

**NAMANGAN DAVLAT TEXNIKA UNIVERSITETI**  
**HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI**  
**PhD.03/30.11.2022.FM/T.66.04 RAQAMLI ILMIY KENGASH**  

---

**TOSHKENT DAVLAT TEXNIKA UNIVERSITETI**

**TOSHEV ALISHER RAXMATULLAYEVICH**

**KREMNIY ASOSIDAGI QUYOSH ELEMENTLARI PARAMETRLARIGA**  
**IZOVALENT VA NODIR YER ELEMENTLARINING TA'SIRI**

**01.04.10 – Yarimo'tkazgichlar fizikasi**

**FIZIKA – MATEMATIKA FANLARI BO'YICHA FALSAFA DOKTORI (PhD)**  
**DISSERTASIYASI AVTOREFERATI**

**Namangan – 2025**

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

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

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

**Toshev Alisher Raxmatullayevich**

Kremniy asosidagi quyosh elementlari parametrlariga izovalent va  
nodir yer elementlarining ta'siri ..... 3

**Тошев Алишер Рахматуллаевич**

Влияние изовалентных и редкоземельных элементов на  
параметры солнечных элементов на основе кремния..... 19

**Toshev Alisher Rakhmatullaevich**

Influence of isovalence and rare-earth elements on the parameters of  
solar cells based on silicon..... 37

**E'lon qilingan ishlar ro'yxati**

Список опубликованных работ  
List of published works ..... 41

**NAMANGAN DAVLAT TEXNIKA UNIVERSITETI  
HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI  
PhD.03/30.11.2022.FM/T.66.04 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

---

**TOSHKENT DAVLAT TEXNIKA UNIVERSITETI**

**TOSHEV ALISHER RAXMATULLAYEVICH**

**KREMNIY ASOSIDAGI QUYOSH ELEMENTLARI  
PARAMETRLARIGA IZOVALENT VA NODIR YER  
ELEMENTLARINING TA'SIRI**

**01.04.10 – Yarimo'tkazgichlar fizikasi**

**FIZIKA – MATEMATIKA FANLARI BO'YICHA FALSAFA DOKTORI (PhD)  
DISSERTASIYASI AVTOREFERATI**

**Namangan – 2025**

**Fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalari vazirligi huzuridagi Oliy Attestatsiya komissiyasida № B2021.2.PhD/T2222 raqam bilan ro'yxatga olingan.**

Dissertatsiya Toshkent davlat texnika universitetida bajarilgan.

Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o'zbek, rus, ingliz (rezyume)) Ilmiy kengashning veb-sahifasiga ([www.namdtu.uz](http://www.namdtu.uz)) va Ziyonet axborot-ta'lim portaliga ([www.ziyonet.uz](http://www.ziyonet.uz)) joylashtirilgan.

**Ilmiy rahbar:**

**Egamberdiyev Baxrom Egamberdiyevich**  
fizika-matematika fanlari doktori, professor

**Rasmiy opponentlar:**

**Zaynobiddinov Sirojiddin Zaynobiddinovich**  
fizika-matematika fanlari doktori, O'zR FA akademigi

**Abduraxmonov Qaxxor Fataxovich**  
fizika-matematika fanlari doktori, professor

**Yetakchi tashkilot:**

**O'zbekiston milliy universiteti.**

Dissertatsiya himoyasi Namangan davlat texnika universiteti huzuridagi ilmiy darajalar beruvchi PhD.03/30.11.2022.FM/T.66.04 raqamli Ilmiy kengashning 2025 yil 24 oktyabr soat 11<sup>00</sup> dagi majlisida bo'lib o'tadi. (Manzil: 160115, Namangan shahri, Islom Karimov ko'chasi, 12-uy. Tel./faks: (99869) 225-10-07; (99869) 225-76-75, e-mail: info@namdtu.uz, Namangan davlat texnika universiteti 6-bino, 1-qavat, ilmiy kengash xonasi)

Dissertatsiya bilan Namangan davlat texnika universitetining Axborot-resurs markazida tanishish mumkin. (№ \_\_\_\_ raqam bilan ro'yxatga olingan.) Manzil: 160115, Namangan shahri, I.Karimov ko'chasi, 12-uy. Tel: (99869) 225-10-07.

Dissertatsiya avtoreferati 2025-yil 9 oktyabr kuni tarqatildi.  
(2025-yil 9 oktyabrdagi № 6 raqamli reestr bayonnomasi.)

**U.I. Erkaboyev**

Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy  
kengash raisi, f.-m.f.d., professor

**A.A. Abdukarimov**

Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy  
kengash ilmiy kotibi, PhD, dotsent

**N.Yu.Shariboyev**

Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy  
kengash qoshidagi ilmiy seminar raisi,  
f.-m.f.d., professor

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

**Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati.** Jahonda, energiya iste'molining kamida 30–35% qayta tiklanadigan manbalar hisobiga ta'minlash uchun muqobil va qayta tiklanadigan energiya manbalariga bo'lgan ehtiyoj tobora ortib bormoqda. Ularga bo'lgan qiziqishning ortishi, bir tomondan, ekologik nuqtai nazardan bo'lsa, ikkinchi tomondan, ananaviy yer resurslarining cheklanganligi bilan bog'liqdir. Muqobil energiya manbalari orasida quyosh energiyasining fotoelektrik konvertorlari alohida o'rin tutadi. Biroq, quyosh batareyalarining yuqori narxi yaqin vaqtgacha ularni zarur bo'lmagan hollarda ishlatishga to'sqinlik qildi. Shu jihatdan, izovalent elementlar va nodir yer elementlari yordamida kremniyning elektron zonalari kengligini boshqarish, yorug'likni qayta taqsimlash hamda ushbu kremniy asosidagi panellarning fotoyutilish spektrini kengaytirish natijasida ko'proq quyosh nurlarini elektr energiyasiga aylantirish imkoniyatlaridan foydalanib, yuqori samarali yarimo'tkazgichli materiallarni yaratish muhim ahamiyat kasb etadi.

Jahonda quyosh elementlarining samaradorligini oshirish uchun geteroo'tishli strukturalar olish, nur qaytarish qatlamlarini va ikki tomonlama  $p-n$  o'tishlarini hosil qilish kabi yangi ilmiy-texnik yechimlarini ishlab chiqishga yo'naltirilgan ilmiy-tadqiqot ishlari olib borilmoqda. Bu borada, issiqlikka barqaror va radiatsiyaga chidamli material olish uchun izovalent kirishmalar va noyob yer elementlarining optimal kontsentratsiyasini aniqlash, nazorat quyosh elementi va izovalent kirishmali quyosh elementlari parametrlariga konsentratsiyalangan quyosh nurlari va haroratning ta'sirlarini o'rganish, nodir yer elementlari bilan legirlangan kremniy asosidagi quyosh elementlarining radiatsiyaga turg'unligini tadqiq etish, kremniy asosida nodir yer elementlari bilan legirlangan quyosh elementlari parametrlariga mexanik bosimning ta'sirini aniqlash hamda uning texnologik jarayoni, parametrlari va ishlash rejimlarini asoslashga alohida e'tibor berilmoqda.

Respublikamizda qayta tiklanuvchan va muqobil energiya manbalaridan foydalanishga alohida e'tibor qaratilib, xususan quyosh batareyalaridan samarali foydalanish bo'yicha davlat dasturi yuzasidan keng qamrovli chora-tadbirlar amalga oshirilib, muayyan natijalarga erishilmoqda. O'zbekiston Respublikasi Prezidentining "Fizika sohasida ta'lim sifatini oshirish va ilmiy tadqiqotlarni rivojlantirish chora-tadbirlari to'g'risida"<sup>1</sup>gi PQ-5032-son qarorida "...fizika va ishlab chiqarish sohasidagi ilmiy tadqiqotlar o'rtasidagi uzviy bog'liqlikni ta'minlash, iqtisodiyot tarmoqlaridagi muammolarni hal etishga qaratilgan ilmiy ishlar ko'lamini kengaytirish; ilmiy-tadqiqot va amaliy faoliyat samaradorligini oshirish hamda ilmiy-tadqiqot ishlari samaradorligini oshirish" bo'yicha muhim vazifalar belgilab berilgan. Ushbu vazifalarini amalga oshirishda, jumladan, sohada energiya sarfini tejash va tannarxini pasaytirish imkonini beruvchi kam energiya sarflaydigan yangi funksional imkoniyatlarga ega yangi yarimo'tkazgichli qurilmalarni yaratish katta ilmiy ahamiyat kasb etmoqda.

---

<sup>1</sup> [O'zbekiston Respublikasi Prezidentining PQ-5032-son 19.03.2021. Fizika sohasidagi ta'lim sifatini oshirish va ilmiy tadqiqotlarni rivojlantirish chora-tadbirlari to'g'risidagi qarori](#)

O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2017 yil 7 fevraldagi PF–4997-sonli «O‘zbekiston Respublikasini yanada rivojlantirish bo‘yicha Harakatlar strategiyasi to‘g‘risida»<sup>2</sup>gi Farmonini va 2010 yil 15 dekabrda PQ – 1442-son «2011–2015 yillarda O‘zbekiston Respublikasi sanoatini rivojlantirishning ustuvor yo‘nalishlari to‘g‘risida»<sup>2</sup>gi, 2017 yil 17 fevraldagi PQ–2789-son «Fanlar akademiyasi faoliyati, ilmiy tadqiqot ishlarini tashkil etish, boshqarish va moliyalashtirishni yanada takomillashtirish chora-tadbirlari to‘g‘risida»<sup>3</sup>gi va 2021 yil 19 martdagi PQ-5032-son “fizika sohasidagi ta’lim sifatini oshirish va ilmiy tadqiqotlarni rivojlantirish chora-tadbirlari to‘g‘risida”<sup>4</sup>gi Qarorlari hamda mazkur faoliyatga tegishli boshqa me‘yoriy-huquqiy hujjatlarda belgilangan vazifalarni amalga oshirishga ushbu dissertasiya tadqiqoti muayyan darajada xizmat qiladi.

