida kremniyda joylashishi kuzatilgan.

Sobolev va boshqalarning [13,14] ishlarida erbiy va kislorodni kremniyga 1-2 MeV energiyali ionlar implantatsiyasi yordamida olingan tunnel svetodiodlar va *p-n* struktura yoritilgan bo'lib, ushbu strukturalar *p-n* o'tishning teshilish rejimida ishlatilgan. Ushbu teshilishi rejimida erbiyning elektr lyuminessensiyasining intensivligi erbiyning konsentratsiyasiga bog'liq bo'ladi.

Kremniyni erbiy bilan ion implantatsiyasi yordamida legirlashni qo'llanganda 1,54 mkm to'lqin uzunlikli effektiv fotolyuminessensiya olish imkoniyati paydo bo'lishi [15,16] aniqlangan. Ushbu fotolyuminessensiya Er^+ ionlarining parchalangan sathlariaro kristall maydonidagi elektronlarning nurlanishli o'tishlari natijasidir.

[17,18] ishlarda 1-2 MeV energiyali, $1 \cdot 10^{13} \div 3 \cdot 10^{14}$ sm⁻² dozali golmiy, disproziy, erbiy va itterbiy ionlari bilan implantatsiyalangan va $600 \div 900^\circ C$ temperaturalarda 0,5 ÷ 1 soat vaqtlar davomida qizdirib ishlov berilgan kremniyning fotolyuminessensiyasi tadqiqlangan. Elektrik va optik faol markazlarning konsentratsiyasini orttirish uchun kislorod ionlarini qo'shimcha

implantatsiya qilingan. Kremniyga kiritilgan noyob yer elementlari va kislorodning konsentratsiyalari orttirilganda fotoluminessensiyaning intensivligi ortishi ko'rsatilgan.

Energiyasi 1 MeV va dozasi 10^{13} sm^{-2} bo'lgan disproziy va golmiy ionlarining kremniyga implantatsiyasi va $600 \div 900^\circ \text{C}$ temperaturalarda termik ishlov berish natijasida donor markazlar hosil bo'ladi. Ushbu markazlarning konsentratsiyasi boshlang'ich kremniydagi kislorodning konsentratsiyasi yoki qo'shimcha kislorod implantatsiya qilinganda ortadi.

Termik ishlov temperaturasi va Si:Dy va $\text{Si}<\text{Ho}>$ da kislorodning konsentratsiyasiga faollanish koeffitsiyenti va donor markazlarning konsentratsiyaviy taqsimotlarining bog'liq tabiati aniqlangan. Tarkibida lantanoidlar va kirishmalari bo'lgan kamida ikkita donor markazlar hosil bo'lishi mumkin ekanligi kuzatildi.

Erbiy va kislorod ionlari implantatsiyalangan kremniy monokristallari qatlamlariga (KEF va BKEF) termik ishlov berishda donor markazlar hosil bo'lishi matematik modellashtirilgan. Hisoblashlarning ko'rsatishicha, donor markazlarning taglikning chuqurligi bo'yicha konsentratsiyaviy taqsimotiga taglikdagi kislorodning va implantatsiyalangan kislorodning ta'siri, shuningdek $600 \div 900^\circ \text{C}$ diapazondagi termik ishlovda erbiyning donor faollanish koeffitsiyentining o'zaro qoniqarli bog'lanishi ko'rsatilgan.

Nazirov D. E. va boshqalar [19] birinchi marta 70 keV energiyali va dozasi 10^{16} sm^{-2} , ionlar toki 10 mA/sm^2 itterbiy ionlarining kremniyga (KEF-15) implantatsiyasini va ionlar kiritilgandan so'ng hosil bo'lgan nuqsonlarning taqsimoti tadqiqlangan. Kremniyga implantatsiyalangan itterbiy ionlarining taqsimoti radiatsiyaviy buzilishlar taqsimoti bilan mos kelgan. $2R_p$ ($\sim 200 \text{ A}^0$) chuqurlikda konsentratsiyaviy taqsimotning Gauss qonunidan chetlanishi kuzatilgan. Ushbu chuqurliklarda nuqsonlar taqsimoti ham monoton o'zgaradi.

Noyob yer elementlari bilan legirlangan kremniyda fotoo'tkazuvchanlikning anomal tabiati ko'rsatilgan, ya'ni $10^{13} \div 10^{16} \text{ sm}^{-3}$ konsentratsiyalarda kirishmaviy fotoo'tkazuvchanlik kuzatilmagan. Konsentratsiya $> 10^{16} \text{ sm}^{-3}$ bo'lganda fotoo'tkazuvchanlik sakrovchan paydo bo'lgan. Kunduzgi yoritilish yo'qligida, $N_{La*} < 10^{17} \text{ sm}^{-3}$ (fosfor konsentratsiyasi $N_p \sim 1,7 \cdot 10^{13} \text{ sm}^{-3}$) diapazonda namuna solishtirma qarshiligining ortishi kuzatilgan. Solishtirma qarshilikning ortishi va kirishmaviy fotoo'tkazuvchanlikning gadoliniyning kichik konsentratsiyasida paydo bo'lishi kremniyda fosforning ortishida kuzatiladi.

Bir qator ishlarda olingan natijalar kremniyni o'stirish jarayonida kiritilgan *Gd*, *Yb* va *Sm* elektrik nafaol (elektrik neytral) degan fikrni tasdiqlaydi. Kirishmaviy tarkibi bir xil bo'lgan namunalarda lantanoidlarning konsentratsiyasi ortganda zaryad tashuvchilarning Xoll harakatchanligining kamayishi kremniy hajmida noyob yer elementlarning pretsipitatlari mavjudligi bilan tushuntiriladi.

Ma'lumotnoma adabiyotlarning ma'lumotlaridan hamma noyob yer elementlari kimyoviy xossalari bo'yicha bir-biriga yaqinligi va bunday o'xshashlik lantanoidlarning kremniydagi xossalarida ham umumiy holda kuzatiladi. Noyob yer elementlari kremniyda taqsimlanishning koeffitsiyentining kichik qiymatlariga egadir. Bu esa noyob yer elementlari kremniy eritmasi juda yuqori bo'lgan holda eruvchanlikning kichik qiymatlarga ega bo'lishiga olib keladi, natijada kremniy quymaning uzunligi bo'ylab notekis taqsimlanishiga, shuningdek ikkinchi fazadagi birikmalar pretsipitatlar yoki kirishmaviy birikmalarning paydo bo'lishiga olib keladi. Yuqorida sharhlangan adabiyotlarning ko'pchiligida, noyob yer elementlarining pretsipitatlarining o'lchamlari noyob yer elementlarining kremniyda paydo bo'ladigan konsentratsiyalari ortib borishi bilan birga bir necha o'n mikrometrlargacha tashkil etadi, buning natijasida pretsipitatlar kremniyda lokal biki kuchlanishlarning va dislokatsiyalarning paydo bo'lishiga olib keladi.

Gadoliniyning konsentratsiyasi ortishi bilan yig'indi magnitik qabulchanlik bosqichma-bosqich diamagnitiklikdan paramagnitiklik holatga (300 K) o'tishi

aniqlangan. Ushbu hol gadoliniy atomlarining paramagnetizmi bilan bog'liqdir. Magnitik qabulchanlikning sakrashi $N_{\text{Gd}} = 10^{18} \text{ sm}^{-3}$ va $T = 290 \text{ K}$ temperaturada gadoliniyning ferromagnitik aynishi kuzatiladi. Ushbu konsentratsiyalarda gadoliniy atomlarining asosiy qismi kristallda pretsipitatlar ko'rinishida joylashishi mumkin. Gadoliniyning konsentratsiyasi ortganda magnitik qabulchanlikning magnit maydonning kuchlanganligi ortishi bilan kamayishini tushuntirishicha, bunday bog'lanish gadoliniy atomlarining to'plamlari atrofida buzilgan sohalar bilan bog'liq bo'lishi mumkin.

Yarimo'tkazgichlarda radiatsiyaviy nuqsonlar hosil bo'lishini maxsus passivlash, xususan kremniyda kristallga neytral kirishmani kiritish orqali amalga oshiriladi. Ushbu kirishma esa hosil bo'ladigan elektr faol komplekslar tarkibiga kirmaydigan bo'lishi, Frenkel juftini tashkil etuvchilari uchun jamlagich yoki annigilyatsiya markazi sifatida xizmat qilishi kerak. So'nggi yillarda shunday kirishmalar sifatida noyob yer elementlari qo'llanilmoqda. $\text{Si}<\text{Gd}>$ ning elektr xossalari radiatsiyaviy nurlanishga kuchsiz sezuvchanlik aniqlangan va ushbu natijani birlamchi radiatsiyaviy nuqsonlar uchun samarali jamlagich sifatida xizmat qiluvchi gadoliniy atomlarining to'planmalarining radiatsiyaviy nuqtaviy nuqsonlar bilan o'zaro ta'sirlashuvining natijasi sifatida izohlangan. Shuningdek, $\text{Si}<\text{Gd}>$ namunalari rekombinatsiyaviy parametrlarining radiatsiya ta'siriga barqarorligi ko'rsatilgan. Gadoliniy, samariy va erbiy bilan legirlangan kremniyning asosiy elektrofizik parametrlarining radiatsiyaning ta'siriga barqarorligining ortishi ham ko'rsatilgan.

Kremniy va uning asosida yaratilgan asboblarning elektrofizik xossalari va parametrlarining termik nobarqarorligi, odatda, tez diffuziyalanuvchi kirishmalarning to'yingan qattiq eritmalarining parchalanishi va turli shakllardagi termodonorlar hosil bo'lishi bilan bog'laniladigan kislorodning to'yingan qattiq eritmalarining parchalanishi bilan tushuntiriladi. Tez diffuziyalanuvchi kirishmalar va kislorodning to'yingan qattiq eritmalarining parchalanishiga noyob yer

elementlarining sezilarli ta'sir qilishi aniqlangan. Bir qator ishlarda o'zaro qarama-qarshi natijalar olingan: termik barqarorlikning pasayishi kremniyda noyob yer elementlarining mavjudligi bilan bog'langan, boshqa ishlarda esa, aksincha, noyob yer elementlari termik barqarorlikning orishiga olib kelishi aniqlangan. Kuzatilgan termik toblangan (yuqori temperaturadan yuqori tezlikda sovutilgan) namunalarda zaryad tashuvchilarning yuqori harakatchanligini, ya'ni termik nobarqarorlikni, mualliflar bizga tez diffuziyalanuvchi kirishmalarning (*Au*, *Cu*, *Fe* va b.) to'yingan qattiq eritmalarining parchalanishi bilan bog'liq bo'lishi mumkinligi haqida tahmin qilgan. Ushbu fikr adabiyotda mavjud ma'lumotlarga tayanish asosida olg'a surilgan. Ya'ni kremniydagi tez diffuziyalanuvchi kirishmalarning to'yingan qattiq eritmalarining parchalanishining faollanish energiya qiymati aniqlangan faollanish energiyasi qiymatiga yaqindir. Kremniyning termik barqarorligining ortishi esa, tez diffuziyalanuvchi kirishmalar, shuningdek vakansiyalar uchun ham jamlanmalar bo'lishi mumkin bo'lgan, buzilgan sohalar bilan o'ralgan, ikkinchi fazalarning mavjudligi va kremniydagi "fon" kirishmalarning noyob yer elementlari yordamida tozalashi natijasi bo'lishi mumkin.

I.2 Noyob yer elementlari bilan diffuziyaviy legirlangan kremniyning xossalari

Hozirgi vaqtda ham yarimo'tkazgich materiallar va asboblarni tayyorlash texnologiyasida diffuziyaviy legirlash metodi keng qo'llanilmoqda [20-23]. Turli mualliflar tomonidan tadqiqlangan noyob yer elementlarining kremniydagi diffuziyaviy parametrlari, asosan, vakansiyaviy mexanizm bo'yicha diffuziyalanuvchi, davriy sistemaning III guruhining tipik kirishmaviy elementlariga xos ravishdagi qiymatlar sohasida joylashadi.

Ko'plab noyob yer elemenlari uchun ΔE – diffuziyaning faollanish energiyasi qiymatlari 4 eV tartibidagi qiymatni tashkil etadi. Ushbu qiymatlar esa, aynan davriy sistemaning III guruh elementlariga xosdir.

Kremniyda noyob yer elemenlari: terbiy va gadolinii uchun diffuziyaviy ma'lumotlarning qarama-qarshiligi [24-26] ishlarda aniqlangan. Ushbu elementlar uchun diffuziya koeffitsiyentlari qiymatlari orasidagi farqlar [24] ishda olingani bilan [25,26] ishlarda olinganlari bilan qiymatlarning o'n to'rtinchi darajasigacha yetadi. Ushbu elementlar uchun diffuziyaning faollanish energiyalari qiymatlari ham qarama-qarshidir.

Masalan, terbiy uchun [24] bo'yicha $\Delta E = 9,03$ eV, [26] bo'yicha esa $\Delta E = 4,0$ eV, gadolinii uchun [24] bo'yicha $\Delta E = 8,62$ eV ga teng, [9] bo'yicha esa $\Delta E = 4,3$ eV ga teng. Itterbiyning kremniydagi diffuziyaviy qiymatlari, kremniydagi gadolinii va terbiyning diffuziyasi bo'yicha natijalar [24] esa umuman ishonchsizdir.

[24] ishning ma'lumotlari bo'yicha lantanoidlar orasida erbiy elementi kremniyda eng sekin diffuziyanadi, ammo diffuziyaning faollanish energiyasi $\Delta E = 4,96$ eV qiymatga egadir. Ushbu qiymatni esa ko'payib ketgan deb hisoblash maqsadga muvofiq. [24] ishda olingan boshqa natijalarning ishonchsizligini hisobga olgan holda gadolinii, terbiy, erbiy va tulii uchun ma'lumotlar jiddiy shubha uyg'otishi tabiiydir.

Nazirov D.E. va boshqalar [27-34] tomonidan kremniyda skandiy, prazeodim, prometi, erbiy, evropii, itterbiy, terbiy, samariy va gadoliniylarning diffuziyasi birinchi marta nishonlangan atomlar metodi yordamida tadqiqlangan va ushbu kirishmalarning kremniydagi diffuziyaviy parametrlari davriy sistemaning III guruhi elementlariga xos bo'lgan parametrlarga yaqindir.

Avtoradiografiya yordamida kremniy sirtiga purkalgan noyob yer elemenlari tez diffuziyanivchi kirishmalarning getteri sifatida namoyon bo'lishi aniqlandi. Olingan natijalar asosida, ushbu noyob yer elemenlari kremniyda kristall

panjaraning tugunlari bo'yicha diffuziyalanishi haqida xulosa qilindi. Shuningdek, [35-39] ishlarda Zaynabidinov S. va boshqalar elektrik metodlar yordamida erbiy, skandiy, prazeodim va b. noyob yer elementlarining kremniydagi diffuziyasi tadqiqlangan. Olingan diffuziyaviy natijalar nishonlangan atomlar metodi yordamida olinganlari bilan mos kelgan. Tadqiqlangan noyob yer elementlari kremniyning sirtida akseptor xossalar namoyon qilishi kuzatilgan.

Elektrik usul yordamida birinchi marta lantanning kremniydagi diffuziyasi [39] ishda tadqiqlangan. Ushbu tadqiqotlarning natijalari lantanning kremniyda vakansiyaviy diffuziyalanish mexanizmi va lantanning kremniydagi sayoz akseptorlik xossasini tasdiqlaydi.

Ageyev V. V. va boshqalar [24] ishda *Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er* va *Tm* larning kremniydagi diffuziyasi o'rganilgan va *n*-kremniyning sirtida *p*-tur o'tkazuvchanlik hosil bo'lishi ko'rsatilgan. Xuddi shunday natijalar lantan, prazeodim, disproziy va itterbiy uchun *n-Si* da [40] ishda olingan.

(*Er* va *Tb*) kichik guruhlar chegarasida faollanish energiyasining (ΔE) va D_0 ko'rsatkichning qiymatlari lantanoidlarning tartib raqami ortishi bilan ko'payishi kuzatilgan. Olingan natijalarni mualliflar tomonidan lantanoidlarning qisilishi, ya'ni ularning tartib raqami ortishi bilan elementlarning ion radiuslarining kamayishi bilan tushuntiriladi.

Tseriy, gadoliniy va itterbiyning bor elementi bilan hamkorlikdagi (birgalikdagi) diffuziyasi kremniyda [41,42] ishlarda tadqiqlangan. Birgalikda diffuziya natijasida noyob yer elementlarining va borning o'zaro ta'sirlashuvi mavjudligi va noyob yer elementlarining diffuziya koeffitsiyentlarining kamayishi kuzatilgan. [25] ishda gadoliniyning kremniydagi diffuziya koeffitsiyenti diffuziya jarayonida hosil bo'lgan diffuziyaviy *p-n* o'tishning chuqurligi bo'yicha olingan solishtirma qarshilikning taqsimoti bo'yicha aniqlangan. Masalan, $T = 1200^{\circ}\text{C}$ temperatura uchun $D = 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ sm}^2/\text{s}$ ekanligi ko'rsatilgan.

Diffuziya manbaining tarkibiga noyob yer elementlarining diffuziya ko'rsatkichlarining kuchli bog'lanishi va namunalarning sirtida p -tur o'tkazuvchanlikli qatlamlarni hosil bo'lishi ko'rsatilgan.

Terbiy va golmiyning n -tur kremniyda diffuziyasi jarayonida kirishmalarning konsentratsiyaviy taqsimotlarida kuchli cho'zuvchi biki kuchlanishlarning mavjudligi mualliflar tahminicha [26] ishda ko'rsatilgan. Boshlang'ich namunalarda dislokatsiyalarning zichligi $10^4 \div 10^5 \text{ sm}^{-2}$ bo'lgan. Shu bilan birga terbiy va gadolinyning kremniydagi diffuziyasining asosiy parametrlari (D ; ΔE) ushbu kirishmalarning diffuziya mexanizmlari vakansiyalar bo'yicha migratsiya ekanligi haqida guvohlik bergan.

Avtoradiografiya yordamida tadqiqotlar natijalari terbiy va golmiyning kremniyda ayniqsa, chekka sohalarida ko'plab to'planishlari mavjudligini, dislokatsiyalar zichligi bilan yangi fazalar donachalar taxminan terbiy va golmiylarning zichligi bilan o'zaro yaxshi bog'lanishda ekanligi ko'rsatilgan.

[35-40] ishlarga asosan lantan, prazeodim, disproziy va itterbiy kabi noyob yer elementlarining n -kremniydagi diffuziya jarayonida namunalar sirtida p -tur o'tkazuvchanlikli qatlam hosil bo'lishini ko'rsatdi.

Xuddi shunday natijalar boshqa mualliflarning ishlarida, masalan yevropiy, gadoliny, disproziy va itterbiy, yevropiy, gadoliny, terbiy, disproziy, golmiy va tuliy, shuningdek [24] ishda – tuliy va itterbiyning diffuziyasida, ya'ni hamma holatlarda namunalarning sirtida p -tur o'tkazuvchanlik kuzatilgan.

Umuman boshqa natija itterbiyning kremniydagi diffuziya jarayonida olingan. Ushbu ishlarning natijalari natijasida itterbiyning kremniydagi chuqur donor kirishma sifatida tez diffuziyalanuvchi kirishmalarga xos diffuziyaviy ko'rsatkichlari aniqlangan.

Diffuziyaviy kiritish jarayonida noyob yer elementlari (yevropiy, gadoliny va terbiy) bilan legirlangan kremniyning qatlamlarida noasosiy zaryad

tashuvchilarning yashash vaqtlari (τ_{nzt}) namunaning hajmidagiga nisbatan 4÷6 marta ortishi kuzatilgan [24].

Kremniyga itterbiy kiritilganda τ_{nzt} deyarli o'zgarmagan. Zaryad tashuvchilarning harakatchanligi (μ) xuddi shunday konsentratsiyali bor kirishmalari bilan legirlangan qatlamlarda nisbatan itterbiy bilan legirlangan qatlamlarda yuqori, tuliy bilan legirlangan qatlamlarga nisbatan esa past qiymatlarga ega bo'lgan. Harakatchanlikning past qiymatlari ushbu qatlamlarda strukturaviy buzilishlarning mavjudligini ko'rsatadi [41,42].

1.3. Adabiyotlar sharhi bo'yicha xulosalar.

Dissertatsiyaning maqsadi va vazifalari

Yuqorida bayon qilingan adabiyotlar sharhi asosida quyidagicha xulosalar qilish mumkin:

1. Legirlash turiga bog'liq ravishda noyob yer elemenlari kremniyda turli xossalarni namoyon qiladi.

2. O'stirish jarayonida monokristallda noyob yer elementlarining yakka atomlari qatorida La_nSi_m turdagi ikkinchi fazadagi shuningdek noyob yer elementlarining ko'p atomli klasterlari hosil bo'ladi va ularning hajmlari va miqdorlari lantanoidlarning kremniydagi konsentratsiyalariga bog'liq.

3. Termik ishlovlar jarayonida va legirlash darajasiga bog'liq ravishda, o'stirilgan kristallarda lantanoidlar fon kirishmalar bilan faol o'zaro ta'sirlashadi. Noyob yer elementlari kremniyning termik barqarorligiga ta'sir ko'rsatadi: ba'zan yaxshilaydi, ba'zan esa yomonlashtiradi.

4. O'stirish jarayonida kremniyga kiritilgan lantanoidlar ko'p holatlarda elektrik jihatdan nefaol (neytral) bo'ladi.

5. Diffuziya usulida kremniyga kiritilgan noyob yer elementlari hamma vaqt o'zining faolligini ko'rsatadi.

Dissertatsiyaning maqsadi va vazifalari

Ushbu ishning maqsadi: noyob yer elementi itterbiyning kremniyga ion implantatsiyasini, itterbiyning va implantatsiyadan so'ng nuqsonlarning kremniydagi taqsimotini, termik ishlovlar jarayonida ularning qayta taqsimlanishini va ularning kremniyning elektrofizik xossalariga ta'sirini tadqiqlash.

Asosiy vazifalar quyidagilardan iborat:

- Itterbiy ionlarining taqsimoti profilini olish, termik ishlovlar jarayonida ularning qayta taqsimlanishini va implantatsiyalangan itterbiy ionlarining diffuziyasini o'rganish;
- Itterbiy ionlarining implantatsiyadan so'ng nuqsonlar taqsimoti profilini olish, termik ishlovlar jarayonida ularning qayta taqsimlanishini o'rganish;
- Kremniydagi termik nuqsonlarning hosil bo'lish mexanizmiga itterbiyning ta'sirini samaradorligini tadqiqlash.

Tadqiqotning ob'yekti, predmeti va metodlari:

Tadqiqotning ob'yekti: Kremniy monokristali: KEF - $10 \div 20 \text{ Om} \cdot \text{sm}$ va KDB - $10 \div 20 \text{ Om} \cdot \text{sm}$ Choxralskiy metodi bilan o'stirishda legirlangan kremniy; diffuziya va ion implantatsiya usuli yordamida itterbiy bilan legirlangan kremniy.

Tadqiqotning predmeti: noyob yer elementi itterbiyning diffuziya mexanizmi, qonuniyatlari va ularning kremniyning elektrofizik xossalariga ta'sirining samaradorligi oxirigacha o'rganilmaganligidir. Ushbu yo'nalishda

tadqiqotlarning rivojlanishi noyob yer elementlarining kremniydagi fizikaviy jarayonlardagi o'rnini va ahamiyatini aniqlash imkoniyatini yaratadi.

Tadqiqot metodlari: yuqorida qo'yilgan vazifalarni bajarishda quyidagilardan foydalanildi: Xoll effekti; solishtirma qarshilikni aniqlashning to'rt zondli usuli; noasosiy zaryad tashuvchilarni aniqlash metodi; UB (ultra binafsha) qaytish metodi; nishonlangan atomlar va neytron aktivatsion analiz.

Asosiy natijalar:

1. Noyob yer elementi Itterbiyning kremniydagi aniqlangan diffuziyaviy parametrlari Mendeleyev davriy sistemasining klassik III guruh elementlariga xos bo'lgan qiymatlari oralig'ida joylashadi.

2. Itterbiy bilan ion implantatsiyalangan kremniy qatlamlarini termik ishlov berishning samarali rejimi ($400^{\circ}\text{C} + 800^{\circ}\text{C}$, qizdirish vaqti $t = 30$ minutdan iborat, har bir temperaturada) va ushbu rejimda qoldiq nuqsonlar qiymatining eng kichikligi va chuqurlik bo'yicha bir tekis joylashishi.

3. Itterbiy bilan legirlangan n -tur kremniyda yuqori temperaturaviy nuqsonlarni kamaytirish imkoniyatining ham hajmda joylashgan, ham kremniy sirtiga surtilgan oltinning itterbiy yordamida, termik ishlovdan so'ng kremniy namunasi sirtiga o'tkazilgan itterbiy mavjudligida, samarali getterlanishini ekspremental aniqlanishi.

Ushbu magistrlik dissertatsiyasining yangiligi quyidagilardan iborat:

– Noyob yer elementi Itterbiy bilan kremniyning qatlamlaridagi zaryad tashuvchilar harakatchanligi qiymatlari, zaryar tashuvchilarning taqsimoti, qizdirish muhitining itterbiyning diffuziyaviy parametrlariga deyarli ta'sir etmasligi ko'rsatildi;

– Itterbiy ionlari bilan legirlangan kremniydagi implantatsiyadan so'ng eng kichik nuqsonlar taqsimotini olish imkonini beruvchi termik ishlov rejimini aniqlanishi;

Tadqiqotning ilmiy va amaliy ahamiyati:

Ushbu magistrlik dissertatsiyasining natijalari yarimo'tkazgich materiallar va asboblarni ishlab chiqarish texnologiyasini takomillashtirish uchun, shuningdek kremniy va uning asosida yaratilgan asboblarning termik barqarorligi muammolarini yechish uchun qo'llanishi mumkin.

Chop etilgan ishlar.

Magistrlik dissertatsiyasining asosiy natijalari ilmiy ishlar sifatida respublika ilmiy amaliy anjumanlari to'plamlari va «O'zMU xabarlari» ilmiy jurnalida chop etildi.

Ishning strukturasi va hajmi.

Magistrlik dissertatsiyasi kirish, uchta bob, xulosa va foydalanilgan adabiyotlar ro'yhatidan iborat. Ish bet kompyuter matni, rasm, jadval va ta foydalanilgan adabiyotlar ro'yxatini o'z ichiga oladi.

**Magistrlik dissertatsiyasining asosiy natijalari quyidagi ishlarda
chop etilgan:**

1. Бобохужаев К.У., Базарбаев М.И., Назыров Д.Э., **Солиев А.З.** Взаимодействие редкоземельных элементов с кислородом в кремнии. Материалы республиканской научно-технической конференции. Нукус, 23-24 ноября 2011 г. С.151-153.
2. Бобохужаев К.У., Комилов М.М., **Солиев А.З.** Свойства кремния, ионноимплантированного иттербием. “Физика фанининг бугунги ривожига истеъдодли ёшларнинг ўрни”. Ёш олимлар ва иқтидорли талабалар илмий анжумани материаллари. Т., 27-28 апрель 2012 йил. 174-179 бетлар.
3. Бобохужаев К.У., Атаханова Ш., Базарбаев М.И., Ёкуббоев А.А., **Солиев А.З.**, Назыров Д.Э. Влияние термических обработок на свойства кремния, легированного редкоземельными элементами “Физика фанининг ривожига истеъдодли ёшларнинг ўрни” республика илмий-амалий конференцияси (РИАК-6) материаллари. Т., 2013 йил, 26-27 апрель. 88-90 бетлар.
4. Зайнабидинов С., Назыров Д.Э., Хамиджонов И.Х., Бобохужаев К.У., **Солиев А.З.**, Гончаров С.А., Суворов А.В. Изучение профиля распределения степени разупорядоченности ионноимплантированного иттербием слоя кремния. Т. «ЎзМУ хабарлари. Вестник НУУз. АСТА NUUZ». № 2/1. С. 82-85. 2013.

II BOB. NAMUNALARNI LEGIRLASH VA TADQIQOT METODLARI.

II.1 Kremniyni legirlash texnologiyasi

Ushbu magistrlik dissertatsiyasida noyob yer elementlari bilan legirlangan kremniy namunalari tadqiqlangan. Ushbu holatlarda kremniyning o'stirish va diffuziyaviy legirlash jarayonlarida olingan namunalari ishlatilgan. Nazorat namunasi sifatida esa KEF-15, ya'ni solishtirma qarshiligi $15 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$ va Choxralskiy usulida o'stirish jarayonida fosfor bilan legirlangan, $n\text{-Si}$ (n -tur o'tkazuvchanlikli kremniy) kristallari ishlatildi. Neytron-aktivatsion metod yordamida legirlangan kremniy namunalaridagi noyob yer elementining konsentratsiyasi aniqlandi va uning konsentratsiyasi (Yb) $N \approx 5 \cdot 10^{17} \div 5 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ekan.

Nazorat namunalari sifatida solishtirma qarshiligi noyob yer elementi bilan legirlangan kremniyning solishtirma qarshiligiga mos bo'lgan n - yoki $p\text{-Si}$ namunalari ishlatildi. Diffuzant sifatida tanlangan noyob yer elementi (Yb) namuna sirtiga vakuumda purkash yoki surtish, shuningdek legirlangandan so'ng, termik ishlov berishdan oldin, namunalar mikoporoshoklarda mexanik shlifovkalandi va kimyoviy sayqallandi. Kimyoviy eritmaning tarkibi quyidagicha tanlandi: $1\text{HF}:3\text{HNO}_3+6\text{CH}_2\text{OOH}_5$. Kimyoviy sayqallashdan so'ng, namunalar distillangan suvda chayib yuvildi.

Noyob yer elementi bilan diffuziyaviy legirlash uchun Choxralskiy usuli bilan o'stirilgan n -tur yoki p -tur va solishtirma qarshiliklari $10 \div 20 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$ bo'lgan kremniy namunalari ishlatildi. Namunalarning qalinligi $0.35 \div 1.0 \text{ mm}$, shakli parallelopiped, o'lchamlari: $S \sim 1.5 \text{ cm}^2$ sifatida tanlandi. Diffuziya jarayoni namunalar sirtiga noyob yer elementi xloridining spirtli eritmasi yoki vakuumda

purkalgan noyob yer elementi itterbiyning yupqa pardalarini o'tkazilib, havoda quritilgach termik diffuziyaviy qizdirish orqali amalga oshirildi.

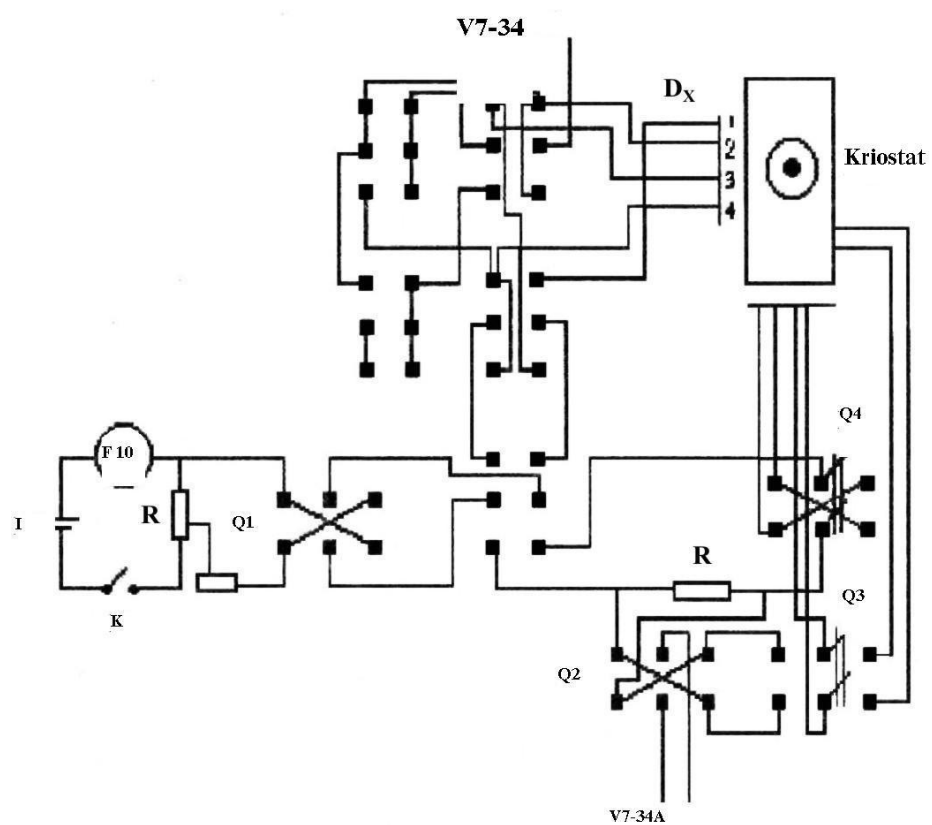
Diffuziya ochiq havoda va vakuum sharoitida (havosi 10^{-5} mm sim. ust. gacha so'rib olingan, ikki tomoni kavsharlangan ampulalarda), $1100 \div 1200^{\circ}\text{C}$ terperaturalarda "Suol" pechkasida 5 soat davomida amalga oshirildi.