**Tadqiqotning respublikada fan va texnologiyalar rivojlanishining ustuvor yo‘nalishlariga mosligi.** Mazkur tadqiqot ishi respublika fan va texnologiyalar rivojlanishining F2 «Fizika, astronomiya, energetika va mashinasozlik» ustuvor yo‘nalishi doirasida bajarilgan.

**Muammoning o‘rganilganlik darajasi.** Ekstremal sharoitlarda ishlaydigan fotoelementlarni ishlab chiqish bilan xoriyda K. Yamamoto, K. Yoshikawa (Yaponiya), A. Richter, M. Hörteis, J. Benick (Germaniya), V.M. Andreyev, A.G. Kazanskiy (Rossiya), S.K. Lazaruk, A.V. Mudriy (Ukraina), Jicheng Zhou, Yong Tan (Xitoy) lar shug‘ullanishgan. J. Schmidt va boshqalar yangi avlod sanoat kremniyli quyosh elementlarining kirishma atomlari bilan bog‘liq cheklovlar bo‘yicha tadqiqot qilishgan. F. Feldmann, M. Bivuur va boshqalar yuqori samarali n-tipli kremniyli quyosh elementlari uchun passivlashtirilgan orqa kontaktlar yuqori interfeysli passivatsiya sifati va mukammal transport xususiyatlarini o‘rganishgan. C. L. Shilling va uning shogirdlari GaAs geteroo‘tishli quyosh elementlarida fotonlarni qayta ishlash va konsentrlangan yoritishni birlashtirish bo‘yicha ilmiy izlanishlar olib borishgan.

O‘zbekistonlik olimlardan akademiklar M.K.Bahodirxonov, S.Z. Zaynobiddinov, M.S.Saidov, R.A.Muminov hamda taniqli fan doktorlari K.P.Abdurahmonov, G.Gulyamov, M.N.Tursunov, Sh.B.Utamurodova va D.E.Nazirovlarning ilmiy maktablarida yarimo‘tkazgichli quyosh elementlarini olishning geteroo‘tishli va legirlash texnologiyalarini yaratish bo‘yicha ilmiy tadqiqotlar olib borilgan. Ayniqsa kirishma atomlarining quyosh elementlari parametrlariga ta’sirini o‘rganish bo‘yicha M.K.Bahodirxonovning ilmiy maktabida ahamiyatga loyiq ilmiy tadqiqot ishlari amalga oshirilgan. S.Z.Zaynobiddinov va D.E.Nazirovlarning ilmiy ishlarida kremniyda nodir yer elementlarining diffuziya texnologiyasini yaratishda keng qamrovli ishlar olib borilgan. R.A.Muminov va M.N.Tursunovlar kremniy quyosh batareyalariga asoslangan fototermal elektr batareyalar yaratish bo‘yicha izlanishlar o‘tkazgan. Shu bilan birga, o‘tkazilgan nazariy va tajriba tadqiqotlarining natijalari tahlili shuni ko‘rsatadiki, kremniy asosidagi quyosh elementlari parametrlariga izovalent va nodir yer elementlarining ta’siri yetarli darajada o‘rganilmagan.

---

<sup>2</sup> <https://lex.uz/docs/-3307879>

<sup>3</sup> <https://lex.uz/docs/-3117025>

<sup>4</sup> <https://lex.uz/uz/docs/-5338558>

**Dissertatsiya tadqiqotning dissertatsiya bajarilgan oliy ta'lim va ilmiy-tadqiqot muassasasining ilmiy-tadqiqot ishlari rejalari bilan bog'liqligi.** Dissertatsiya ishi Toshkent davlat texnika universiteti ilmiy-tadqiqot ishlari rejasining OT-F2-50 "Kremniy panjarasida  $A^{II}B^{IV}$  va  $A^{III}B^V$  elementar panjaralarni shakllantirishning ilmiy asoslarini ishlab chiqish" (2017-2020 yillar) hamda OT-F2-55 "Kirishma atomlarining nanoklasterlarini shakllantirish asosida hajmli strukturali kremniy olishning ilmiy asoslarini ishlab chiqish" (2017-2020-yillar) mavzularidagi fundamental loyihalar doirasida bajarilgan.

**Tadqiqotning maqsadi** izovalent (Ge, Sn) va nodir yer elementlari (Ho, Gd) ni qo'shimcha legirlashning kremniy quyosh elementlari parametrlariga ta'sirini o'rganish, optimal legirlash sharoitlarini aniqlash va quyosh elementlari barqarorligini oshirishdan iborat.

**Tadqiqotning vazifalari:**

issiqlikka barqaror va radiatsiyaga chidamli material olish uchun izovalent kirishmalar va noyob yer elementlarining optimal kontsentratsiyasini aniqlash;

nazorat quyosh elementi va izovalent kirishmali quyosh elementlari parametrlariga konsentratsiyalangan quyosh nuri va haroratni ta'sirlarini tadqiq etish;

nodir yer elementlari bilan legirlangan kremniy asosidagi quyosh elementlarining radiatsiyaga turg'unligini tadqiq etish;

kremniy asosida nodir yer elementlari bilan legirlangan quyosh elementlari parametrlariga mexanik bosimning ta'sirini aniqlash.

**Tadqiqotning obykti sifatida** kremniy asosidagi quyosh elementlari, izovalent elementlar (Ge, Sn) bilan ligerlangan kremniy materiallari va nodir yer elementlari (Ho, Gd) qo'shilgan kremniy strukturalari olingan.

**Tadqiqotning predmeti** qalay va germaniyning izovalent aralashmalari bilan legirlangan quyosh elementlari, shuningdek, golmiy va gadoliniyning noyob yer elementlari bilan qo'shilgan quyosh elementlarini ishlab chiqarishning texnologik jarayoni hisoblanadi.

**Tadqiqot usullari.** Disertatsiya ishini bajarishda SEM, JEOL JSM 200 LA markali skanerlovchi elektron mikroskop, FSM-1202 markali Furye spektrometri, Ecopia HMS - 3000 markali qurilma asosida Xoll effekti va Van Der Pau usullaridan, UVP-3M vakuum qurulmasidan, JEOL Supper probe JXA-8800 R/RL markali X-nurli mikrozonid tahlil hamda boshqa zamonaviy usullaridan foydalanilgan.

**Tadqiqotning ilmiy yangiligi** quyidagilardan iborat:

kremniy namunalariga Ge atomlarini diffuziyalashdan so'ng  $T=850$  °C da  $t=3$  soat davomida termik ishlov berish natijasida Si/SiGe/Si mikrogeteroo'tishlarini hosil qiluvchi germaniy klasterlarini shakllantirish usuli ishlab chiqilgan;

germaniy va qalay bilan legirlangan kremniyda optimal legirlash konsentratsiyasi ( $1,5 \cdot 10^{18} \div 1,5 \cdot 10^{20}$  sm<sup>-3</sup>) aniqlanib, natijasida quyosh elementlarining foydali ish koeffitsienti 2,5 % ga oshishi asosiy bo'lmagan zaryad tashuvchilar yashash vaqtining sezilarli darajada uzayishi hisobiga ekanligi aniqlangan.

kremniy sirtida va hajmida  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$  binar birikmalar hosil qilish orqali taqiqlangan soha kengligi boshqarilib, quyosh nurlarini yutish spektri infraqizil soha tomon kengaytirilishi natijasida FIK 1,5–2 % ga oshishi isbotlangan;

gadolinij va goliy kabi nodir yer elementlari bilan legirlangan kremniy asosidagi quyosh elementlarining harorat ( $T=30\div 100$  °C) va yuqori radiatsiya ( $10^6\div 10^9$  Rad) sharoitida barqaror ishlashi ta'minlangan;

izovalent va nodir yer elementlari bilan legirlangan kremniy asosidagi quyosh elementlarining samaradorligi, issiqlik va radiatsiyaga chidamliligini tushuntiruvchi yangi fizik mexanizm taklif qilingan.

#### **Tadqiqotning amaliy natijalari:**

Izovalent kirishma atomlari va nodir yer elementlari bilan qo'shimcha ravishda legirlangan kremniy asosidagi quyosh elementlarining samaradorligini oshirish aniqlangan;

Izovalent kirishma atomlari va nodir yer elementlari bilan qo'shimcha legirlash yordamida quyosh elementlari operatsion parametrlarini barqarorlashtirish usuli ishlab chiqilgan;

konsentrlangan quyosh nurlanishida va yuqori radiatsiya sharoitida quyosh elementlarini ishlab chiqarish texnologiyasi shartlari ishlab chiqilgan.

**Tadqiqot natijalarining ishonchliligi** ijobiy sinovdan o'tgan eksperimental usullardan foydalanilganligi va olingan ko'p sonli statistik ahamiyatga ega eksperimental natijalarning yaxshi takrorlanishi, shuningdek, yarimo'tkazgichlarning umumiy qabul qilingan fizik tushunchalaridan foydalanilganligi bilan asoslanadi.

**Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati.** Tadqiqotning ilmiy ahamiyati shundan iboratki, monokristalli kremniyning izovalent va nodir yer elementlari bilan hajmiy legirlanishi, ekstremal tashqi ta'sir sharoitida asosiy bo'lmagan zaryad tashuvchilarning yashash muddatini oshirishga va termodonorlarning hosil bo'lishini kamaytirishi bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati ishlab chiqarilgan quyosh elementlari ishlab chiqarish xarajatlarining kamligi bilan yorug'lik energiyasini elektr energiyasiga aylantirish samaradorligi jihatidan mavjud quyosh elementlaridan kam emas va ba'zi hollarda ularning samaradorligi mavjud bo'lgan analoglardan ancha yuqoriligi aniqlangan. Ular issiqlik va radiatsiyaga qarshiligi yuqori bo'lib, bu ularning xizmat qilish muddatini sezilarli darajada uzaytirilishi bilan izohlanadi.

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

Kremniy asosidagi quyosh elementlari parametrlariga izovalent va nodir yer elementlarining ta'sirini o'rganish bo'yicha olingan natijalar asosida:

Ge va Sn krishmalari bilan ( $1,5 \cdot 10^{18} \div 1,5 \cdot 10^{20}$   $\text{sm}^{-3}$  konsentratsiyali) kremniyning legirlashning optimal texnologik rejimidan foydalanish FOTON aksiyadorlik jamiyatida joriy etildi va qo'llanildi. («UZELTEXSANOAT» aksiyadorlik jamiyatining 03 mart 2023 yildagi 04-3/267-son ma'lumotnomasi). Natijada, yarimo'tkazgich monokristallar asosida ishlab chiqarilgan yarimo'tkazgich asboblarni elektrik parametrlarini barqarorlashtirish hamda noasosiy zaryad tashuvchilarning yashash vaqtini uzaytirish imkonini bergan.

Dissertatsiya ishidan olingan ilmiy natijalar sinovdan o'tkazildi va 2012-2016 yillarda F-2-41 "Har xil tabiatdagi materiallarga (metallar, yarimo'tkazgichlar va dielektriklar) ionlarni implantatsiya qilishda changlanish, atomlarni kiritish, nano o'lchamdagi tuzilmalar va kuchlanishga ega qatlamlarini hosil qilish jarayonlarini nazariy va eksperimental tadqiq etish" nomli fundamental loyihasini bajarishda foydalanildi. (TDTU ning 2021yil 13 sentabrdagi ma'lumotnomasi). Natijada, nano o'lchamli tuzilishga ega, barqaror elektrofizik parametrlarga ega bo'lgan yarimo'tkazgich materialini olish imkonini berdi, bu esa aralashma atomlarini kiritish jarayonlarini eksperimental tadqiqotlar samaradorligini oshirish, ionlarni yarimo'tkazgichga implantatsiya qilish jarayonida nano o'lchamli tuzilmalar va kuchlanish qatlamlarini shakllantirish imkoni yaratilgan.

**Tadqiqot natijalarining aprotatsiyasi.** Dissertatsiya ishining asosiy natijalari 14 ta halqaro va 3 ta respublika ilmiy-amaliy konferensiyalarida muhokamadan o'tkazilgan.

**Tadqiqot natijalarining e'lon qilinganligi.** Dissertatsiya mavzusi bo'yicha jami 26 ta ilmiy ish, shu jumladan O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasining doktorlik dissertatsiyalari asosiy ilmiy natijalarini chop etishga tavsiya etilgan ilmiy nashrlarda 9 ta maqola jumladan 6 tasi scopus jurnallarda va 3 tasi respublika jurnallarda chop etilgan.

**Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi.** Dissertatsiya kirish, to'rt bob, umumiy xulosa va ilovalardan iborat. Ilmiy ish 118 bet mashinkada yozilgan matn, 16 rasm, 5 jadval, 97 nomdagi adabiyotlar ro'yxatini o'z ichiga oladi.

## DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

**Kirish qismi** mavzuning dolzarbligini ko'rsatadi, bu O'zbekiston Respublikasida ham, butun dunyoda ham noan'anaviy muqobil energiya manbalarini rivojlantirish va ulardan foydalanishning dolzarb muammolari bilan bog'liq. Olingan natijalarning yangiligi va amaliy ahamiyati keltiriladi. Dissertatsiyaning tuzilishi, hajmi va uning aprotatsiyasi aks ettirilgan.

**Birinchi bob** barqaror parametrlarga ega kremniy asosidagi samarali quyosh elementlarini ishlab chiqish va yaratish bo'yicha qilingan ishlarning adabiyot sharhiga bag'ishlangan. Kremniy asosli quyosh elementlarini radiatsiyaga chidamli va barqaror issiqlikka dosh beradigan usullari o'rganildi. Kremniy kristall panjarasining asosiy qismidagi IVK va NYE xatti-harakatlari va ularning kremniyning elektrofizik parametrlariga ta'siri tahlil qilindi.

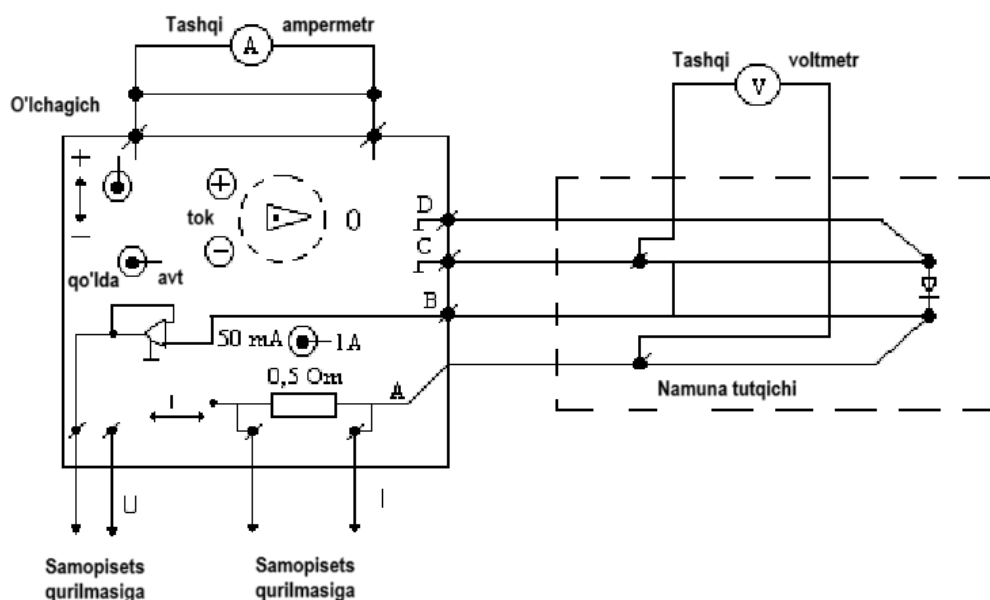
Adabiyotlarni ko'rib chiqishdan ma'lum bo'lishicha, IVK va NYE ning kremniyga kiritilishi uning elektr va fotoelektrik xususiyatlarining zarur kompleksini shakllantirishning istiqbolli usullaridan biridir. Istiqbolli va hali to'liq o'rganilmagan masala - bu turli xil aralashmalar bilan kremniy asosli QE larini qo'shimcha legirlash, kremniy asosli QE parametrlarining samaradorligi va barqarorligini oshirish usulidir.

Keltirilgan eksperimental natijalar shuni ko'rsatadiki, IVK va NYE bilan legirlash yo'li orqali ifloslantiruvchi elementlarning bir xilda getterlash mumkin.

Ko'rib o'tilgan bir qancha ilmiy ishlardan xulosa qilib shuni aytish mumkinki, kremniy asosli turli xil aralashmalar bilan legirlangan quyosh elementlarini qo'shimcha IVK va NYE lar orqali legirlash, uning parametrlarining barqarorligini oshirish imkoniyatini beradi. Qo'shimcha legirlash bo'yicha ilmiy tadqiqotlar o'tkazish maqsadga muvofiq, u kremniy asosidagi quyosh elementlarining parametrlarini yaxshilash va barqarorlashtirish imkonini beradi.

**Ikkinchi bobda** yarimo'tkazgichli plastinkalarni asosiy parametrlarini aniqlashning texnologik usullari va sanoat texnologiyasiga asoslangan kremniy quyosh elementlarini ishlab chiqarish texnologiyasi keltirilgan.

Quyosh radiatsiyasi simulyatori va avtomatlashtirilgan VAX hisoblagichni yaratish va ishlab chiqarish bosqichlari. Yoritish lampasi va korrektorlovchi filtrga asosida quyosh simulyatori yaratildi, 1-rasm. Qat'iy parallel yo'nalishli nurlanishni olish uchun sferik shakldagi qaytaruvchi reflektor va ikkita yassi-qavariq linzalardan tashkil topgan kondansatordan foydalanildi.



**1-rasm. VAX o'lchov asbobining blok sxemasi**

Simulyatorida ishlatiladigan chiroq 300 Vt quvvatga valari "kvazi-tekis" qizdiruvchi spiralga ega, bu esa ma'lum zichlikdagi tok oqimini olish va sinab ko'rilayotgan fotoelement sirtidagi uncha katta bo'lmagan turli xil zichlikdagi nurlanish oqimlarini olish imkonini beradi. Quyosh simulyatori strukturaviy jihatdan, suyuqlik filtrlı portativ yoritgich shaklida qilingan. Yoritish lampasi, shisha filtr, linzalar va qaytaruvchi reflektor ventilyator yordamida havoni sovutish orqali sovutiladi. Sozlanuvchi to'g'rilagich reflektor va stabilizator alohida o'rnatiladi va simlar bilan ulanadi.