Diffuziyadan so'ng namunalar ketma-ket va ko'p karra kislotalarda va distillangan suvlarda yuvildi.

II.2 Experimental tadqiqlash metodlari

Kiritilgan noyob yer elementi ytterbiy kirishmasining diffuziyaviy qatlamining va o'stirish jarayonida noyob yer elementi itterbiy bilan legirlangan kremniy namunasining elektrofizik xossalarini tadqiqlash maxsus qurilmada bajarildi. Ushbu qurilmaning blok-sxemasi 2.1-rasmda ko'rsatilgan. Ushbu qurilma yordamida qayta ulashlar orqali, bir vaqtning o'zida sirtiy va hajmiy elektrofizik parametrlarni: Xoll doimiysini va harakatchanlikni 77-300 K terperaturalar oralig'ida aniqlash mumkin. Namunalarning solishtirma qarshiliklari va o'tkazuvchanlik turini aniqlashlar solishtirma qarshilikni o'lchashning to'rt zondli usuli va termozond yordamida amalga oshirildi.

Solishtirma qarshilik va zaryad tashuvchilar konsentratsiyasining taqsimot profili to'rt zondli metod va Xoll effekti metodi yordamida, yupqa qatlamlarni kimyoviy yedirish – seksionirlash metodi bilan ($1HF : 50HNO_3$ eritmasida) aniqlandi. Ushbu holda olingan qatlamlarning qiymatlari namunalarni VLR-20 analitik tarozida tortish orqali aniqlandi. Olingan qalinliklar odatda $0,05 \div 0,5$ mm ni tashkil etadi. O'lchashlar namunalar sirtining bir necha nuqtalarida ($8 \div 10$) bajarildi. O'lchashlarning natijasiga asosan diffuziyadan so'ng noyob yer elementi itterbiy kirishmasining namunaning sirtiy kesimi bo'ylab bir tekis taqsimoti aniqlandi.



2.1-rasm. O'lchash qurilmasining blok-sxemasi.

Xoll ko'effitsiyentini aniqlash namunaning sirtiga perpendikulyar (tik) yo'naltirilgan $\vec{B}$ magnit maydon induksiyasi yo'naltirilgan sharoitda juft kontaktlar (2.2 - rasm) orasidagi $\Delta U_{2,4}$ kuchlanishning o'zgarishlari va ikki qarama-qarshi kontaktlar orqali $\vec{J}_{1,3}$ tok o'tkazish yordamida amalga oshirildi.

Harakatchanlik $\mu(x)$ va zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi $\rho(x)$ Xoll effekti yordamida quyidagi ifodalar [113] orqali aniqlandi:

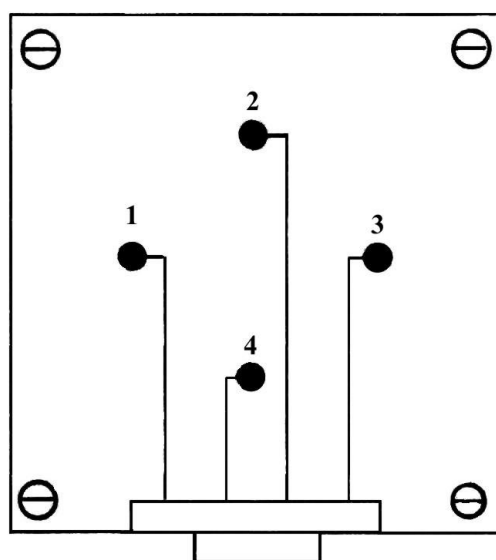
$$\frac{\frac{d}{dx}(R_s \cdot \sigma_s^2)}{\frac{d\sigma_s}{dx}} = \mu(x) \quad (1)$$

$$\rho(x) = \frac{1}{e} \frac{\left(\frac{d\sigma_s}{dx}\right)^2}{\frac{d}{dx}(R_s \sigma_s^2)} \quad (2)$$

bu yerda, R_s - o'lchanadigan (effektiv) sirtiy Xoll ko'effitsiyenti, σ_s - sirtiy o'tkazuvchanlik, e - elektron zaryadi.

2.3. Eksperimentning aniqligi va xatoliklarni baholash

Diffuziya ko'effitsiyentini o'lchashlarning statistik xatoliklari eksperimental kataliklarni - olingan qatlamning qalinligiga, vaqtga, shuningdek, qatlamning elektr parametrlarini aniqlashga bog'liq bo'ldi, shuningdek sistematik xatoliklar ko'p hollarda eksperimentning real holatlariga va ularda qo'llanilgan chegaraviy sharoitlar va kirishmaning migrasiyasining modellariga bog'liq bo'ldi. Tahlilning ko'rsatishicha, diffuziya ko'effitsiyentini aniqlashdagi statistik xatoliklar, bizning eksperimentlarda $\sim 10 \text{ } 20 \%$ kattalikni tashkil etdi.



2.2 – расм. Холл контактлари (1, 2, 3, 4).

$\lg D = f(1/T)$ boganishlardan hisoblanadigan ΔE va D_0 diffuziyaviy parametrlar xatoligi odatda 10 % dan ortmadi.

Sig'imning izotermik relaksasiyasi metodi yordamida ΔE_i chuqur sathni aniqlashdagi xatolik temperaturaning farqi o'zining 1 K qiymatidan T ga chetlashganda, ΔE_i xatolik 0,03 eV ni tashkil etadi.

Namunalarning elektr parametrlarini aniqlashdagi xatoliklar - solishtirma qarshilik, elektr ytkazuvchanlik va h.k., ruhsatlangan xatolik namunalarning o'lchamlarini aniqlashdagi va qo'llaniladigan asboblarning sistematik xatoliklariga bog'liq bo'ldi. Namunalarning o'lchamlari aniqligi 10^{-2} mm bo'lgan mikrometrlar yordamida aniqlandi va namunaning uch yo'nalishdagi parametrlarini o'lchashdaga nisbiy xatolik 3 % dan ortmadi. $10^{-2} - 10^{-9}$ A intervaldagi tok kattaligini o'lchash uchun ko'rsatilgan intervalda o'lchash aniqligi 1 % gacha bo'lgan ampervoltommetr qo'llanildi.

O'lchashlarda 1-3 % xatolikli davlat etalon qarshiliklari qo'llanildi. Magnit maydon kuchlanganligini aniqlashda xatoligi 1% dan ortmaydigan IMI-3 asbobiga o'rnatilgan standart Xoll datchigidan foydalanildi. Shuningdek, namunalar parametrlarini ko'plab marta va 7-9 namunalarda o'lchashlar va tadqiqlashlar orqali umumiy xatoliklarni 5 - 7 % dan ortmaydigan holatga keltirildi.

III BOB. KREMNIYNING ELEKTROFIZIK XOSSALARIGA NOYOB YER ELEMENTI ITTERBIYNING ION IMPLANTATSIYASINING TA`SIRINI O`RGANISH.

3.1. Noyob yer elementi itterbiy bilan diffuziyaviy legirlangan kremniyning elektrofizik xossalari

Adabiyotlar sharxining ko'rsatishicha noyob yer elementlarining vakili – itterbiy elementining [9-14,24,33,41,43] ishlarda elektr o'tkazuvchanlik metodining to'rt zondli usul yordamida namuna qatlamlarining solishtirma qarshiligini aniqlash usuli va Xoll effekti yordamida kremniydagi elektrofizik xossalari o'rganilgan. [9-13,33] ishlarda elektr o'tkazuvchanlik metodi yordamida itterbiyning kremniydagi faollanish energiyasining qiymati $\Delta E = 4,8$ eV ekanligi aniqlangan. Mualliflar tomonidan o'rganilgan temperaturalar intervalida o'rganilgan itterbiyning kremniydagi diffuziya koeffitsiyentlari Davriy sistema elementlari – klassik texnologik kirishmalari (*B, Al, Ga, In* va *Tl*) kabi xos bo'lgan qiymatlarga yaqinligi ko'rsatilgan.

Ammo, itterbiyning kremniydagi diffuziya koeffitsiyenti qiymatlarini qoldiq solishtirma qarshilikning taqsimoti orqali topilishi unchalik ham yuqori ilmiylik nuqtai nazaridan yetarli emasdir. Shuning uchun, ushbu maqsadlarda atomlar konsentratsiyasining taqsimotidan yoki zaryad tashuvchilar taqsimotidan foydalanish ilmiylik maqsadiga muvofiqdir. Zaryad tashuvchilarning taqsimotini olish uchun esa, zaryad tashuvchilar harakatchanligining taqsimotini Xoll effekti yordamida aniqlash lozimdir. Ammo bu haqida bajarilgan va rejalashtirilgan ishlar adabiyotlarda deyarli kuzatilmaydi. Masalan, [12-14,43] ishlarda hech qanday fizik asoslarsiz va tasdiqlarsiz diffuziya yordamida itterbiy bilan legirlangan kremniy asosida olingan strukturalar fotosig'im metodi yordamida tadqiqlangan zonada hech qanday isbotlarsiz itterbiy kremniyda chuqur sath hosil qiladi va itterbiy

kremniyda tez diffuziyalanuvchi kirishmalar (*Fe, Ni, Mn, Co*) kabi tez diffuziyalanadi, deb hisoblangan.

Yuqoridagilar asosida ushbu ishda itterbiyni diffuziyaviy usul bilan legirlash, itterbiyning kremniydagi diffuziyasini, eruvchanligini, shuningdek kremniyning elektrofizik xossalariga itterbiyning ta'sirini aniqlash bo'yicha tadqiqotlar bajarilgan.

Diffuziya manbai KEF-15 yoki KDB-15 markali kremniy sirtiga metall itterbiyni (tozaligi 0,9999) vakumda purkash yoki itterbiy xloridi kimyoviy eritmasining qatlamini sirtga surtish va havoda quritish yo'li bilan amalga oshirilgan. KEF-15 va KDB-15 namunalarning parametrlari: $\rho = 150 \text{ m} \cdot \text{sm}$, yuzasi $\sim 1,5 \text{ sm}^2$, qalinligi $\sim 380 \text{ mkm}$ bo'lgan.

Diffuziya jarayoni $1100\text{--}1250^\circ\text{C}$ temperaturalar intervalida havoda yoki vakuumlashtirilgan ($\sim 10^{-5} \text{ mm sim. ust.}$) ampulalarda amalga oshirilgan. Diffuziyaviy qizdirish jarayoni 1 soatdan 48 soatgacha, diffuziya temperaturasi va diffuziya sharoitiga bog'liq ravishda, mos ravishda tanlangan.

Diffuziyadan so'ng namunalar sirti kimyoviy yuvishlar (*HF, H₂O₂ + HCl* eritmalarida) natijasida oksid qatlami va diffuziya manbaining ortib qolgan sirti qismidan tozalangan, so'ngra elektrik o'lchashlar bajarilgan. Elektrik o'lchashlar namunalar sirti markazida va boshqa nuqtalarida bajarilgan. Diffuziyalangan kirishma namunaning radial kesimi bo'yicha bir tekisda taqsimlanganligi va ikkinchi fazali kirishmalar mavjud emasligi kuzatilgan.

Itterbiyning kremniydagi diffuziyaviy parametrlarini aniqlash uchun itterbiyning kremniydagi konsentratsiyasining $c(x)$ profili – taqsimotini bilish zarur. U esa, elektr o'tkazuvchanlikni va Xoll effektini aniqlash yordamida elektrik o'lchashlar bajarish yordamidagina aniqlanadi. Ushbu holda itterbiy kremniyda to'la ionlashgan deb hisoblaymiz, ya'ni itterbiyning konsentratsiyasi $c(x)$ zaryad tashuvchilar konsentratsiyasiga teng deb hisolablaymiz:

$$\rho(x): \quad c(x) = \rho(x).$$

Ushbu holda zaryad tashuvchilar harakatchanligi - $\mu(x)$ (3.1-rasm) va zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi - $\rho(x)$ (3.2-rasm) quyidagi ifodalar yordamida aniqlanadi:

$$\mu(x) = \frac{\frac{d}{dx}(R_s \cdot \sigma_s^2)}{\frac{d\sigma_s}{dx}} \quad (1)$$

$$\rho(x) = \frac{1}{e} \frac{\left(\frac{d\sigma_s}{dx}\right)^2}{\frac{d}{dx}(R_s \sigma_s^2)} \quad (2)$$

$\rho(x)$ bog'lanishlar yordamida hisoblangan itterbiyning kremniydagi diffuziya koeffitsiyentlari 1 - jadval $3 \cdot 10^{-13}$ (1100°C da) dan $4 \cdot 10^{-12} \text{sm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ (1250°C da) gacha ortishi aniqlandi. Itterbiyning kremniydagi diffuziya koeffitsiyentining temperaturaviy bog'lanishi (3.3-rasm) Arrenius qonuni – harakteriga mos keladi va uni quyidagicha yozish mumkin:

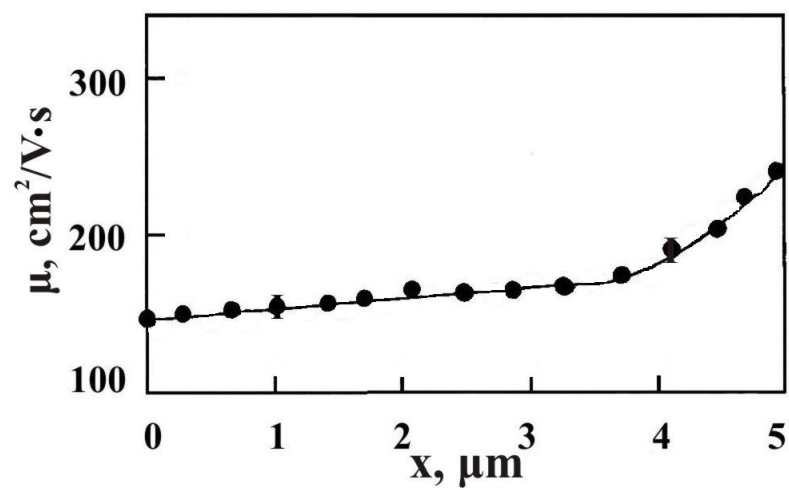
$$D = 3 \cdot 10^{-3} \cdot \exp\left[-\frac{3,0\text{eV}}{kT}\right] \text{sm}^2 \cdot \text{s}^{-1} \quad (1100 - 1250^\circ\text{C})$$

Tajribalar itterbiy kremniyda boshqa III guruh elementlari va qator lantanoidlar kabi akseptor tabiatni namoyon qilishini ko'rsatdi. Xoll koeffitsiyentining temperaturaviy bog'lanishidan taqiqlangan zonada qandaydir chuqur sathlarning paydo bo'lishi kuzatilmadi. Tadqiqotlar jarayonida biz tomondan tadqiqlangan va legirlangan namunalardan tashqari p -tur (KDB-15) va n -tur (KEF-15) nazorat namunalari ham ishlatildi va har bir o'lchash diffuziyaviy legirlash temperaturalarda ular ham (itterbiy kirishmasiz) aynan shu temperaturalarda va vaqtlar davomida termik qizdirildi, ular ustida elektrik

3.1-jadval.