Quyosh nurlanishining turli oqimlarida fotokonvertorning volt amperli o'lchov xususiyatlarini o'lchash uchun biz o'lchov vositalarini o'lchanayotgan haqiqiy qiymatlarga ta'sirini istisno qilishga imkon beruvchi sxemani ishlab chiqdik. Qurilma tabiiy sharoitda tushayotgan radiatsiya intensivligini quyosh

elementlari xususiyatlariga, ta'sir qilish vaqtiga va haroratga bog'liqligini o'rganish imkonini beradi. Hisoblagichning ishlashi o'lchanayotgan quyosh elementi orqali tok oqimini o'tkazish va undagi kuchlanishning pasayishini o'lchashga asoslangan. Bunday holda, oqim o'z yo'nalishini o'zgartirishi mumkin, bu qorong'u va yorug'lik shohlarning xam oldinga, xam teskari oqimli volt – amper xususiyatlarini o'rganishga imkon beradi.

**Uchinchi bobda** izovalent aralashmalar va noyob yer elementlarining kremniy asosidagi quyosh elementlari parametrlariga ta'sirini o'rganish natijalari keltirilgan. IVK va NYE bilan qo'shimcha ravishda legirlangan kremniy asosidagi quyosh elementlarining samaradorligini oshirish imkoniyati ko'rsatilgan. IVK, shuningdek, nodir yer elementlarining tayyor quyosh elementlari parametrlariga ta'sirini o'rganish shuni ko'rsatdiki, eng samarali aralashmalar  $N_{Ge} \approx 1,5 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  konsentratsiyasi bo'lgan Ge va  $N_{No} \approx 10^{17} \text{ sm}^{-3}$ , konsentratsiyasi bo'lgan Ho dir. Bu kremniy monokristalini o'sitirish davrida kiritilgan.

Bunday holda, ma'lumki, panjaradagi begona atom yaqinidagi bo'sh joyning hosil bo'lish energiyasi  $\Delta H'_s$ , ga kamayadi, uning qiymati quyidagi ifoda bilan aniqlanadi:

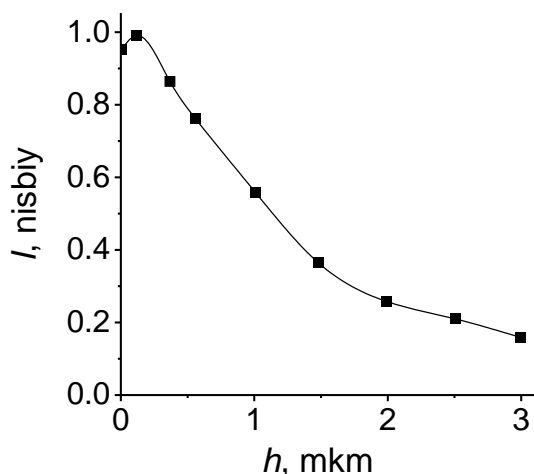
$$\Delta H'_s \approx \frac{6\pi(r_s - r'_s)^2 r'_s}{Z(1 + \alpha)\chi'} \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{(1 + p)\chi r'_s}{2(1 - p)\chi' r'_s} \quad (2)$$

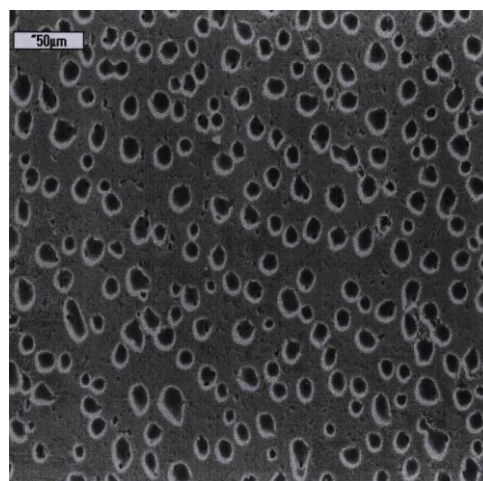
Bu yerda  $\Delta r'_s$  va  $r'_s$ - aralashma atomlari va asosiy atomning kovalent radiuslari,  $\chi'$  va  $\chi$  asosiy va aralashmali moddalarning siqilish qobiliyati, r-Puasson koeffitsiyenti Si, Z-koordinatsiya soni. Formulalardan ko'rinib turibdiki,  $\Delta r'_s$  va  $r'_s$ , dagi farq qanchalik katta bo'lsa  $\Delta H'_s$ , shuncha katta bo'ladi - ya'ni vakansiya hosil bo'lish energiyasi shunchalik kamayadi.

Aniqlanishicha, yuqori samarali va yaxshi takrorlanuvchi parametrlarga ega quyosh elementlarini yaratish uchun  $\rho=0,5 \text{ Om}\cdot\text{sm}$  va  $N_{Ge} \approx 1,5 \cdot 10^{20} \text{ sm}^{-3}$  konsentratsiyali Si<Ge> optimal material hisoblanadi. Optimal konsentratsiyali germaniy bilan legirlangan kremniy asosli quyosh elementlari ishlab chiqilgan bo'lib, ular barqaror ish parametrlariga ega va samaradorlikni o'rtacha 2.1-2.5 % ga oshiradi.

2-rasmda olingan namunalarning sirtga yaqin mintaqasida germaniy atomlarining tarqalishi ko'rsatilgan. Rasmdan ko'rinib turibdiki, 1 mkm chuqurlikgacha, sirtidagi germaniy atomlarining tarkibi kremniy atomlariga qaraganda ko'proq bo'lib uzluksiz  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  qattiq eritmali  $x > 0,5$  ga ega bo'lgan varizon struktura xosil bo'ladi, keyin germaniy atomlarining tarkibi keskin kamayadi va  $d > 3 \text{ mkm}$  da u shunchalik kamayadiki, qurilmaning sezgirliги cheklanganligi sababli, ularning miqdorini aniqlash qiyin. Diffuziya bosqichlari orasidagi isitish tezligini nazorat qilish va diffuziya jarayonida bosqichlarning parametrlarini tanlash orqali kerakli qalinlik va tarkibdagi  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  qattiq eritmasini olish mumkin, ya'ni. 0 dan 1 gacha bo'lgan x qiymatiga ega bo'lgan doimiy  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  qattiq eritmali kremniyning varizon strukturali kremniyini olish mumkin.



**2-rasm. Gyermaniy atomlarining sirt ostida tarqalishi**



**3-rasm.  $T=850\text{ }^{\circ}\text{C}$  da 3 soat davomida qizdirilganda Ge bilan legirlangan kremniyning sirtini fotosurati**

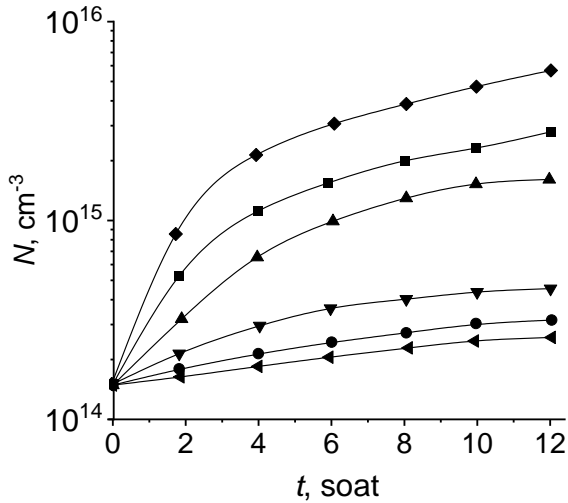
Aniqlanishicha, olingan namunalarni  $700\div 1050\text{ }^{\circ}\text{C}$  haroratda qo‘shimcha qizdirish orqali kremniy panjarasida Si/SiGe/Si mikrogetero - birikmalarini hosil qilish imkonini beradi. Bunday holda, qo‘shimcha termo qizdirishning o‘ziga xos harorati va vaqti muhim rol o‘ynaydi. Si/SiGe/Si mikrogetero - birikmalarini hosil qilish uchun  $850\text{ }^{\circ}\text{C}$  haroratda 3 soat davomida termo qizdirish optimal xolat ekanligi eksperimental tarzda aniqlangan. 3-rasmda kremniyning sirtga yaqin mintaqasida germaniy atomlarining qayta taqsimlanishi va  $850\text{ }^{\circ}\text{C}$  haroratda qo‘shimcha qizdirishdan keyin germaniy klasterlarining shakllanishi ko‘rsatilgan. Eksperimental natijalar shuni ko‘rsatadiki, germaniy atomlarining tuzilishi, konsentratsiyasi va klasterlar o‘lchamlarini sirt va qalinligi bo‘yicha nazorat qilish mumkin.

Aniqlanishicha,  $N_{\text{Ge}} \approx 1,5 \cdot 10^{20}\text{ sm}^{-3}$ , konsentratsiyali germaniy bilan legirlangan kremniy monokristalini  $850\text{ }^{\circ}\text{C}$  da qizdirish shunga olib keladiki, unda Si/SiGe/Si, ichki mikrogetero o‘tishlar xosil bo‘lib, kremniy asosida shu tariqa legirlangan quyosh elementlari samaradorligini qo‘shimcha yana 2,5 % ga oshiradi.

Shulardan ko‘rish mumkinki, Si<No> asosidagi QE lar Ho, bo‘lmagan QE larga qaraganda 1,5÷1,6 % ortiqcha  $I_{kz}$  ga ega ekanligi ko‘rsatilgan va QE parametrlarining takrorlanishi ham yaxshilanadi.