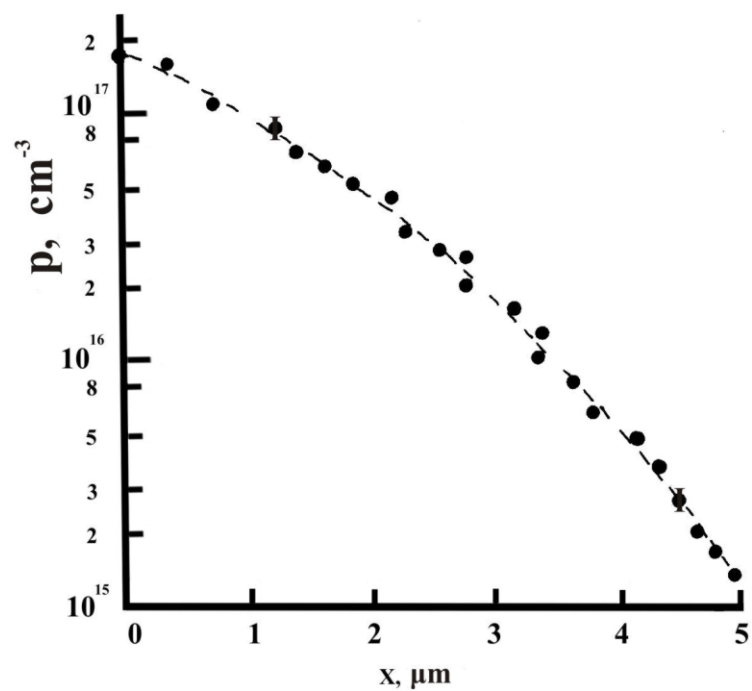
Noyob yer elementlarining kremnidagi diffuziyaviy parametrlari

№	Element nomi	ΔE , eV	D , $\text{sm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, 1250°C da	* Tadqiqot metodlari	Adabiyot manbai
70	Itterbiy	3,5	$\sim 10^{-13}$	1	9
		0,98	$\sim 10^{-8} \div 10^{-6}$	1, 3	12-14, 43
		4,5	$\sim 10^{-13}$	1	10
		4	$\sim 10^{-13}$	1	11
		-	$\sim 10^{-14} \div 10^{-13}$	1, 2	38
		3	$\sim 10^{-13}$	4	99
		3	$\sim 10^{-13}$	1, 2	44-49
39	Ittriy	3	$\sim 10^{-13}$	1, 2	8, 50
		-	$\sim 10^{-8} \div 10^{-6}$	1	45
		3	$\sim 10^{-13}$	1, 2	45, 51
62	Samariy	1,98	$\sim 10^{-9}$	1, 2	12, 45
		3	$\sim 10^{-13}$	1, 2	8, 44
		-	$\sim 10^{-8} \div 10^{-6}$	1	18
		4	$\sim 10^{-13}$	1	11
		4,5	$\sim 10^{-13}$	1	10
		3	$\sim 10^{-13}$	1, 2, 4	44
62	Gadoliniiy	3	$\sim 10^{-13}$	1, 2	8
		4	$\sim 10^{-13}$	1	9
		4,5	$\sim 10^{-13}$	1	10
		4	$\sim 10^{-13}$	1	11
		8	$\sim 10^{-27}$	1	16
		-	$\sim 10^{-12}$	1	17
		-	$\sim 10^{-8} \div 10^{-6}$	1	18
		11	$\sim 10^{-17}$	1	52
		-	$\sim 10^{-13}$	1	41, 42
		3	$\sim 10^{-13}$	1, 2, 4	47



3.1- rasm. Si<Yb> da zaryad tashuvchilar harakatchanligining nfqsimoti.

$T = 1150^{\circ}\text{C}$, $t = 10\text{ h}$.



3.2-rasm. Si< Yb> da zaryad tashuvchilar konsentratsiyasining taqsimoti profili.

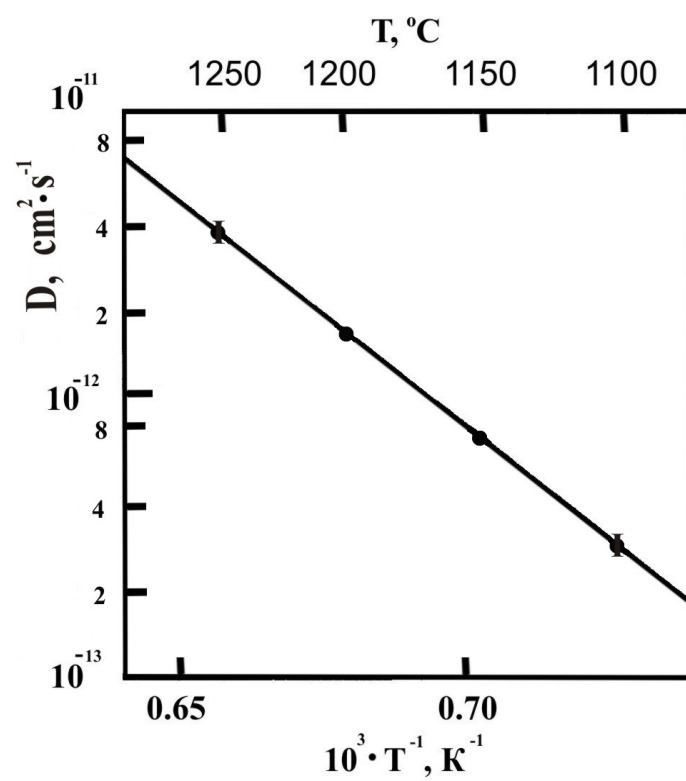
Vakuumda diffuziyaviy qizdirish $\sim 10^{-5}$ mm simob. ustuni. $T = 1200^{\circ}\text{C}$, $t = 5$ h.

Nuqtalar – experiment, tutash chiziq – nazariy egri chiziq.

3.2 – jadval.

Itterbiyning kremniydagi diffuziya koeffitsiyentlari

Diffuziya temperaturasi, $^{\circ}\text{C}$	Itterbiyning kremniydagi diffuziya koeffitsiyenti, $D_{Yb}, \text{sm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
1100	$3 \cdot 10^{-13}$
1150	$7,2 \cdot 10^{-13}$
1200	$1,6 \cdot 10^{-12}$
1250	$4 \cdot 10^{-12}$



3.3-rasm. Itterbiyning kremniydagi diffuziya koeffitsiyentining temperaturaviy bo'lanishi.

o'lchashlar bajarildi. Ushbu holatlarda yuqoridagi nazorat namunalarida o'tkazuvchanlik turining o'zgarishi kuzatilmadi.

Itterbiy bilan diffuziyaviy legirlangan kremniydagi zaryad tashuvchilar konsentratsiyasining, shuningdek itterbiy atomlarining taqsimoti quyidagicha yozilishi mumkin:

$$c = 2 \cdot 10^{17} \cdot \operatorname{erfc}\left(x / 2\sqrt{Dt}\right), \text{ sm}^{-3}$$

Olingan natijalarning tahlili quyidagilarni ko'rsatdi:

1. Itterbiyning kremniydagi diffuziya koeffitsiyenti va faollanish energiyasi III guruh elementlari uchun xos bo'lgan [20-23] qiymatlar diapazonida joylashgan;
2. Ushbu hulosasi asosida itterbiy kremniyda vakansiyalar bo'yicha, ya'ni kristallning tugunlariaro diffuziyalanadi;
3. Itterbiy kremniyda sayoz akseptorlik tabiatini namoyon qiladi.

3. 2. Kremniyga ion implantatsiya yordamida kiritilgan noyob yer elementi itterbiynig taqsimoti, kremniyning elektrofizik xossalari va ularga termik ishlovning ta'sirini tadqiqlash

Ion implantatsiyasi odatda planar texnologiyada asosiy metod hisoblanadi va u kirishmani ionlar dozasi ko'rinishida "kiritish" (haydash) va ularni diffuziyaviy "tarqatish" [29] bosqichlarini o'z ichiga oladi. Shuning uchun, legirlash jarayonida diffuziya va nuqsonlar hosil bo'lish jarayonlarini, ion implantatsiyalangan elementning taqsimlanish va qayta taqsimlanishni, termik ishlov jarayonida implantatsiyadan so'ngi nuqsonlar qatlamining o'zgarishini o'rganish dolzarb masala hisoblanadi.

Davriy sistemaning III va V guruh elementlari termik muvozanat sharoitida *Si* va *Ge* da panjara tugunlarida joylashishi ma'lum. Nazariy hisoblar asosida, ushbu elementlarning tugunlararo joylashgan atomlarining muvozanati konsentratsiyasi ularning tugunlardagi konsentratsiyasidan uch va undan ortiq darajasida kam bo'ladi, deb hisoblanadi. Ammo, agar kremniyga ion implantatsiya usuli bilan III guruh elementlari – *Ho* (golmiy), *Er* (erbiy), *Yb* (itterbiy) va b. kiritilsa, ya'ni muvozanatli tugunlararo atomlar ancha yuqori konsentratsiyada mavjud bo'lsa, noyob yer elementlari III guruh elementlarining klassik parametrlaridan farqli ravishda yuqori diffuziyaviy parametrlarga ega bo'lishi mumkin deb hisoblanadi. Itterbiy ionlarini kremniyga ion implantatsiyalash va diffuziya jarayonini, itterbiy ionlarining qayta taqsimlanish profillarini, shuningdek nuqsonlarning taqsimotini tadqiqlash itterbiyning kremniydagi diffuziyasi bo'yicha adabiyotlarda mavjud qarama-qarshiliklarga oydinlik kiritish mumkin bo'lar edi.

Yuqoridagilar asosida ushbu paragrafda noyob yer elementi itterbiyning kremniyga kiritilganda hosil bo'ladigan implantatsiyadan so'ng paydo bo'ladigan radiatsiyaviy nuqsonlar taqsimotini, ion implantatsiyalangan itterbiyning taqsimoti va qayta taqsimlangan profilini, shuningdek quyida keltiriladigan texnologik rejimlarda va termik ishlov rejimlar sharoitlarida itterbiy ionlarining diffuziyasini va itterbiy ionlarining tahminiy diffuziya mexanizmlarini aniqlash bo'yicha eksprementlar tadqiqotlarining natijalari keltiriladi.

Itterbiy kirishmasini kremniyda tadqiqot ob'yekti sifatida tanlanishiga sabab, noyob yer elementlarini kremniyga kiritilganda, ushbu elementlar kremniydagi boshqarib bo'lmaydigan tez diffuziyalanuvchi kirishmalar va nuqsonlarni getterlash imkoniyatiga ega ekanligini va bu holat amaliy va ilmiy qiziqishlar uyg'otishi natijasida materialning termik va radiatsiyaviy barqarorligi ortishi bilan bog'liqdir.

Kremniy qatlamining itterbiy bilan ion implantatsiyalangan qatlamining buzilish darajasining taqsimoti profilini ultrabinafsha qaytishi metodi yordamida

olingan [53] ishdan ma'lum, kremniy monokristali ultrabinafsha to'liqlar sohasida ikkita qaytish cho'qqisiga: $\lambda = 0,275 \text{ mkm}$ va $\lambda = 0,365 \text{ mkm}$ egadir. Ushbu to'liqlar uzunliklari to'g'ri zonali $X_1 - X_4$ va $\Gamma_1 - \Gamma_{25}$ o'tishlarning bo'sag'aviy o'tishlar energiyasiga mos keladi.

Kremniy kirishmalar bilan implantatsiyalanganda ultrabinafsha nurlanishlarning qaytish cho'qqilari amplitudalari ionlar dozasi bog'liq ravishda kamayadi va ushbu holda eng sezgir qaytish cho'qqisi $\lambda = 0,275 \text{ mkm}$ da kuzatiladi. Qaytishning o'zgarishi tartibsizlanishning darajasiga to'g'ri mutanosib deb hisoblab, implantatsiyalangan strukturalarning nuqsonlanish darajasini quyidagi ifoda yordamida aniqlash mumkin:

$$D = \left[\frac{(R_c - R_s)}{(R_c - R_a)} \right] \cdot 100\%$$

bu yerda, R_c , R_s va R_a – mos ravishda kristall, amorf va tadqiqatlanayotgan namunalarning $\lambda = 0,275 \text{ mkm}$ to'liqlar uzunligidagi ultrabinafsha yorug'lik nurining to'liqlar uzunligida qaytish koeffitsiyentlari. Tartibsizlanish darajasining aniqlik darajasi ushbu metodni qo'llashda $\sim 3 \%$ ekanligi hisoblab topildi. Shu bilan birga, qisqa to'liqlarda yutilish koeffitsiyenti $\alpha = 10^5 \text{ sm}^{-1}$ va ultrabinafsha yorug'likning kirish chuqurligi bir necha o'n angstromni tashkil etadi, ya'ni ushbu holda implantatsiyalangan qatlamning faqatgina sirt oldi sohasigina tadqiqlanadi.

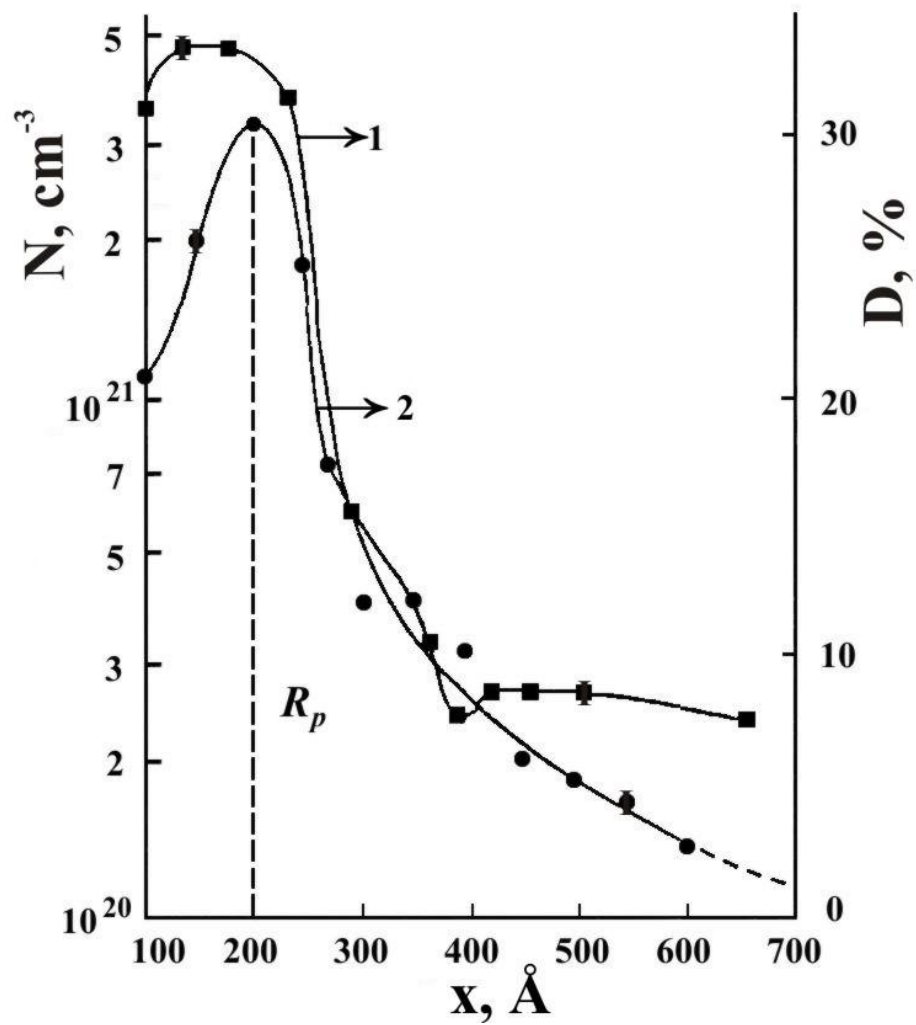
Bir qator ishlarda implantatsiyalangan qatlamning ma'lum bir dozasi uchun optimal (eng maqbul) tanlangan termik ishlov berish yordamida ion implantatsiyalash jarayonida amorflashgan kremniy qatlamining monokristall holatiga qaytarish mumkin [54]. Shuningdek, kiritilgan ionlarning qanchalik ko'p qismi elektrik faol holatga o'tsa, implantatsiyalangan qatlamning tartibsizlanish darajasi shuncha kam bo'lishi eksperimental tasdiqlangan. Ultrabinafsha qaytishi bo'yicha ma'lumotlar qarama-qarshi urishish modeli bo'yicha qo'shimcha

hisoblashlar va konsentratsiyaviy profillarni mavjudligi ion legirlash yordamida hosil qilinadigan nuqsonlarni identifikatsiyalash imkoniyatini beradi.

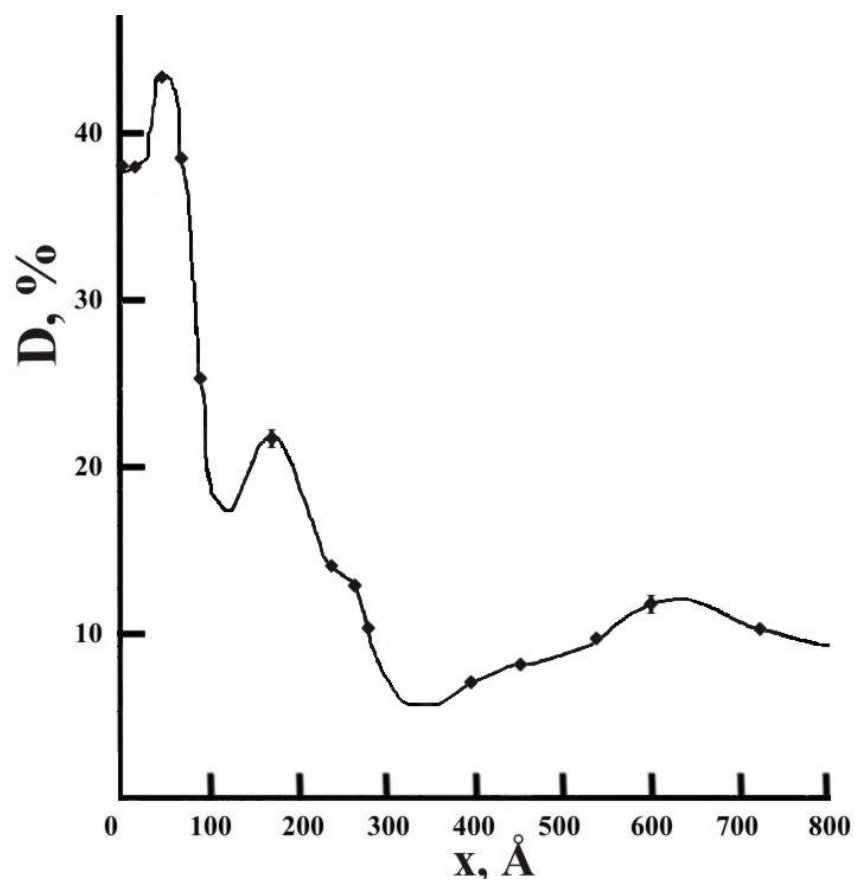
Kremniyda ion implantatsiyalangan kremniyning konsentratsiyaviy taqsimoti qoldiq faollik bo'yicha neytron aktivatsiya analizi yordamida aniqlangan. Ushbu va yuqoridagi metodlar yordamida kremniyni anod va kimyoviy seksiyalash bajarilgan. Olingan qatlamning qalinligi (oksidning) ellipsometr va namunalarni tortish orqali aniqlangan.

Ushbu tadqiqotda kremniy (KEF-15) itterbiy ionlari (Yb^+) bilan $E = 70$ keV energiya va $Q = 10^{16} \text{ sm}^{-2}$ doza, $j = 10 \text{ mA/sm}^2$ ionlar toki zichligi qiymatlarida implantatsiyalangan. Implantatsiyadan so'ng tartibsizlanish darajasining taqsimotini ifodalovchi chizmalar va $^{173}Yb^+$ itterbiyning konsentratsiyaviy profillari (3.4÷3.8-rasmlar) olingan. Kirishmaning taqsimlanish maksimumi holati Linxard-Sharf-Shiott nazariyasi bo'yicha hisoblangan (proyeksiyalangan yugirishning hisoblangan uzunligi $R_p \sim 200 \text{ Å}$) hisoblashlar bilan to'la mos tushishi rasmlardagi bog'lanishlardan yaxshi ko'rinmoqda. Ushbu holatda nuqsonlanish darajasi bilan konsentratsiyaviy taqsimot o'rtasidagi korrelyatsiya (mutanosiblik) juda aniq, nuqsonlarning taqsimotidagi maksimum, P (fosfor) holatidan farqli ravishda, kirishmaning maksimumiga nisbatan kremniy sirtiga yaqin joylashgan. Taxminan $2R_p$ chuqurlikda konsentratsiyaviy taqsimotning Gauss qonunidan chetlashishi (3.4-rasm) kuzatilmoqda. Ushbu chuqurliklarda nuqsonlarning taqsimotlari ham nomonoton ravishda (3.4÷3.8- rasmlar) o'zgarmoqda.

Adabiyotlarda mavjud ma'lumotlarni tahlillash asosida kremniyning implantatsiyalangan dozasi beshta qatlamlardan tashkil topgan deb hisoblash mumkin: I - qatlam qalinligi $50 \div 100 \text{ Å}$ bo'lgan sirt oldi qatlami. Ushbu qatlam yuqori darajada tartibsizlikka ega, ammo ushbu sohadagi nuqsonlarni tasniflash juda qiyin; II - qatlam qalinligi – 100 dan 200 Å gacha, ushbu soha maksimal tartibsizlanishga ega bo'lib, u tugunlararo joylashgan itterbiy ionlari tomonidan hosil qilingan; III - qatlam hisoblangan $R_p \pm \Delta R_p$ parametr ga oid soha, ya'ni



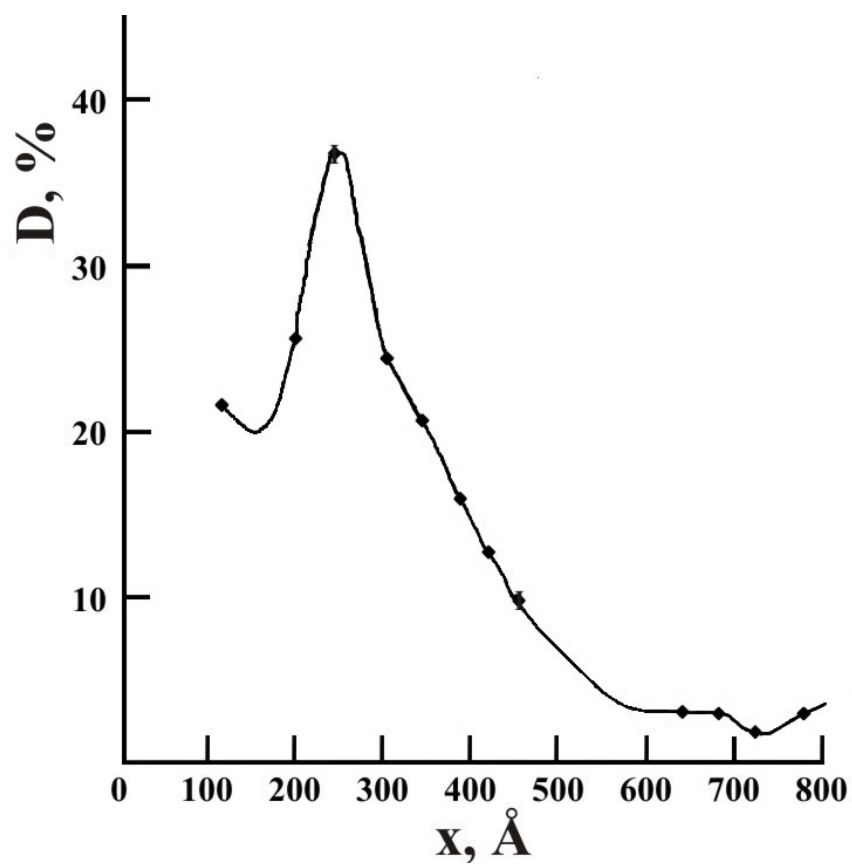
3.4-rasm. Kremniydagi tartibsizlanish darajasining (1) va $^{175}\text{Yb}^+$ ning konsentratsiyaviy taqsimoti (2)
 $E = 70 \text{ keV}$, $Q = 10^{16} \text{ sm}^{-2}$, ion tokining zichligi $j = 10 \text{ mkA/sm}^2$.



3.5-rasm. Si<¹⁷⁵Yb⁺> dagi tartibsizlanish darajasining taqsimoti.

$$E = 70 \text{ keV}, Q = 10^{16} \text{ sm}^{-2}.$$

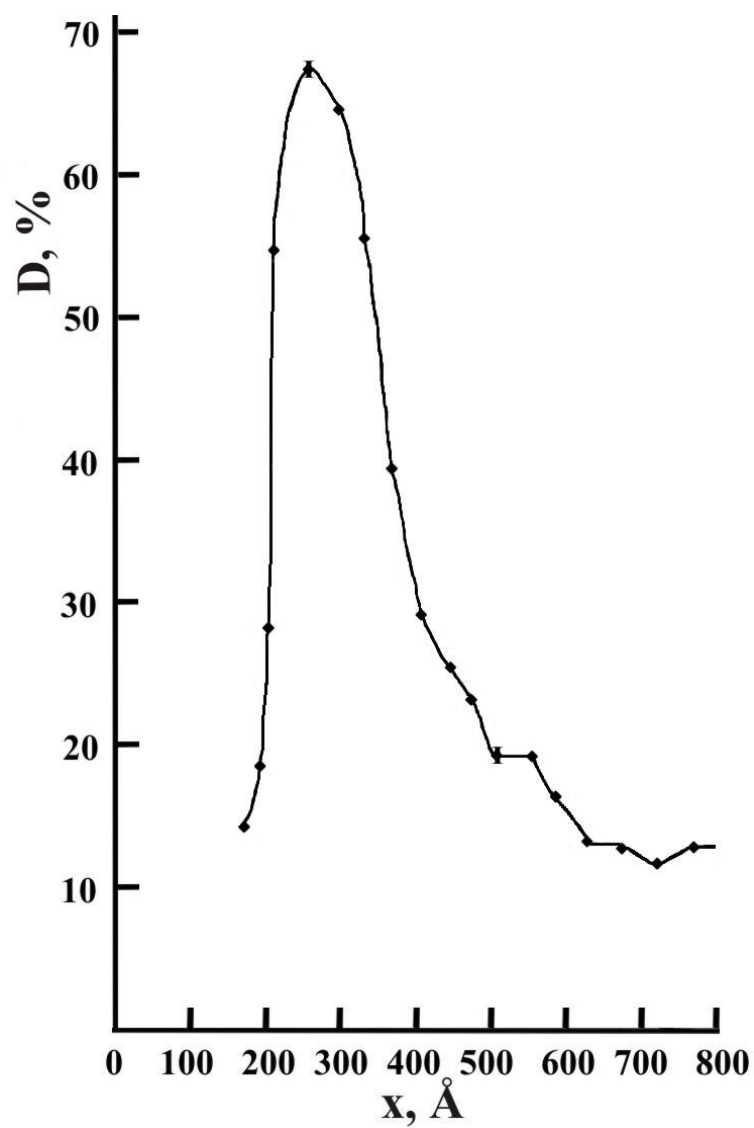
$T = 400^0 \text{ C}, t = 30 \text{ min.}$ termik ishlovdan so'ng.



3.6-rasm. $\text{Si} \langle {}^{175}\text{Yb}^+ \rangle$ dagi tartibsizlanish darajasining taqsimoti.

$$E = 70 \text{ keV}, \quad Q = 10^{16} \text{ sm}^{-2}.$$

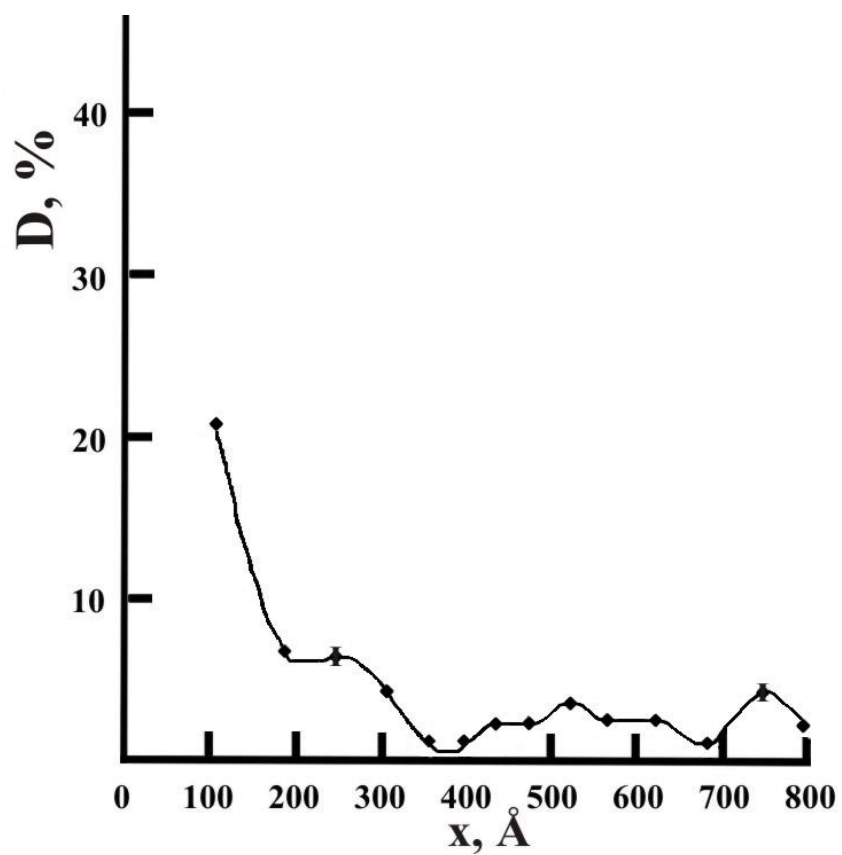
$T = 800^0 \text{ C}, t = 30 \text{ min.}$ termik ishlovdan so'ng.



3.7-rasm. $\text{Si} \langle {}^{175}\text{Yb}^+ \rangle$ dagi tartibsizlanish darajasining taqsimoti.

$$E = 70 \text{ keV}, \quad Q = 10^{16} \text{ sm}^{-2}.$$

$T = 1000^0 \text{ C}$, $t = 30 \text{ min}$. termik ishlovdan so'ng.



3.8-rasm. Si<¹⁷⁵Yb⁺> dagi tartibsizlanish darajasining taqsimoti.

$$E = 70 \text{ keV}, \quad Q = 10^{16} \text{ sm}^{-2}.$$

$T = 400^{\circ} \text{C} + 800^{\circ} \text{C}, t = 30 \text{ min.}$ termik ishlovdan so'ng.

chuqurligi $150 \div 300 \text{ \AA}$ qatlam. Bu sohada nuqsonlar keskin kamayadi, ya'ni ultrabinafsha qaytish yordamida implantatsiyalangan kirishmaning tugunlararo komponentasi – tashkil etuvchisi kuzatilmaydi; IV - qatlam – $300 \div 450 \text{ \AA}$ chuqurlik sohasida kirishmaning kanallangan atomlari mavjud; shunga o'xshash manzara boshqa mualliflar [56] tomonidan mish'yakning kanallashgan implantatsiyasini zarralarning teskari sochilish metodi yordamida kuzatilgan; V - qatlamda, ya'ni ancha chuqur sohalarda yuqori bo'lmagan qoldiq nuqsonlar mavjud bo'lib, ular ion legirlash jarayonida urib chiqarilgan atomlar ta'sirida shakllangan bo'ladi.

Nuqsonlar taqsimotlari bog'lanishlarining ko'rsatishicha, $400 \div 1000^\circ\text{C}$ temperaturalarda har biri 30 minut davomida qizdirilganda ($3.4 \div 3.8$ - rasmlar) eng optimal temperatura 600°C ekanligi kuzatildi. 1000°C da 30 minut davomida qizdirilganda nuqsonlar sezilarli ravishda ortadi (3.7-rasm). Ushbu holat itterbiy atomlari mavjud bo'lgan terik nuqsonlar yoki komplekslarning hosil bo'lishi natijasida paydo bo'lgan, deb tahminlanadi.