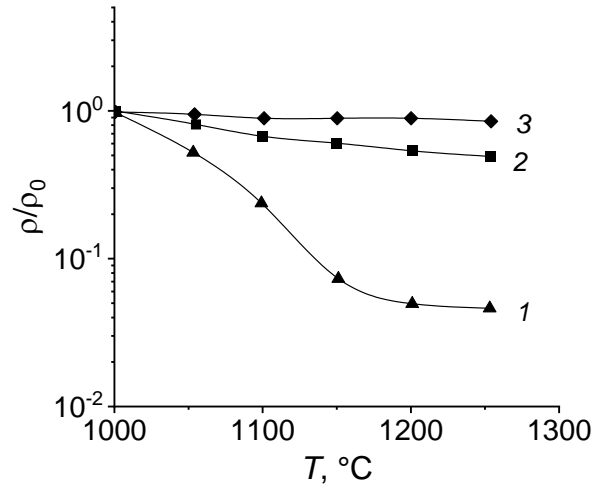
Aniqlanishicha,  $N_{\text{No}} \approx 10^{17}\text{ sm}^{-3}$  konsentratsiyasida an’anaviylarga qaraganda 1,5÷1,6 % ko‘proq samaradorlikka ega fotoelement olish mumkin.

**To‘rtinchi bobda** ishlab chiqilgan quyosh elementlarining parametrlariga tashqi ta’sirlarning ta’sirini o‘rganish natijalari keltirilgan. Qo‘shimcha germaniy atomlarining kremniyga  $T=450\text{ }^{\circ}\text{C}$  da qizdirish orqali kiritilishi natijasida termodonorlarning hosil bo‘lishi va to‘planish tezligini sezilarli darajada kamaytirishi ko‘rsatilgan.

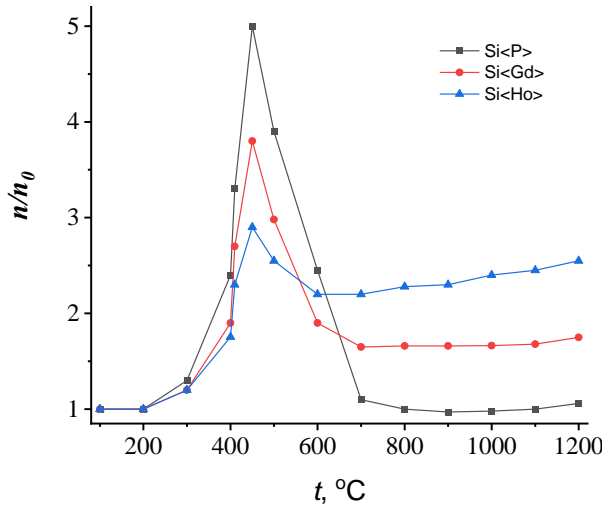


**4-rasm. 450 °C da termodorlar hosil bo'lish kinetikasi**

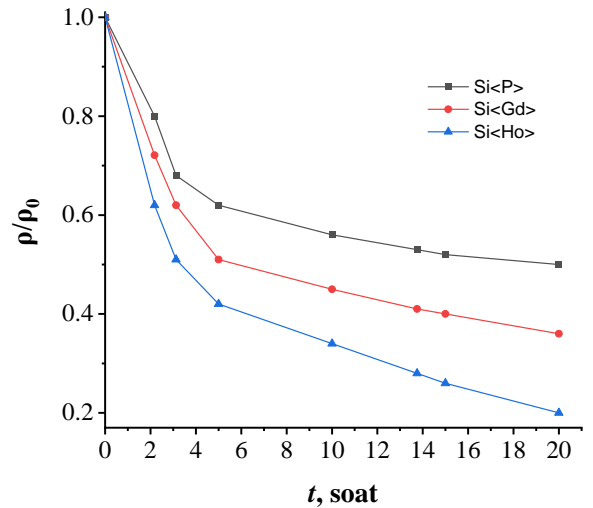
Namunalar : 1 – Si<Sn>  $N_{Sn}=2 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ;  
 2 – Si<Sn>  $N_{Sn}=5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ;  
 3 – Si<P>; 4 – Si<Ge>  $N_{Ge}=1,5 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ;  
 5 – Si<Ge>  $N_{Ge}=6 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ;  
 6 – Si<Ge>  $N_{Ge}=9 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$



**5-rasm. Qizdirish temperaturasi nisbatan namunaning nisbiy qarshiligini o'zgarishi (qizdirish vaqti 10 soat). 1 – Si<P>, 2 – Si<Sn>, 3 – Si<Ge>**



**6-rasm. Termik qizdirish haroratiga qarab zaryad tashuvchilar konsentratsiyasining nisbiy o'zgarishi. Tozalash vaqti  $t=10$  soat. 1 – Si<Ho>; 2 – Si<Gd>; 3 – Si<P>**



**7-rasm. Materialning qizdirish vaqtidan boshlab qarshilikni nisbiy o'zgarishi,  $T=450$  °C. 1 – Si<P>; 2 – Si<Gd>  $N_{Gd}=5 \cdot 10^{17} \text{ sm}^{-3}$ ; 3 – Si<Ho>,  $N_{Ho}=6 \cdot 10^{17} \text{ sm}^{-3}$**

Qiziqarli natijalar germaniy bilan legirlangan kremniy namunalarida olingan (4-rasm, egri chiziqlar 4,5,6). Bunda biz tarkibida  $N_{Ge}=1,5 \cdot 10^{19} \text{ sm}^{-3}$ ,  $6 \cdot 10^{19} \text{ sm}^{-3}$  va  $9 \cdot 10^{19} \text{ sm}^{-3}$  konsentratsiyali germaniy mavjud bo'lgan kremniydan foydalandik.

Olingan ma'lumotlardan ko'rinib turibdiki, bu holda TD generatsiya hosil bo'lishi va ularning to'planishi nazorat namunalariga qaraganda sezilarli darajada kamroq bo'lib, ya'ni termodonorlarni susaytirish ta'siri yuzaga keladi. Shuni ta'kidlash kerakki, bu ta'sir qanchalik kuchli bo'lsa, materialning asosiy qismida germaniy atomlarining konsentratsiyasi shunchalik yuqori bo'ladi.

Shunday qilib, statistik jihatdan ishonchli eksperimental natijalar asosida Si<Ge> namunalarida TD konsentratsiyasi Si<Sn>, namunalariga qaraganda deyarli 1,5 marta kichik, 1) nazorat namunalariga qaraganda ma'lum tartibda past ekanligi aniqlandi. 5-rasmda qizdirish haroratiga qarab namunalarni qarshiligining nisbiy o'zgarishi ko'rsatilgan (qizdirish vaqti 10 soat). 1 – Si<P>, 2 – Si<Sn>, 3 – Si<Ge>. 10 soat ichida termik qizdirish haroratiga qarab zaryad tashuvchilarning konsentratsiyasining nisbiy o'zgarishi 6-rasmda ko'rsatilgan. 7-rasmda  $T= 450 \text{ }^\circ\text{C}$  da qizdirilganda material qarshiligining nisbiy o'zgarishi ko'rsatilgan.

#### 1-jadval

**Si<Ge> namunalardagi asosiy bo'lmagan zaryad tashuvchilarning yashash vaqtini qizdirish haroratiga bog'liqligi,  $N_{Ge} \approx 1,5 \cdot 10^{20} \text{ sm}^{-3}$ , Si<Ho>,  $N_{Ho} = 2 \cdot 10^{17} \text{ sm}^{-3}$ , Si<P>,  $N_P = 4 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-3}$**

Namunalar	Qizdirish temperaturasi, $^\circ\text{C}$				Qizdirish vaqti, soat
	1000	1100	1150	1200	
	$\tau$ , mks	$\tau$ , mks	$\tau$ , mks	$\tau$ , mks	
Si<Ge>	7- 20	8-22	9-25	6-20	5
Si<Ge>	10-25	12-20	10-25	9-18	5
Si<Ge>	15-20	10-25	7-20	10-21	5
Si<Ge>	12-25	8-20	12-20	7-25	5
Si<Ge>	12-30	9-18	10-25	12-20	5
Si<Ho>	15-20	20-30	25-40	25-35	5
Si<Ho>	17-25	17-35	20-35	20-40	5
Si<Ho>	16-20	14-25	25-40	20-40	5
Si<Ho>	15-25	16-30	20-40	25-40	5
Si<Ho>	10-20	20-30	22-38	20-40	5
Si<P>	1 mks ga yaqinroq	1 mks ga yaqinroq	1 mks ga yaqinroq	1 mks ga yaqinroq	5
Si<P>	1 mks ga yaqinroq	1 mks ga yaqinroq	1 mks ga yaqinroq	1 mks ga yaqinroq	5
Si<P>	1 mks ga yaqinroq	1 mks ga yaqinroq	1 mks ga yaqinroq	1 mks ga yaqinroq	5

Germaniy atomlari konsentratsiyasining oshishi bilan termodonorlarni bostirish samaradorligi oshadi. Qalay bilan legirlangan kremniyda teskari ta'sir kuzatiladi, ya'ni qalay termodonorlarning hosil bo'lishini va to'planishini sezilarli darajada kamayadi.

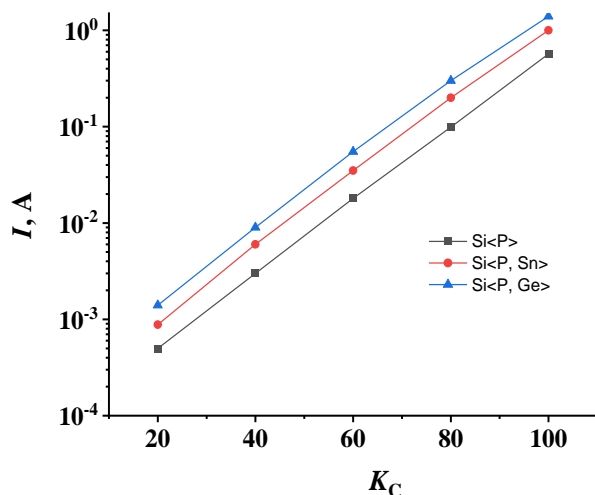
Davomiyligi 20 soatgacha bo'lgan yuqori haroratda ( $1000 \div 1250$  °C) ishlov berishning Si<Ge> va Si<Ho> xossalriga ta'siri o'rganildi. Ko'rsatilganki, IVK (Ge,Sn) mavjud bo'lganda,  $\tau$  va  $\rho$  qizdirish vaqti va haroratidan qat'iy nazar, yetarlicha barqaror bo'lib qoladi.

Ge - bilan legirlangan namunalarda asosiy bo'lmagan zaryad tashuvchilar yashash vaqtining barqarorligi alohida e'tiborga loyiqdir. 1-jadvalda Si<Ge> namunalardagi asosiy bo'lmagan zaryad tashuvchilar yashash vaqtining qizdirish haroratiga bog'liqligi ko'rsatilgan.

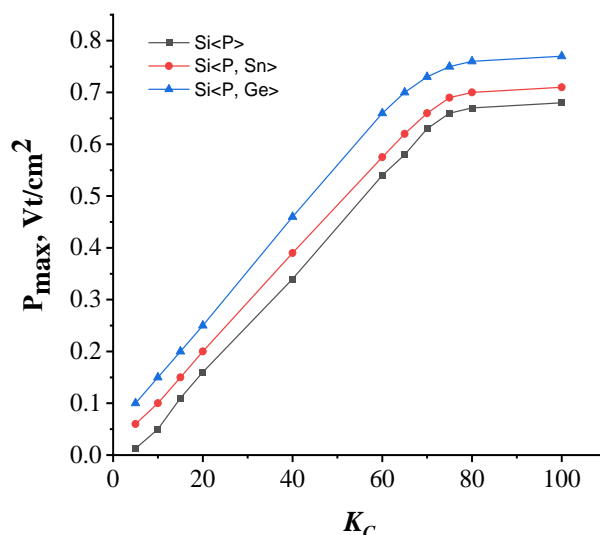
Si<Ge> namunalardagi asosiy bo'lmagan zaryad tashuvchilarning yashash vaqtini qizdirish haroratiga bog'liqligi, bu yerda  $N_{Ge} \approx 1,5 \cdot 10^{20} \text{ sm}^{-3}$  bo'lganda Si<Ho>,  $N_{Ho} = 2 \cdot 10^{17} \text{ sm}^{-3}$ , bo'lganda Si<P>,  $N_P = 4 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-3}$ .

Ma'lum bo'lishicha, kremniyni noyob yer elementlari (Gd, Ho) bilan legirlaganda  $T = 450$  °C da qizdirish paytida TD hosil bo'lishini va to'planishini sezilarli darajada bostiradi. Si<Ho> namunalarda TD ning hosil bo'lish va to'planish tezligi nazorat namunalarga qaraganda 5-10 baravar kam.  $T=1000 \div 1200$  °C yuqori haroratli qizdirish jarayonida goliy Ho tomlari kremniyda muhim rol o'ynashi ko'rsatilgan.

Quyosh elementlarida qisqa tutashuv tokining konsentratsiyalangan quyosh nurlariga bog'liqligi 8-rasmda ko'rsatilgan. Kremniy asosidagi quyosh elementlarining maksimal chiqish quvvatining konsentratsiyalangan quyosh nurlaniga bog'liqligi 9-rasmda ko'rsatilgan.

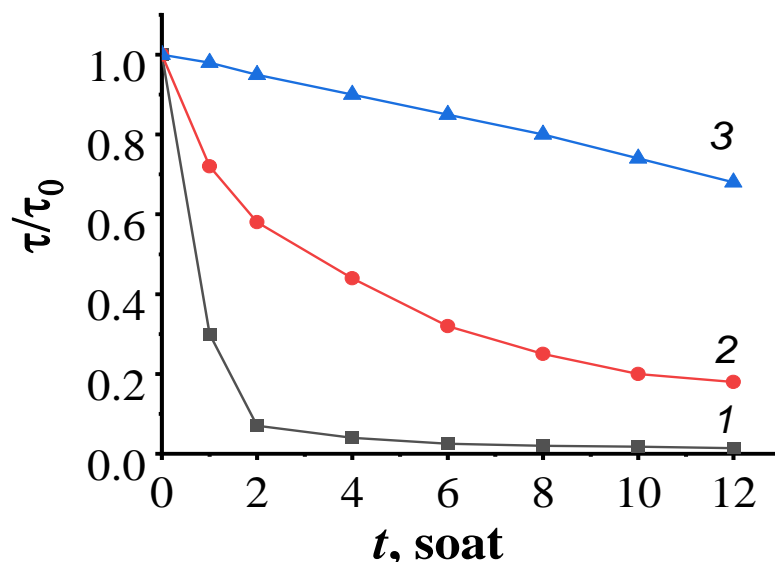


**8-rasm. QE dagi qisqa tutashuv bilan konsentrlangan quyosh nurlari orasidagi bog'liklik**  
1 – Si<P>; 2 – Si<P,Sn>, 3 – Si<P,Ge>



**9-rasm. Kremniy asosli QE maksimal chiqish kuchini konsentrlangan quyosh nurlariga bog'likligi.**  
1 – Si<P>; 2 – Si<P,Sn>, 3 – Si<P,Ge>

Aniqlanishicha, bunday sharoitda barcha quyosh elementlarida  $I_{q.t.}$ ,  $U_{s.Y.}$  kamayishi kuzatiladi. Biroq, eng kichik pasayish Si<Ge> asosidagi quyosh elementlarida kuzatiladi. Si<Ge> asosida quyosh elementlari parametrlarining o'zgarishi nazorat qiluvchi quyosh elementlariga qaraganda deyarli  $2,8 \div 3$  baravar kam. 10-rasmda Si<Ge>, Si<Ho> va nazorat namunalari uchun asosiy bo'lmagan zaryad tashuvchilarning ishlash muddatining  $T=1000\text{ }^{\circ}\text{C}$  da qizdirish vaqtiga bog'liqligi ko'rsatilgan.



**10-rasm. Si<Ge>, Si<Ho> va nazorat namunalari uchun asosiy bo'lmagan zaryad tashuvchilarning yashash vaqti nisbiy o'zgarishlarining  $T=1000\text{ }^{\circ}\text{C}$  da qizdirish vaqtiga bog'liqligi 1 – Si<P>; 2 – Si<P,Ge>; 3 – Si<P,Ho>**

Rasmdan ko'rinib turibdiki, issiqlik bilan ishlov berishdan oldin barcha turdagi materiallar uchun asosiy bo'lmagan zaryad tashuvchilarning yashash vaqti bir xil bo'lgan (32-16 mks), nazorat namunalari asosiy bo'lmagan zaryad tashuvchilarning yashash vaqti issiqlik bilan ishlov berish paytida 1-1,5 soatda 1 mks gacha keskin kamayadi va keyinchalik kamayish asta-sekin davom etadi.

Termik qizdirish oxirida  $\tau$  bir mikrosekunddan kamroq bo'ladi. Shu bilan birga, Si<Ge> namunalari  $\tau$  qizdirish vaqti nisbatan sekin kamayadi va maksimal pasayish  $1,8 \div 2$  martani tashkil qiladi. Si<Ho> namunalari asosiy bo'lmagan zaryad tashuvchilarning yashash vaqti barcha issiqlik bilan ishlov berish vaqtlari uchun eksperimental xato oralig'ida deyarli doimiy bo'lib qoladi. Shunday qilib, germaniy va goliy bilan legirlangan kremniy asosiy bo'lmagan zaryad tashuvchilarning yashash vaqtini ancha barqarorlashtiradi, deb aytishimiz mumkin.

Shuni ta'kidlash lozimki, kremniydagi kislorodning harakatini belgilaydigan mexanizmlar bo'yicha yagona fikr mavjud emas, garchi termo donorlarning hosil bo'lish nazariyasi Kayzer modeliga asoslansa xam, bu yerda past haroratda qizdirish kislorodning elektr faolligini o'zgarishiga olib kelsa xam, bu kremniy

panjarasidagi kislorod holatining o'zgarishi natijasidir. Elektr faol bo'lishi uchun kislorod atomi kremniy panjarasi tugunidagi kremniy o'rnini egallashi kerak ya'ni, kremniy atomi bilan almashinadi. Odatda, kislorod kremniyda oraliq pozitsiyalarni egallab, guruhlarni hosil qiladi<sup>5</sup>:



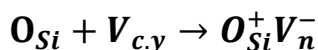
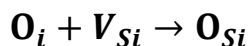
Aynan shu guruhlarning assimetrik tebranishlari to'lqin uzunligi 9,1 mkm bo'lgan infraqizil assimilyasiya chizig'ining paydo bo'lishiga olib keladi. 8,4 mkm to'lqin uzunligidagi yutilish zonasi SiO<sub>2</sub> presipitatlari bilan aniqlanadi. Kislorodning bu ikki holati – bog'lanish orasi va presipitata (ya'ni, SiO<sub>2</sub> shaklidagi kremniy bilan muvozanatli birikmada) - kristalda kislorod mavjudligining ikkita oddiy shakliga to'g'ri kelganligi sababli, kristaldagi kislorod holatini aniqlashda infraqizil yutilishni o'lchash usulidan samarali foydalanish mumkin.