Aynan shu namunalarda bajarilgan ikki bosqichli termik ishlov berilgan, 30 minut davomida $400 \div 800^\circ\text{C}$ ishlovlardan so'nggi natijalarni (3.8-rasm) bir bosqichli 400°C (3.5-rasm) va 800°C (3.6-rasm) bilan solishtirildi. Olingan natijalardan ko'rinishicha (3.8-rasm), ikki bosqichli termik ishlov yuqori samarali, qoldiq nuqsonlarning darajasi ancha past va ular kristall qalinligi bo'yicha bir tekis taqsimlangan.

Shu bilan birga quyidagini ta'kidlash lozim: kremniy hajmida ancha yuqori ($10^{17} \div 10^{22} \text{ sm}^{-3}$) konsentratsiyalarda ion implantatsiyalangan, tugunlararo nomuvozanatli itterbiy ionlari mavjud bo'lishiga qaramay o'tkazilgan ishlov jarayonlarida ($400 \div 800^\circ\text{C}$) itterbiyning kremniydagi tez diffuziyanuvchi kirishmalarga xos bo'lgan qandaydir sezilarli yuqori diffuziylanishi kuzatilmadi.

Ushbu holat yana bir bor itterbiy kirishmalarining kremniydagi diffuziyaviy parametrlari III guruhning klassik elementlariga (*B, Al, Ga, In, Tl*) xos va ularning diffuziyaviy mexanizmi – vakansiyalar bo'yicha ekanligini tasdiqlaydi.

3.3. Xulosalar

1. Itterbiy kirishmalarining kremniyning elektrofizik xossalariga ta'siri, diffuziyasi, zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi tadqiqlandi. Itterbiy *n*-tur kremniy sirtida *p*-tur o'tkazuvchanlik namoyon etishi kuzatildi. Kremniyning taqiqlangan zonasida itterbiy bog'langan qandaydir chuqur sohalar kuzatilmadi. Itterbiyning kremniydagi diffuziya koeffitsiyentlarining temperaturaviy bog'lanishlari aniqlandi: $D_{yb} = 3 \cdot 10^{-2} \exp(-3,0\text{eV} / kT)$.

2. Itterbiy bilan diffuziyaviy legirlangan qatlamlarda zaryad tashuvchilar konsentratsiyasining temperaturaviy bog'lanishlari aniqlandi:

$$C_{yb} \approx 2 \cdot 10^{17} \operatorname{erfc}(x / 2\sqrt{Dt}) \text{ sm}^{-3}.$$

Yuqorida tadqiqlangan itterbiyning kremniyda diffuziya parametrlariga qizdirish muhitining ta'siri deyarli sezilarsiz ekanligi ko'rsatildi.

3. Itterbiy ion implantatsiyalangan kremniyda termik ishlov berishning samarali rejimi ($400 + 800^{\circ}\text{C}$) da, 30 minut davomida, termotsikllash) aniqlandi. Ushbu rejmda qoldiq nuqsonlarning eng kichik darajasi va chiqurlik bo'yicha ularning bir tekis taqsimlanishiga erishiladi.

4. Itterbiy ionlari bilan legirlangan kremniy qatlamlarida kirishmalarning mavjud yuqori konsentratsiyalari mavjudligi ham tugunlararo itterbiy ionlarining tez diffuziyalanuvchi tashkil etuvchilari yo'q ekanligi aniqlandi.

Magistrant
Soliyev A.Z.ning chop etilgan ishlari
ro'yxati

1.	Бобохужаев К.У., Базарбаев М.И., Назыров Д.Э., Солиев А.З. Взаимодействие редкоземельных элементов с кислородом в кремнии. Материалы республиканской научно-технической конференции. Нукус, 23-24 ноября 2011 г. С.151-153.
2.	Бобохужаев К.У., Комилов М.М., Солиев А.З. Свойства кремния, ионноимплантированного иттербием. “Физика фанининг бугунги ривожиди истеъдодли ёшларнинг ўрни”. Ёш олимлар ва иқтидорли талабалар илмий анжумани материаллари. Т., 27-28 апрель 2012 йил. 174-179 бетлар.
3.	Бобохужаев К.У., Атаханова Ш., Базарбаев М.И., Ёқуббоев А.А., Солиев А.З. , Назыров Д.Э. Влияние термических обработок на свойства кремния, легированного редкоземельными элементами “Физика фанининг ривожиди истеъдодли ёшларнинг ўрни” республика илмий-амалий конференцияси (РИАК-6) материаллари. Т., 2013 йил, 26-27 апрель. 88-90 бетлар.
4.	Зайнабидинов С., Назыров Д.Э., Хамиджонов И.Х., Бобохужаев К.У., Солиев А.З. , Гончаров С.А., Суворов А.В. Изучение профиля распределения степени разупорядоченности ионноимплантированного иттербием слоя кремния. Т. 2013. №2-1. «Вестник НУУз». С.82-85.



ЎЗМУ ХАБАРЛАРИ

№ 2/1 ✧ 2013



ВЕСТНИК НУУЗ ✧ АСТА NUUZ

ИЗУЧЕНИЕ ПРОФИЛЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СТЕПЕНИ РАЗУПОРЯДОЧЕННОСТИ ИОННОИМПЛАНТИРОВАННОГО ИТТЕРБИЕМ СЛОЯ КРЕМНИЯ

ЗАЙНАБИДИНОВ С., НАЗЫРОВ Д.Э., ХАМИДЖОНОВ И.Х., БОБОХУЖАЕВ К.У., СОЛИЕВ А.З.,
ГОНЧАРОВ С.А., СУВОРОВ А.В.*

Ионная имплантация примесей атомов в полупроводнике является основным в планарной технологии полупроводниковой микроэлектроники, сочетающей загонку примеси в виде доз ионов и их диффузионную разгонку в объеме кристаллов. В связи с этим, изучение процессов диффузии и дефектообразования при легировании, профиля распределения и перераспределения ионноимплантированного химического элемента в *Si*, а также постимплантационных радиационных дефектных слоев в условиях термического отжига является актуальной задачей.

С другой стороны, также хорошо известно, что широко применяемые технологические элементы III и V групп Периодической системы, такие как *B*, *Al*, *Ga*, *P*, *Sb* и др. при термическом равновесии располагаются в полупроводниковых кристаллах *Si* и *Ge* в узлах решетки. На основании теоретических расчетов принято считать, что равновесные концентрации междоузельных атомов этих элементов на несколько (три и более) порядков меньше их концентраций в узлах решетки. Однако, в случаях, когда редкоземельные элементы (РЗЭ): *Ho*, *Er*, *Yb* и др. вводятся в *Si* методом ионной имплантации, т.е. когда неравновесные междоузельные атомы имеются в значительных концентрациях, то возможно предположить существование диффузии РЗЭ, диффузионные параметры которых отличались бы от классических параметров для элементов III группы. Проведение же ионной имплантации РЗЭ – *Yb* в *Si* и исследование процесса диффузии, профилей перераспределения ионов Yb^+ , а также дефектов в *Si* могло бы внести ясность в вопросе о противоречивости имеющихся литературных данных по диффузии *Yb* в *Si* [1-5].

При выборе примеси *Yb* в качестве объекта исследования также учитывалось то, что введение в *Si* РЗЭ представляет практический и научный интерес в связи с их способностью геттерировать неконтролируемые быстродиффундирующие примеси и дефекты, и тем самым повышать термическую и радиационную стойкость материала [6-8].

В работе [9] были опубликованы предварительные результаты по исследованию только исходного распределения разупорядоченности (1) и концентрационного распределения профиля (2) ионов Yb^+ в *Si* после ионного легирования (рис. 1).

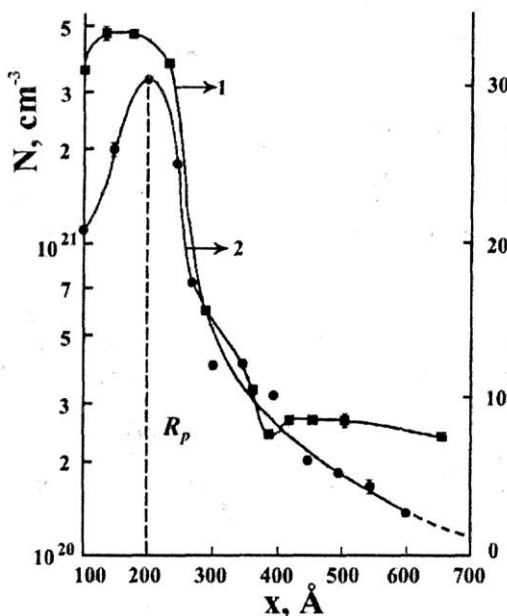


Рис. 1. Профиль распределения степени разупорядо-

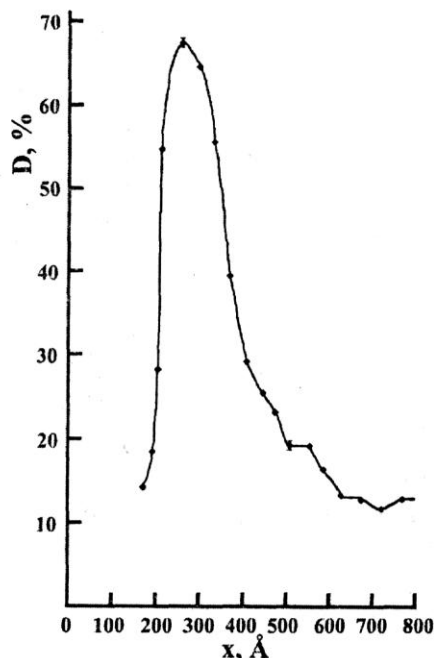


Рис. 2. Профиль распределения степени разупорядо-

*Зайнабидинов С. – д.ф.-м.н., профессор физического факультета АНГУ.

Назыров Д.Э. – к.ф.-м.н., доцент физического факультета НУУз.

Хамиджонов И.Х. – к.ф.-м.н., доцент физического факультета НУУз.

Бобохужаев К.У. – старший научный сотрудник – соискатель физического факультета НУУз.

Солиев А.З. – магистрант физического факультета НУУз.

Гончаров С.А. – магистрант физического факультета НУУз.

Суворов А.В. – магистрант физического факультета НУУз.

максимум распределения примеси. При этом, на глубине порядка $2R_p$ наблюдается отклонение концентрационного профиля от закона Гаусса (рис.1). Кривая дефектности в этих глубинах тоже изменяется немонотонно (рис.1-5).

На основе анализа, имеющейся в литературе, можно предположить, что зона Si , имплантированного Yb^+ , состоит из пяти слоев: I – приповерхностный слой, толщиной $50 \pm 100 \text{ \AA}$. Этот слой имеет высокую степень разупорядоченности, однако о типах преобладающих в этой области дефектов трудно что-либо сказать; II – слой от 100 до $200 \text{ \AA}$, эта область максимальной разупорядоченности, которая создается в кремнии атомами Yb^+ , занявшими междоузельное положение; III – слой соответствующий расчетному параметру $R_p \pm \Delta R_p$, область $150 \pm 300 \text{ \AA}$. Дефектность здесь резко падает, т.е. спектры УФ отражения не фиксируют междоузельную компоненту имплантированной примеси; IV – слой на глубине $300 \pm 450 \text{ \AA}$ содержит каналированные атомы примеси. Аналогичную картину наблюдали другие авторы [12] методом обратного рассеяния частиц при каналированной имплантации As ; V – более глубокие слои имеют невысокую остаточную дефектность, которая формируется за счет атомов отдачи Si , «выбитых» при ионном легировании.

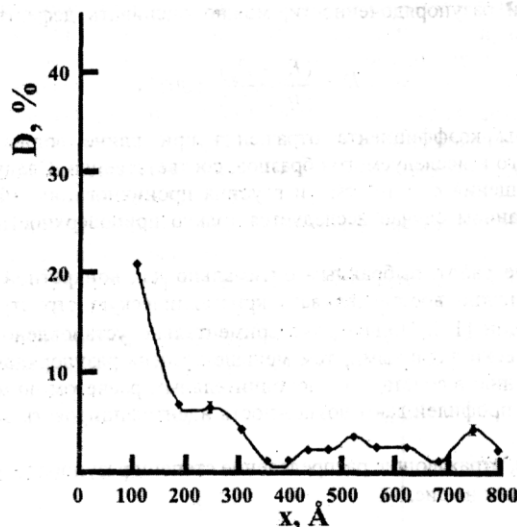


Рис. 5. Профиль распределения степени разупорядоченности в $Si<^{175}Yb^+>$. $E = 70 \text{ keV}$, $Q = 10^{16} \text{ см}^{-2}$. После ТО, $T = 400^\circ\text{C} + 800^\circ\text{C}$, $t = 30 \text{ мин.}$

Как показывают зависимости распределения дефектов от температуры отжига в интервале $400 + 1000^\circ\text{C}$ (рис.2+5), в течение 30 минут для дозы $Q = 1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$, при отжиге 1000°C , в течение 30 минут количество дефектов значительно возрастает (рис.2). Это, по-видимому, и есть следствие образования термических дефектов или комплексов дефектов содержащих атомы Yb^+ .

Выполненный на тех же образцах обычный одноступенчатый ТО при температурах 400°C (рис.3) и 800°C (рис. 4), сравнили с двухступенчатым ТО при температурах $400^\circ\text{C} + 800^\circ\text{C}$, в течении 30 минут (рис.5). Из полученных результатов видно (рис.5), что двухступенчатый ТО более эффективен, дает гораздо меньший уровень остаточных дефектов и равномерное их распределение по толщине кристалла.

При этом следует отметить, что, несмотря на наличие в объеме Si значительной концентрации ($10^{17} + 10^{22} \text{ см}^{-3}$) внедренных неравновесных междоузельных Yb^+ , не удалось наблюдать при проведенных термических отжигах ($400 + 1000^\circ\text{C}$) какой-либо значительной диффузии, значения которых можно было бы приписать к быстро диффундирующим элементам, что дает возможность подтверждать характерность диффузионных параметров примесей Yb в Si для элементов классических элементов III группы (B, Al, In, Ga, Tl), а механизм их диффузии вакансионный.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Назыров Д.Э., Зайнабидинов С., Базарбаев М.И. Диффузия, растворимость и электрические свойства самария и иттербия в кремнии // Электронная обработка материалов. 2006. № 4. С. 90-92.
2. Назыров Д.Э. Диффузия иттербия в кремнии // Физика и техника полупроводников. 2003. Т. 37. В. 9. С. 1056-1057.
3. Абросимова В.Н., Трошина Е.П., Чепик Л.Ф. Диффузионное легирование кремния редкоземельными элементами // В кн.: Свойства легированных полупроводниковых материалов. М.: Наука, 1990. С. 102-107.

4. Балыченко А.А., Крылов Б.Г., Макаров В.В., Филиппов Е.И., Шокин А.Н. Особенности поведения ионно-имплантированных РЗЭ в кремнии // В сб. тезисов докладов VI международной конференции по физико-химическим основам легирования полупроводниковых материалов. М., 1988. С. 91.
5. Бахадырханов М.К., Талипов Ф.М., Султанова Н.В., Джурабеков У.С., Шасаидов Ш.Ш., Лютович А.С., Касымов А.А. Исследование диффузии и растворимости иттербия в кремнии // Известия РАН. Сер. Неорганические материалы. 1990. Т. 26. № 3. С. 458-461.
6. Глазов В.М., Потемкин А.Я., Тимошина Г.Г., Михайлова М.С. О возможности повышения термостабильности Si путем его легирования переходными, либо редкоземельными металлами // Физика и техника полупроводников. 1997. Т. 31. № 9. С. 1025-1028.
7. Nazurov D.E. Gettering of gold by samarium and gadolinium in silicon // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2007. V. 43. № 3. PP. 218-221.
8. Малкович Р.Ш., Назыров Д.Э. Геттерирование быстродиффундирующих примесей в кремнии редкоземельными элементами // Письма в Журнал технической физики. 1989. Т. 15. В. 4. С. 38-40.
9. Назыров Д.Э., Гончаров С.А., Суворов А.В. Ионное легирование кремния иттербием // Письма в Журнал технической физики. 2000. Т. 26. В. 8. С. 24-27.
10. Уханов Ю.И. Оптические свойства полупроводников. М.: Наука, 1977. 368 с.
11. Гончаров С.А., Соколов В.И. В сб. тезисов докладов Всесоюзной конференции по радиационным дефектам в металлах. Алма-ата. 1983. С. 9.
12. Proc. 4-Int. conf. «Ion implantations in semiconductors and other materials». Osaka (Plenum Press. N.Y.). 1974. PP. 955-956.