Kislorodning oraliq bog'lanish shakldan presipitata shakliga o'tishi bir nechta oraliq holatlarning shakllanishi bilan sodir bo'lishi mumkin:



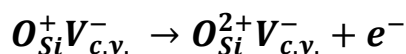
(oraliq bog'lanish)                      (presipitat)

Ushbu oraliq holatlarning ba'zilar elektr faol bo'lishi mumkin, ya'ni kristallga donor holatlarini beradi. Shu bilan birga, donorning shakllanishi quyidagi reaksiyalar bo'yicha kislorod va vakansiyalarning bevosita o'zaro ta'siri natijasi bo'lgan modellar ham mavjud:

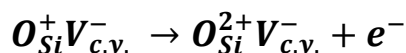


bu yerda  $\text{O}_i$  – oraliq bog'lanishli kislorod;  $\text{O}_{\text{Si}}$  - panjara joyidagi kislorod atomi;  $V_{\text{c.y.}}$  - tugun kislorodi yonida joylashgan bo'sh joy (c.y. - qo'shni tugun).

Birinchi reaksiya oraliq bog'lanishdagi kislorodni tugun kislorodiga aylantiradi. Ikkinchi reaksiyada bu tugun kislorod atomi eng yaqin qo'shni bo'sh joy ( $V_{\text{c.y.}}$ ), bilan birlashadi, kislorod esa bo'sh joyga o'zining valentlik elektronlaridan birini “beradi” va quyidagi “reaksiya” ga muvofiq termodonor bo'lib xizmat qilishi mumkin. :



Donorlarning shakllanishi, ushbu modelga ko'ra, umumiy shaklda quyidagicha ifodalanishi mumkin:



bu yerda  $\text{O}_{\text{Si}}$  kremniy bo'shligi yoki ba'zi metallar qabul qiluvchi aralashmaning atomi, masalan,  $\text{Ca}_{\text{Si}}$   $\text{Al}_{\text{Si}}$  va boshqalar.

Demak,  $\text{Si}\langle\text{Ho}\rangle$  asosidagi QE larini nurlanishga chidamliligi legirlanmaganlarinikidan oshadi va bu QE larning parametrlarini deformatsiyaga nisbatan barqaror qiladi.

<sup>5</sup> Zaynobilidov S.Z. Kremniyda chuqur energetik sathlar hosil bo'lishining fizik tamoyillari. – T.: FAN, 1984. – 160 b.

O'sish jarayonida kremniy Ge va Ho kirishma atomlari bilan legirlash optimal texnologik yechim hisoblanadi. Bu usul nodir yer elementlari qo'shilmagan elementlar bilan solishtirganda, texnologiyani murakkablashtirmasdan va qo'shimcha xarajatlarsiz, issiqlik barqarorligi va radiatsiyaga chidamliligiga ega bo'lgan yanada samarali quyosh elementlarini olish imkonini beradi.

### XULOSA

1. Izovalent kirishma atomlari va nodir yer elementlari bilan legirlangan kremniy past haroratlarda eroziyasiz diffuziya texnologiyasi ishlab chiqildi.

Ushbu texnologiya qo'shimcha energiya sarfini talab qilmaydi va ishlab chiqarish jarayonini murakkablashtirmasdan, takrorlanuvchi diffuziya imkoniyatini yaratadi.

2. Germaniy bilan legirlangan kremniy asosidagi quyosh elementlarining foydali ish koeffitsienti (FIK) kovalent radiuslari va bu kirishmalarning konsentratsiyalarining farqi hisobiga nazorat namunalariga nisbatan 2,1–2,5 % ga, golmiy bilan legirlangan namunalarda esa 1,5–1,6 % ga yuqori ekani aniqlandi.

3. Germaniy va golmiy bilan legirlangan kremniy asosidagi quyosh elementlarida asosiy bo'lmagan zaryad tashuvchilarning yashash vaqti ( $\tau$ ) hamda solishtirma qarshilik ( $\rho$ ) yuqori haroratli (1000–1250 °C) va uzoq muddatli (10–20 soat) qizdirishlardan keyin ham termik barqarorligi saqlanib qoldi. Ayniqsa, Si<Ge> asosidagi quyosh elementlarining elektrofizik parametrlaridagi degradatsiya darajasi nazorat namunalariga qaraganda qariyb uch barobar kam ekanligi aniqlandi.

4. Golmiy bilan legirlangan kremniy asosidagi quyosh elementlari yuqori radiatsion muhit va mexanik deformatsiya ta'sirida ham o'z elektrofizik parametrlarini barqaror saqlashi aniqlandi.

5. Izovalent kirishma atomlari va nodir yer elementlari bilan legirlangan kremniy asosidagi quyosh elementlarining samaradorligi, termik barqarorligi va radiatsion chidamliligini tushuntiruvchi fizik mexanizmlar taklif qilindi.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ PhD.03/30.11.2022.FM/T.66.04 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ  
УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ НАМАНГАНСКОМ  
ГОСУДАРСТВЕННОМ ТЕХНИЧЕСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ**  

---

**ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ**

**ТОШЕВ АЛИШЕР РАХМАТУЛЛАЕВИЧ**

**ВЛИЯНИЕ ИЗОВАЛЕНТНЫХ И РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА  
ПАРАМЕТРЫ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ КРЕМНИЯ**

**01.04.10 – физика полупроводников**

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

**Наманган – 2025**

**Тема диссертации доктора философии наук (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан за № В2021.2.PhD/T2222.**

Диссертация выполнена в Ташкентском государственном техническом университете. Автореферат диссертации на трех языках (узбекском, русском, английском (резюме)) размещен на веб-странице Научного совета ([www.namdtu.uz](http://www.namdtu.uz)) и на Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» ([www.ziyo.net](http://www.ziyo.net)).

**Научный руководитель:** **Эгамбердиев Бахром Эгамбердиевич**  
доктор физико-математических наук, профессор

**Официальные оппоненты:** **Зайнобиддинов Сирожиддин Зайнобиддинович**  
доктор физико-математических наук, академик АН РУз

**Абдурахмонов Каххор Фатахович**  
Доктор физико-математических наук, профессор

**Ведущая организация:** **Национальный университет Узбекистана**

Защита диссертации состоится 24 октября 2025 года в 11:00 часов на заседании Научного совета по присуждению ученых степеней PhD.03/30.11.2022.FM/T/66/04 при Наманганском государственном техническом университете. (Адрес: 160115, г. Наманган, ул. Ислама Каримова - 12. Наманганский государственный технический университет, здание 6, 1-й этаж, кабинет Научного совета, Тел/факс: (99869) 225-10-07; Факс: (99869) 225-76-75. e-mail: info@namdtu.uz)

С диссертацией можно ознакомиться в информационно-ресурсном центре Наманганского государственного технического университета (зарегистрирована за №\_\_ ) по адресу: 160115, г. Наманган, ул. Ислама Каримова - 12, Тел. (99869) 228-76-70.

Автореферат диссертации разослан 9 октября 2025 года.  
(реестр протокола рассылки № 6 от 9 октября 2025 года).

**У.И.Эркабоев**  
председатель Научного совета  
по присуждению ученых степеней,  
д.ф.-м.н., профессор

**А.А.Абдукаримов**  
ученый секретарь Научного совета  
по присуждению ученых степеней,  
PhD, доцент

**Н.Ю.Шарибоев**  
председатель научного семинара  
при Научном совете по присуждению  
ученых степеней, д.ф.-м.н., профессор

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

### **Актуальность и востребованность темы диссертации.**

В мире потребность в альтернативных и возобновляемых источниках энергии неуклонно возрастает, чтобы обеспечить не менее 30–35% энергопотребления за счёт возобновляемых ресурсов. Рост интереса к ним связан, с одной стороны, с экологическими соображениями, а с другой — с ограниченностью традиционных земельных ресурсов. Среди альтернативных источников энергии особое место занимают фотоэлектрические преобразователи солнечной энергии. Однако высокая стоимость солнечных батарей до недавнего времени препятствовала их использованию в случаях, когда это не являлось необходимым. В этом отношении важное значение приобретает создание высокоэффективных полупроводниковых материалов за счёт управления шириной электронных зон кремния с помощью изовалентных и редкоземельных элементов, перераспределения света и расширения спектра фотопоглощения на основе таких кремниевых панелей, что позволяет преобразовывать большее количество солнечного излучения в электрическую энергию.

В мире ведутся научно-исследовательские работы, направленные на разработку новых научно-технических решений для повышения эффективности солнечных элементов, таких как создание гетеропереходных структур, отражающих слоёв и двусторонних p-n переходов. В этом направлении особое внимание уделяется определению оптимальной концентрации изовалентных примесей и редкоземельных элементов для получения термостойких и радиационно-устойчивых материалов, изучению влияния концентрированного солнечного излучения и температуры на параметры контрольного солнечного элемента и солнечных элементов с изовалентными примесями, исследованию радиационной стойкости солнечных элементов на основе кремния, легированного редкоземельными элементами, определению влияния механического давления на параметры солнечных элементов на основе кремния, легированного редкоземельными элементами, а также обоснованию технологического процесса, параметров и режимов их работы.