РЕЗЮМЕ

Иттербий ионларининг кремнийга имплантациясидан сўнг ҳосил бўлган радиациявий нуксонлар тақсимои ўрганилган. Иттербийнинг тақсимои радиациявий нуксонлар тақсимои билан ўзаро корреляцияланувчан эканлиги аниқланган. Икки босқичли ($400^{\circ}\text{C} + 800^{\circ}\text{C}$, $t = 30$ минут) термик ишлов бериш жараёнида қолдиқ радиациявий нуксонлар тақсимои минимал эканлиги ва уларнинг кремний калинлиги бўйича бир текис тақсимланиши кўрсатилган.

SUMMARY

Distribution of radiation induced defects in silicon ion implanted with Yb^{+} has been studied. It was shown that profile of ion implanted Yb^{+} is correlated with profile of radiation induced defects. The decreasing of concentration of post radiation defects and improving homogeneity of their distribution in the implanted silicon after two stage thermo annealing ($400^{\circ}\text{C} + 800^{\circ}\text{C}$, $t = 30$ minute) have been observed.

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН**

**КАРАКАЛПАКСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени БЕРДАХА**

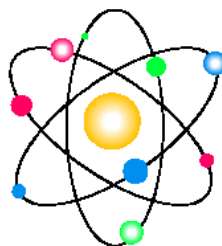


М А Т Е Р И А Л Ы

Республиканской конференции (с участием ученых стран СНГ)

«СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ФИЗИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ» СПФП-2011

**ПОСВЯЩАЕТСЯ 20-ЛЕТИЮ НЕЗАВИСИМОСТИ РЕСПУБЛИКИ
УЗБЕКИСТАН**



23-25 ноября 2011 г.

НУКУС – 2011

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С КИСЛОРОДОМ В КРЕМНИИ

Бобохужаев К.У., Базарбаев М.И., Назыров Д.Э., Солиев А.З.

Национальный университет Узбекистана имени Мирзо Улугбека, Ташкент
dnazirov2004@mail.ru

Как известно, ухудшение и деградация электрофизических свойств кремния при высокотемпературных обработках связано, прежде всего, с изменением концентрации и состояний, содержащихся в объёме примесей, в основном кислорода, углерода, а также неконтролируемых примесей, находящихся в объёме после выращивания кристалла, или проникающих в объём в процессе высокотемпературного отжига образцов.

Целью настоящей работы являлось исследование влияния взаимодействия гадолиния и иттербия с кислородом на электрофизические свойства кремния, прошедшего термическую обработку (ТО).

Ниже приводятся результаты исследований по влиянию гадолиния и иттербия на оптическое состояние кислорода в кремнии и термическое дефектообразование в кремнии. Исследования проводились с помощью метода электропроводности, ИК-спектроскопии, эффекта Холла и

изотермической релаксации емкости (ИРЕ).

Исследовались образцы монокристаллов кремния n-типа, легированные гадолинием и иттербием при выращивании по методу Чохральского, с удельным сопротивлением 20 Ом·см. Образцы вырезались из шайбы в виде параллелепипедов с размерами $12 \times 12 \times 0,4$ мм³. Использовались также контрольные образцы кремния с такими же удельными сопротивлениями, без примесей РЗЭ выращенные в тех же условиях.

Концентрации примесей гадолиния и иттербия в кремнии, определенные по методу нейтронно-активационного анализа составляли: $N_{\text{РЗЭ}} = 5 \cdot 10^{15} \div 5 \cdot 10^{19}$ см⁻³. С помощью ИК-микроскопии в образцах выявлено образование дислокаций. Установлено что, при концентрациях исследуемых примесей гадолиния и иттербия в кремнии $N_{\text{РЗЭ}} \geq 10^{16}$ см⁻³, начинается выпадение второй фазы. Результаты электрических измерений показывают, что гадолиний и иттербий в кремнии в исходном состоянии находятся в электрически неактивном состоянии. Исследования влияния термических обработок (ТО) (1100÷1200°С) установили, что преципитация кислорода происходит меньше в Si<Gd> и Si<Yb>, чем в контрольных образцах. Изучение результатов эффекта Холла и ИРЕ показывает, что гадолиний и иттербий в кремнии выступают при термических обработках в качестве геттера для неконтролируемых примесей и структурных дефектов.

Установлено, что концентрации глубоких уровней (ГУ) $E_C - 0,17$ эВ, $E_C - 0,2$ эВ, $E_C - 0,32$ эВ, $E_C - 0,41$ эВ, $E_V + 0,4$ эВ в образцах n-Si<Gd> и n-Si<Yb> намного меньше, чем в контрольных образцах, прошедших соответствующие этапы ТО.

ТО при 1173 К и более приводит к уменьшению концентрации ионизованных центров в образцах кремния, легированного исследуемыми примесями гадолиния и иттербия кремния, от $3,1 \cdot 10^{14}$ см⁻³ до $2,5 \cdot 10^{14}$ см⁻³. Однако образование ГУ в запрещенной зоне кремния связанных именно с гадолинием и иттербием, не обнаружено, хотя, косвенное их влияние распространялась на концентрацию большинства наблюдаемых ГУ в кремнии.

Таким образом, можно предположить, что гадолиний и иттербий, образуют мелкий акцепторный уровень в нижней половине запрещенной зоны кремния, что подтверждает их акцепторную природу.

В случае контрольных (без РЗЭ) образцов после ТО (1173 ÷ 1473 К) обнаружены ГУ, параметры которых совпадают с известными литературными данными. Концентрации всех этих термических центров не превышала $\sim 5 \cdot 10^{13}$ см⁻³.

В случае ТО образцов n-Si<Gd> и n-Si<Yb> в откачанных кварцевых ампулах, в отличие от ТО на воздухе, обнаруживаются все ГУ, наблюдаемые в образцах n-Si без РЗЭ (контрольных). Но их концентрация в n-Si<РЗЭ> обычно не превышает значений $\sim (2 \div 3) \cdot 10^{13}$ см⁻³, за исключением центра с ГУ $E_V + 0,4$ эВ, сечение захвата для электронов которого $\sigma_n \sim 10^{-14}$ см², его концентрация в контрольных образцах достигает $(3 \div 4) \cdot 10^{14}$ см⁻³, а в

легированных РЗЭ кремнии $\sim 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$.

Таким образом, следует отметить, что примеси гадолиния и иттербия в кремнии подавляют образование как ГУ связанных с неконтролируемыми примесями, так и других термических центров с ГУ $E_c - 0.17 \text{ эВ}$, связанного с кислородом, а также $E_c - 0.4 \text{ эВ}$, значения концентрации которых зависят как от температуры обработок, концентрации оптически активного кислорода, так и от концентрации гадолиния и иттербия в кремнии.

Установлено, что гадолиний и иттербий уменьшают концентрацию этих термических центров в 2÷4 раза. Таким образом, наличие гадолиния и иттербия в кремнии приводит к подавлению термических дефектов, т.е. чем больше концентрация гадолиния и иттербия в кремнии, тем больше степень подавления термических дефектов.

Подавление термического дефектообразования может быть обусловлено очищением объема кремния от неконтролируемых примесей - их геттерированием примесями гадолиния и иттербия, или образованием комплексов "РЗЭ+дефект" акцепторной природы, так и активным взаимодействием гадолиния и иттербия с кислородом в кремнии.

Результаты исследований ИК-поглощения в $n\text{-Si}\langle\text{Gd}\rangle$ и $n\text{-Si}\langle\text{Yb}\rangle$ показывают, что эффективное взаимодействие РЗЭ с кислородом в кремнии начинается с концентраций $N_{\text{РЗЭ}} \geq 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, что возможно указывает на наличие в объеме кремния включений второй фазы гадолиния и иттербия, а также силицидов РЗЭ, действующие как стоки для неконтролируемых и технологических примесей.

**ФИЗИКА ФАНИНИНГ БУГУНГИ РИВОЖИДА ИСТЕЪДОДЛИ
ЁШЛАРНИНГ ЎРНИ**

1

**Ўзбекистон Республикаси
Олий ва ўрта махсус таълим вазирлиги**

**Мирзо Улуғбек номидаги
Ўзбекистон Миллий Университети**

**ФИЗИКА ФАНИНИНГ БУГУНГИ
РИВОЖИДА
ИСТЕЪДОДЛИ ЁШЛАРНИНГ ЎРНИ**

**Ёш олимлар ва иқтидорли талабалар
илмий анжумани материаллари**

27-28 апрел 2012 йил

Тошкент – 2012

**Ўзбекистон Республикаси
Олий ва ўрта махсус таълим вазирлиги
Мирзо Улуғбек номидаги
Ўзбекистон Миллий университети**



**“ФИЗИКА ФАНИНИНГ РИВОЖИДА
ИСТЕЪДОДЛИ ЁШЛАРНИНГ ЎРНИ”**

**РЕСПУБЛИКА ИЛМИЙ-АМАЛИЙ
КОНФЕРЕНЦИЯСИ МАТЕРИАЛЛАРИ**

“РИАК-VI”

2013 йил 26-27 апрель

Тошкент – 2013

ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКИХ ОБРАБОТОК НА СВОЙСТВА КРЕМНИЯ, ЛЕГИРОВАННОГО РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Бобохужаев К.У., Атаханова Ш., Базарбаев М.И., Ёкуббоев А.А.,
Солиев А.З., Назыров Д.Э.

Национальный Университет Узбекистана

В последнее время кремний (Si), легированный редкоземельными элементами (РЗЭ), привлекает все большее внимание исследователей как перспективный материал для оптоэлектроники. Это обуславливается перспективой применения Si<РЗЭ> структур в кремниевой оптоэлектронике в качестве источников света. Как известно, эффективность примесей РЗЭ в кремнии, проявление оптических свойств структур зависит как от спектра оптически и электрически активных центров, содержащих РЗЭ, их общей концентрации, так и их взаимодействием с неконтролируемыми примесями, а также с термическими дефектами в объеме материала [1-5].

Ниже приводятся результаты исследований по влиянию самария (Sm), гадолиния (Gd) и иттербия (Yb) на термическое дефектообразование (ТД) кремнии. Исследования проводились с помощью нейтронно-активационного анализа (НАА), электропроводности; ИК-спектроскопии, изотермической релаксации емкости (ИРЕ), а также изучения распределения фото-э.д.с.

Для изучения глубоких уровней (ГУ), расположенных в нижней половине запрещенной зоны *n*-Si, была применена оптическая перезарядка. Исследовались образцы Si *n*-типа, легированные Sm, Gd и Yb при выращивании по методу Чохральского, с удельными сопротивлениями 10÷20 Ом·см. Образцы вырезались из шайбы в виде параллелепипедов с размерами 12×12×0,4 мм³. Использовались также контрольные образцы Si с такими же удельными сопротивлениями, без примесей РЗЭ выращенные в тех же условиях. Концентрации примесей Sm, Gd и Yb в Si, определенные по методу НАА составляли: $N_{\text{РЗЭ}} = 5 \cdot 10^{15} \div 5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. С помощью ИК-микроскопии в образцах выявлено образование дислокаций. Установлено что, при концентрациях исследуемых РЗЭ в Si $N_{\text{РЗЭ}} \geq 10^{16} \text{ см}^{-3}$, начинается выпадение второй фазы. Результаты электрических измерений показывают что Sm, Gd и Yb в Si в исходном состоянии находятся в электрически неактивном состоянии. Исследования влияния термических обработок (ТО) (900÷1200⁰С) в течении 1-2 часов на воздухе и в откачанных ампулах с последующей закалкой или медленным охлаждением показывают, что преципитация кислорода происходит меньше в Si<РЗЭ>, чем в контрольных образцах. Изучение результатов ИРЕ показывает, что Sm, Gd и Yb в Si выступают при ТО в качестве геттера для неконтролируемых примесей и структурных дефектов.

Установлено, что концентрации ГУ $E_C-0,17$ эВ, $E_C-0,2$ эВ, $E_C-0,32$ эВ, $E_C-0,41$ эВ, $E_V+0,4$ эВ в образцах $Si<PЗЭ>$ намного меньше, чем в контрольных образцах, прошедших соответствующие этапы ТО. ТО в интервале температур $1373\div1473$ К, в течении 2 часов с последующей закалкой в масле или медленным охлаждением, привела к компенсации всех образцов $Si<PЗЭ>$, в следствии чего методом ИРЕ во всех исследуемых образцах в интервале температур $77-300$ К перезарядки каких-либо центров не обнаружено ($N_d < 5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$), т.е. измеряемая емкость барьеров Шоттки, изготовленных на основе $Si<PЗЭ>$ с концентрацией PЗЭ в кремнии $N_{PЗЭ} \geq 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, не зависела от величины приложенного напряжения до температур ~ 80 К и для образцов с концентрацией PЗЭ в $Si \geq 10^{17} \text{ см}^{-3}$ до 100 К, т.е. $C_b \sim C_h$, причем степень компенсации в быстроохлажденных образцах была высокой.

ТО при 1173 К и более приводит к уменьшению концентрации ионизованных центров в образцах Si , легированного исследуемыми примесями PЗЭ, от $3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ до $2.6 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Однако образование ГУ в запрещенной зоне кремния связанных именно с PЗЭ не обнаружено. Хотя, их косвенное влияние распространялась на концентрацию большинства наблюдаемых ГУ.

Следовательно, можно предположить, что PЗЭ Sm , Gd и Yb , образуют мелкий акцепторный уровень в нижней половине запрещенной зоны Si , что подтверждает их акцепторную природу. В случае контрольных (без PЗЭ) образцов после ТО ($1173\div1473$ К) выявлены следующие ГУ: ($E_C-0.17\div0.22$) эВ, ($E_C-0.4$) эВ, ($E_C-0.54$) эВ, ($E_V+0.2$) эВ, ($E_V+0.4$) эВ, параметры которых совпадают с известными литературными данными. Концентрации всех этих термических центров не превышала $\sim 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$.

В случае ТО образцов $n-Si<PЗЭ>$ в откачанных кварцевых ампулах, в отличие от термически отожженных на воздухе, обнаруживаются все ГУ, наблюдаемые в образцах $n-Si$ без PЗЭ (контрольных). Но их концентрация в $n-Si<PЗЭ>$ обычно не превышает значений $\sim (2\div3) \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, за исключением центра с ГУ $E_V+0.4$ эВ, сечение захвата для электронов которого $\sigma_n \sim 10^{-14} \text{ см}^2$, его концентрация в контрольных образцах достигает $(3\div4) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, а в легированных PЗЭ $Si \sim 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$.

Как известно, этот донорный ГУ связывают с Fe . Таким образом, следует отметить, что PЗЭ Sm , Gd и Yb подавляют образование как ГУ связанного с быстродиффундирующими неконтролируемыми примесями Au , так и Fe , как и других термических центров с уровнями $E_C-0.17$ эВ и $E_C-0.4$ эВ значения концентрации которых зависит как от температуры обработок, так и от наличия PЗЭ в Si .

Установлено, что PЗЭ Sm , Gd и Yb уменьшают концентрацию этих ТЦ в $2\div4$ раза. Таким образом, наличие Sm , Gd и Yb в Si приводит к подавлению

высокотемпературных ТД. Чем больше концентрация РЗЭ в Si, тем больше степень компенсации образцов и степень подавления ТД. Результаты измерений времени $\tau_{\text{ннз}}$ в Si, легированном примесями Sm, Gd и Yb при выращивании показывают, что наличие всех этих РЗЭ приводит к повышению стойкости образцов к ТО, тем самым повышая их значения $\tau_{\text{ннз}}$ относительно контрольных, нелегированных, в 3-5 раз.

Подавление ТД может быть обусловлено очищением объема Si от неконтролируемых быстродиффундирующих примесей - их геттерированием примесями РЗЭ Sm, Gd, а также Yb или образованием комплексов "РЗЭ+дефект" акцепторной природы, так и активным взаимодействием РЗЭ с О в Si. Результаты исследований ИК-поглощения в Si<РЗЭ> показывают, что эффективное взаимодействие РЗЭ с О в Si начинается с концентраций $N_{\text{РЗЭ}} \geq 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, что возможно указывает на наличие в объеме кремния включений второй фазы РЗЭ, а также силицидов РЗЭ, действующие как стоки для неконтролируемых и технологических примесей.

Литература

1. Лазарук С.К., Мудрый А.В., Иванюкович А.В., Лешок А.А., Унучек Д.Н., Лабунов В.А. Физика и техника полупроводников. 2005. Т.39. В.8. С.927-930.
2. Libertino S., Coffa S., Franzo G., Priolo F. Journal of Applied Physics. 1995. V.78. № 6. PP.3867-3873.
3. Глазов В.М., Потеев-кин А.Я., Тимошина Г.Г., Михайлова М.С. Физика и техника полупроводников. 1997. Т.31. № 9. С.1025-1028.4. Баграев Н.Т, Власенко Л.С., Волле В.М., Воронков В.Б., Грехов И.В., Добровенский В.В., Шагун А.И. Журнал технической физики. 1984. Т.54. В.5. С.917-928.
5. Назыров Д.Э., Регель А.Р., Куликов Г.С. Препринт ФТИ им. А.Ф. Иоффе АН СССР. 1987. №1122. С.1-56.

ADABIYOT

1.	Назыров Д.Э., Регель А.Р., Куликов Г.С. Кремний легированный редкоземельными элементами. Препринт ФТИ им. А.Ф. Иоффе АН СССР. №1122. 1987. 56 С.
2.	Глазов В.М., Потемкин А.Я., Тимошина Г.Г., Михайлова М.С. О возможности повышения термостабильности Si путем его легирования переходными, либо редкоземельными металлами // Физика и техника полупроводников. – Санкт–Петербург, 1997. – Т. 31. – № 9. – С. 1025-1028.
3.	Соболев Н.А. Светоизлучающие структуры Si : Er. Технология и физические свойства (Обзор) // Физика и техника полупроводников. – Санкт–Петербург, 1995. – Т. 29. – В. 7. – С. 1153-1177.
4.	Лазарук С.К., Мудрый А.В., Иванюкович А.В., Лешок А.А., Унучек Д.Н., Лабунов В.А. Фотолюминесценция легированных эрбием алюмооксидных пленок со встроенными кремниевыми наночастицами // Физика и техника полупроводников. – Санкт–Петербург, 2005. – Т. 39. – В. 8. – С. 927-930.
5.	Libertino S., Coffa S., Franzo G., Priolo F. The effects of oxygen and defects on the deep-level properties of Er^{3+} in crystalline Si // Journal of Applied Physics. – New York, 1995. – V. 78. – № 6. – PP. 3867-3873.
6.	Priolo F., Franzo G., Coffa S., Polman A., Libertino S., Barklie R., Carey D. The erbium-impurity interaction and its effects on the 1,54 μm luminescence of Er^{3+} in crystalline silicon // Journal of Applied Physics. – New York, 1995. – V. 78. – № 6. – PP. 3874-3881.
7.	Mandelkorn J., Schwartz L., Broder J., Kautz H. and Ulman R. Effects of impurities on radiation damage of silicon solar cells // Journal of Applied Physics. – New York, 1964. – V. 35. – PP. 2258-2260.

8.	Mandelkorn J. <i>Gd or Sm doped silicon semiconductor composition</i> // Patent USA. Kl.252-62.3. № 3.409.554. – New York.
9.	Салманов А.Р. Исследование поведения примесей редкоземельных элементов и циркония в кремнии и их влияние на его термическую стабильность. Автореф. дис. ... канд. физ. - мат. наук. – Москва, 1978. – 17 с.
10.	Carter J.R. Defect-impurity relationships in electron damage silicon // IEEE Trans. Nucl. Science. – 1966. – V.NS-13. – PP. 24-32.
11.	Баграев Н.Т, Власенко Л.С., Волле В.М., Воронков В.Б., Грехов И.В., Добровенский В.В., Шагун А.И. Возможности повышения термостабильности монокристаллического кремния для мощных полупроводниковых приборов // ЖТФ. – Санкт-Петербург, 1984. – Т.54. – В. 5. – С. 917-928.
12.	Балыченко А.А., Крылов Б.Г., Макаров В.В., Филиппов Е.И., Шокин А.Н. Особенности поведения ионно-имплантированных РЗЭ в кремнии // В сб. тезисов докладов VI международной конференции по физико-химическим основам легирования полупроводниковых материалов. – М., 1988. – С. 91.
13.	Емельянов А.М., Соболев Н.А., Тришенков М.А., Хакуашев П.Е. Туннельные светодиоды на основе Si : (Er, O) с малыми временами нарастания электролюминесценции ионов Er^{3+} в режиме пробоя // Физика и техника полупроводников. – Санкт–Петербург, 2000. – Т. 34. – В.8. – С. 965-969.
14.	Соболев Н.А., Емельянов А.М., Николаев Ю.А. Влияние дозы имплантации ионов эрбия на характеристики (111) Si : (Er, O) – светодиодных структур, работающих в режиме пробоя перехода // Физика и техника полупроводников. – Санкт–Петербург, 2000. – Т. 34. – В. 9. – С. 1069-1072.

15.	Мастеров В.Ф., Насрединов Ф.С., Серегин П.П., Теруков Е.И., Мездрогина М.М. Примесные атомы эрбия в кремнии // Физика и техника полупроводников. – Санкт–Петербург, 1998. – Т. 32. – № 6. – С. 708-711.
16.	Александров О.В., Захарьин А.О., Соболев Н.А., Николаев Ю.А. Электрофизические свойства слоев кремния, имплантированных ионами эрбия и кислорода в широком диапазоне доз и термообработанных в различных температурных режимах // Физика и техника полупроводников. – Санкт–Петербург, 2002. – Т. 36. – В. 3. – С. 379-382
17.	Мастеров В.Ф., Насрединов Ф.С., Серегин П.П., Теруков Е.И., Мездрогина М.М. Примесные атомы эрбия в кремнии // Физика и техника полупроводников. – Санкт–Петербург, 1998. – Т. 32. – № 6. – С. 708-711.
18.	Александров О.В., Захарьин А.О., Соболев Н.А., Николаев Ю.А. Электрофизические свойства слоев кремния, имплантированных ионами эрбия и кислорода в широком диапазоне доз и термообработанных в различных температурных режимах // Физика и техника полупроводников. – Санкт–Петербург, 2002. – Т. 36. – В. 3. – С. 379-382.
19.	Назыров Д.Э., Гончаров С.А., Суворов А.В. Ионное легирование кремния иттербием // Письма в ЖТФ. – Санкт–Петербург, 2000. – Т. 26. – В. 8. – С. 24-27.
20.	Болтакс Б.И. Диффузия и точечные дефекты в полупроводниках. – Санкт–Петербург: Наука, 1972. – 384 с.
21.	Атомная диффузия в полупроводниках. Пер. с англ. Под ред. Д. Шоу. – М.: Мир, 1975. – 684 с.
22.	Diffusion in crystalline solids. Ed. By G.E. Murch and A.S. Novick.

	Academic Press. Inc. – New York et. al., 1984.
23.	Готра З.Ю. Технология микроэлектронных устройств. Справочник. – М.: Радио и связь, 1991. – 458 с.
24.	Агеев В.В., Аксенова Н.С., Коковина В.Н., Трошина Е.П. Применение элементов третьей группы Периодической системы Д.И. Менделеева в кремниевой планарной технологии // Известия ЛЭТИ. – Санкт-Петербург, 1977. – В. 211. – С. 80-85.
25.	Коршунов Ф.П., Кожекина Т.В., Модорский Б.М., Юшкин Н.П. Исследование характеристик кремниевых <i>p-n</i> переходов, полученных диффузией гадолиния // Известия БАН. Сер. Физ.-мат наук. – Минск, 1977. – № 6. – С. 108-111.
26.	Усков В.А., Родионов А.И., Власенко Г.Т., Федотов А.Б. Диффузия редкоземельных элементов в кремнии // В кн. Легированные полупроводниковые материалы. – М.: Наука, 1985. – С. 80-85.
27.	Назыров Д.Э., Усачева В.П., Куликов Г.С., Малкович Р.Ш. Диффузия празеодима в кремнии // Письма в ЖТФ. – Санкт-Петербург, 1988. – Т. 14. – В. 12. – С. 1102-1104.
28.	Азимов Г.К., Зайнабидинов С., Назыров Д.Э. Диффузия скандия в кремнии // Физика и техника полупроводников. – Санкт-Петербург, 1989. – Т. 23. – В. 3. – С. 556-557.
29.	Назыров Д.Э., Куликов Г.С., Малкович Р.Ш. Диффузия эрбия и тулия в кремнии // Физика и техника полупроводников. – Санкт-Петербург, 1991. – Т. 25. – В. 9. – С. 1653-1654.
30.	Назыров Д.Э. Диффузия редкоземельных элементов празеодима, эрбия, тулия, скандия и прометия в кремнии. Автореф. дис. ... канд. физ. – мат. наук. – Ташкент, 1992. – 16 с.
31.	Назыров Д.Э., Куликов Г.С., Малкович Р.Ш. Диффузия прометия в кремнии // Письма в ЖТФ. – Санкт-Петербург, 1997. – Т. 23. – № 2.

	– С. 46-50.
32.	Назыров Д.Э. Диффузия европия в кремнии // Физика и техника полупроводников. – Санкт–Петербург, 2003. – Т. 37. – В. 5. – С.570-571.
33.	Назыров Д.Э. Диффузия иттербия в кремнии // Физика и техника полупроводников. – Санкт–Петербург, 2003. – Т. 37. – В. 9. – С. 1056-1057.
34.	Назыров Д.Э. Диффузия тербия в кремнии // Физика и техника полупроводников. – Санкт–Петербург, 2006. – Т. 40. – В. 6. – С. 650-651.
35.	Зайнабидинов С., Назыров Д.Э., Акбаров А.Ж., Иминов А.А., Тоштемиров Т.М. Диффузия эрбия в кремнии // Письма в ЖТФ. – Санкт–Петербург, 1998. – Т. 24. – № 2. – С. 68-71.
36.	Зайнабидинов С., Адамбаев К., Иминов А.А., Назыров Д.Э. Диффузия самария и гадолиния в кремнии // Uzbek Journal of Physics. – Ташкент, 2002. – V. 4(№ 1). – PP. 66-68.
37.	Назыров Д.Э. Диффузия, растворимость и электрические свойства скандия, празеодима и европия в кремнии // Uzbek Journal of Physics. – Ташкент, 2006. – V. 8(№ 6). – PP.317-320.
38.	Зайнабидинов С., Назыров Д.Э. Диффузия, растворимость и электрические свойства скандия и празеодима в кремнии // Известия вузов. Физика. – Томск, 2007. – № 1. – С. 75-77.
39.	Зайнабидинов С., Назыров Д.Э. Исследование диффузии лантана в кремнии // Известия вузов. Электроника. – Москва, 2007. – № 1. – С. 87-89.
40.	Агеев В.В., Коковина В.Н., Прихидко Н.Е., Трошина Е.П. Характеристики кремния, легированного редкоземельными элементами // Известия ЛЭТИ. – Санкт–Петербург, 1976. – В. 186. – С. 51-54.

41.	Козлов А.Г. Исследование электрофизических свойств слоев кремния, легированного редкоземельными элементами // Известия ЛЭТИ. – Санкт–Петербург, 1984. – В. 338. – С. 79-82.
42.	Козлов А.Г. Совместная диффузия бора и редкоземельных элементов в кремнии // Известия ЛЭТИ. – Санкт–Петербург, 1983. – В. 322. – С. 105-106.
43.	Султанова Н.В. Исследование электрофизических свойств кремния, легированного некоторыми редкоземельными элементами. Автореф. дис. ... канд. физ. -мат. наук. – Ташкент, 1989. 16 с.
44.	Зайнабидинов С., Назыров Д.Э., Базарбаев М.И. Диффузия, растворимость и электрические свойства самария и иттербия в кремнии // Электронная обработка материалов. Кишинев, 2006. – В. 4. – С. 90-92.
45.	Назыров Д.Э., Базарбаев М.И., Иминов А.А. Диффузия иттрия и иттербия в кремнии // Труды республиканской конференции «Фундаментальные и прикладные вопросы физики» посвященной 60-летию ФТИ АН РУз. – Ташкент, 27-28 ноября 2003 г. – С. 234-236.
46.	Назыров Д.Э., Базарбаев М.И. Диффузия, растворимость и электрические свойства иттербия в кремнии // Труды международной конференции «Фундаментальные и прикладные вопросы физики» посвященной 90-летию академика С.А. Азимова. – Ташкент, 18-19 ноября 2004 г. – С. 318-319.
47.	Власов С.И., Базарбаев М.И., Назыров Д.Э. Электрофизические свойства легированных диффузией редкоземельными элементами слоев кремния // Материалы республиканской научно-практической конференции «Актуальные проблемы современной физики». – Ташкент, 18-19 мая 2007 г. – С. 136-137.
48.	Базарбаев М.И. Диффузия иттрия и иттербия в кремнии // Uzbek

	Journal of Physics. – Ташкент, 2006. – V. 8(№ 3). – PP.125-127.
49.	Талипов Ф.М., Султанова Н.В., Джурабеков У.С. Диффузия самария в кремнии // Сб. научных трудов «Физика полупроводников и кристаллов». – Ташкент, 1990. – С. 91-93.
50.	Адамбаев К., Базарбаев М.И., Иминов А.А., Назыров Д.Э. Диффузия иттрия, самария и гадолиния в кремнии // Сб. тезисов докладов «III республиканской конференции по физической электронике». – Ташкент, 2002. – С. 135.
51.	Назыров Д.Э., Базарбаев М.И., Иминов А.А. Диффузия иттрия в кремнии // Физика и техника полупроводников. – Санкт–Петербург, 2006. – Т. 40. – В. 7. – С. 788-789. Перевод: Nazyrov D.E., Bazarbaev M.I., Iminov A.A. Diffusion of yttrium in silicon // Semiconductors. – New York, 2006. – V. 40. – № 7. – PP. 768-769.
52.	Коновалов В.А., Богач Н.В., Самойленко В.Г., Астраханцев А.В. Рекомбинационные свойства диффузионных слоев кремния, легированного гадолинием // Материалы IV международного научно-технического семинара «Пути повышения стабильности микроэлементов и микросхем». – Рязань, 16-18 июля 1987 г. – С. 33-34.
53.	Уханов Ю.И. Оптические свойства полупроводников. – Москва: Наука, 1977. – 368 с.
54.	Jap. J. Appl. Phys. – Tokyo, 1978. – V. 17. – № 5. – PP. 955-956.
55.	Appl. Phys. Lett. – New York, 1976. – V. 29. – № 12. – PP. 770-772.
56.	Бобохужаев К.У., Базарбаев М.И., Назыров Д.Э., Солиев А.З. Взаимодействие редкоземельных элементов с кислородом в кремнии. Материалы республиканской научно-технической конференции. Нукус, 23-24 ноября 2011 г. С.151-153.
57.	Бобохужаев К.У., Комилов М.М., Солиев А.З. Свойства кремния, ионноимплантированного иттербием. “Физика фаниниг бугунги

	ривожда истеъдодли ёшларнинг ўрни”. Ёш олимлар ва иқтидорли талабалар илмий анжумани материаллари. Т., 27-28 апрель 2012 йил. 174-179 бетлар.
58.	Бобохужаев К.У., Атаханова Ш., Базарбаев М.И., Ёқуббоев А.А., Солиев А.З. , Назыров Д.Э. Влияние термических обработок на свойства кремния, легированного редкоземельными элементами “Физика фанининг ривожда истеъдодли ёшларнинг ўрни” республика илмий-амалий конференцияси (РИАК-6) материаллари. Т., 2013 йил, 26-27 апрель. 88-90 бетлар.
59.	Зайнабидинов С., Назыров Д.Э., Хамиджонов И.Х., Бобохужаев К.У., Солиев А.З., Гончаров С.А., Суворов А.В. Изучение профиля распределения степени разупорядоченности ионноимплантированного иттербием слоя кремния. Т. 2013. №2-1. «Вестник НУУз». С.82-85.