В нашей Республике уделяется особое внимание использованию возобновляемых и альтернативных источников энергии, в частности, эффективному применению солнечных батарей. В рамках государственной программы реализуются широкомасштабные мероприятия, уже достигнуты определённые результаты. В постановлении Президента Республики Узбекистан № ПП-5032 «О мерах по повышению качества образования и развитию научных исследований в области физики»<sup>1</sup> определены важные задачи, такие как: «...обеспечение тесной взаимосвязи между научными исследованиями в области физики и производством, расширение масштабов научных работ, направленных на решение проблем в отраслях экономики;

---

<sup>1</sup> <https://lex.uz/docs/3107042>

повышение эффективности научно-исследовательской и практической деятельности, а также результативности научных исследований». В реализации этих задач особое научное значение приобретает создание новых полупроводниковых устройств с функциональными возможностями, обеспечивающих снижение энергопотребления и себестоимости за счёт экономии энергии.

Настоящее диссертационное исследование в определённой мере служит выполнению задач, обозначенных в Указе Президента Республики Узбекистан от 7 февраля 2017 года № УП–4997 «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан», Постановлении от 15 декабря 2010 года № ПП–1442 «О приоритетных направлениях развития промышленности Республики Узбекистан в 2011–2015 годах»<sup>2</sup>, Постановлении от 17 февраля 2017 года № ПП–2789 «О мерах по дальнейшему совершенствованию деятельности Академии наук, организации, управления и финансирования научно-исследовательских работ»<sup>3</sup>, Постановлении от 19 марта 2021 года № ПП–5032 «О мерах по повышению качества образования и развитию научных исследований в области физики»<sup>4</sup>, а также других нормативно-правовых документах, относящихся к данной сфере деятельности.

**Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики.** Данная научно-исследовательская работа выполнена в рамках приоритетного направления развития науки и технологий республики Ф2 «Физика, астрономия, энергетика и машиностроение».

**Степень изученности проблемы.** Разработкой фотоэлектрических ячеек, работающих в экстремальных условиях, за рубежом занимались К.Ямамото, К. Ёсикава (Япония), А. Рихтер, М. Хёртайс, Й. Беник (Германия), Ж.И. Алферов, В.М. Андреев, А.Г. Казанский (Россия), С.К. Лазарук, А.В. Мудрый (Украина), Чжичэн Чжоу, Юн Тань (Китай). Й. Шмидт и другие изучали ограничения, связанные с внедрением атомов в промышленные кремниевые солнечные элементы нового поколения. Ф. Фельдман, М. Бивуур и другие исследовали пассивированные тыльные контакты для высокоэффективных кремниевых солнечных элементов n-типа с высоким качеством пассивации и превосходными транспортными свойствами. К.Л. Шиллинг и его ученики проводили научные исследования по сочетанию фотонной обработки и концентрированного освещения в гетеропереходных солнечных элементах на основе GaAs.

Среди ученых из Узбекистана академики М.К. Баходирханов, С.З. Зайнобиддинов, М.С. Саидов, Р.А. Муминов, а также известные доктора наук К.П. Абдурахмонов, Г. Гулямов, М.Н. Турсунов, Ш.Б. Утамуродова и Д.Э. Назиров проводили научные исследования по созданию гетеропереходных и легирующих технологий для получения полупроводниковых солнечных

---

<sup>2</sup> <https://lex.uz/docs/1712436>

<sup>3</sup> <https://lex.uz/docs/3117027>

<sup>4</sup> <https://lex.uz/docs/5338560>

элементов. В частности, значительные научные исследования проводились в научной школе М.К. Баходирханова по изучению влияния примесных атомов на параметры солнечных элементов. В научных трудах С.З. Зайнобиддинова и Д.Э. Назирова проведены обширные работы по созданию технологии диффузии редкоземельных элементов в кремний. Р.А. Муминов и М.Н. Турсунов проводили исследования по созданию фототермических электрических батарей на основе кремниевых солнечных элементов. Вместе с тем анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований показывает, что влияние изовалентных и редкоземельных элементов на параметры кремниевых солнечных элементов изучено недостаточно.

**Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего учебного образовательного учреждения, где выполнена диссертация.**

Диссертационная работа выполнена в рамках фундаментальных проектов плана НИР Ташкентского государственного технического университета ОТ-Ф2-50 «Разработке научных основ формирования элементарных ячеек  $A^{IV}$  и  $A^{III}$  в кремниевой решетке» (2017-2020 гг.) и ОТ-Ф2-55 «Разработке научных основ получения объемно-структурированного кремния на основе формирования нанокластеров примесных атомов» (2017-2020 гг.).

**Целью исследования** является изучение влияния дополнительного легирования изовалентными (Ge, Sn) и редкоземельными элементами (Ho, Gd) на параметры кремниевых солнечных элементов, определение оптимальных условий легирования и повышение стабильности солнечных элементов.

**Задачи исследования:**

определить оптимальную концентрацию изовалентных примесей и редкоземельных элементов для получения термостойкого и радиационно-стойкого материала;

изучить влияние концентрированного солнечного света и температуры на параметры солнечных элементов с изовалентными примесями;

исследовать радиационную стойкость кремниевых солнечных элементов, легированных редкоземельными элементами;

определить влияние механического давления на параметры кремниевых солнечных элементов, легированных редкоземельными элементами.

**Объектом исследования** являлись солнечные элементы на основе кремния, кремниевые материалы, легированные изовалентными примесями (Ge, Sn), и кремниевые структуры, легированные редкоземельными элементами (Ho, Gd).

**Предметом исследования** являлся технологический процесс изготовления солнечных элементов, легированных изовалентными примесями оловом и германием, а также редкоземельными элементами гольмием и гадолинием.

**Методы исследования.** При выполнении диссертационной работы использовались СЭМ сканирующий электронный микроскоп JEOL JSM 200

LA, Фурье-спектрометр ФСМ-1202, прибор Escoria HMS - 3000 на основе методов Холла и Ван дер Пау, вакуумный прибор УВП-3М, рентгеноспектральный микрозондовый анализатор JEOL Supper probe JXA-8800 R/RL и другие современные методы.

**Научная новизна исследования** заключается в следующем:

разработан метод формирования кластеров германия, образующих микрогетеропереходы Si/SiGe/Si в результате термической обработки при  $T=850$  °С в течение  $t=3$  ч после диффузии атомов Ge в кремниевые образцы;

определена оптимальная концентрация легирования ( $1,5 \cdot 10^{18} \div 1,5 \cdot 10^{20}$  см<sup>-3</sup>) в кремнии, легированном германием и оловом, в результате чего установлено, что коэффициент полезной работы солнечных элементов увеличивается на 2,5% за счет значительного увеличения времени жизни неосновных носителей заряда;

доказано, что ширина запрещенной зоны определяется образованием бинарных соединений  $Ge_xSi_{1-x}$  на поверхности и в объеме кремния, а расширение спектра поглощения солнечного света в инфракрасную область приводит к увеличению КПД на 1,5–2%;

обеспечена стабильная работа кремниевых солнечных элементов, легированных редкоземельными элементами, такими как гадолиний и гольмий, в условиях высоких температур ( $T=30 \div 100$  °С) и высокой радиации ( $10^6 \div 10^9$  рад);

предложен новый физический механизм, объясняющий эффективность, тепло- и радиационную стойкость кремниевых солнечных элементов, легированных изовалентными и редкоземельными элементами.

**Практические результаты исследования** заключаются в следующем:

установлено, что эффективность солнечных элементов на основе кремния, дополнительно легированных изовалентными атомами легирующих примесей и редкоземельными элементами, повышается соответственно на 2,1-2,5% и 1,5-1.6 % чем в контрольных;

разработан способ стабилизации рабочих параметров солнечных элементов с использованием дополнительного легирования изовалентными атомами легирующих примесей и редкоземельными элементами;

разработаны технологические условия изготовления солнечных элементов для работы в условиях концентрированного солнечного излучения и высокой радиации.

**Достоверность результатов исследований** обеспечивается применением хорошо апробированных экспериментальных методов и хорошей воспроизводимостью большого количества полученных статистически достоверных экспериментальных результатов, а также использованием общепринятых представлений физики полупроводников.

**Научная и практическая значимость результатов исследования.**

Научная значимость исследования обусловлена тем, что объёмное легирование монокристаллического кремния изовалентными примесями и редкоземельными элементами позволяет увеличить время жизни неосновных носителей заряда и снизить генерацию термодоноров при экстремальных

внешних воздействиях.

Практическая значимость результатов исследования заключается в том, что полученные солнечные элементы, при низкой себестоимости производства, не уступают существующим солнечным элементам по эффективности преобразования световой энергии в электрическую, а в ряде случаев их КПД существенно превышает существующие аналоги. Они обладают высокой термо- и радиационной стойкостью, что объясняется значительным продлением срока их службы.

**Внедрение результатов исследования.** На основании результатов, полученных при изучении влияния изовалентных и редкоземельных элементов на параметры кремниевых солнечных элементов:

В АО «ФОТОН» внедрен оптимальный технологический режим легирования кремния примесями Ge и Sn (концентрация  $1,5 \cdot 10^{18} \div 1,5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ ). (Справка №04-3/267 АО «УЗЭЛТЕХСАНОАТ» от 03.03.2023 г.). В результате этого удалось стабилизировать электрофизические параметры и время жизни неосновных носителей заряда полупроводниковых приборов, изготовленных на основе монокристаллов полупроводников и увеличить ресурс их работы.

Метод формирования кластеров германия, образующих микрогетеропереходы Si/SiGe/Si в результате термической обработки при  $T=850^\circ\text{C}$  в течение  $t=3$  ч после диффузии атомов Ge в образцы кремния, был использован при выполнении фундаментального проекта Ф-2-41 «Теоретические и экспериментальные исследования процессов распыления, внедрения атомов, образования наноразмерных структур и напряженных слоев при имплантации ионов в материалы различной природы (металлы, полупроводники и диэлектрики)» (справка ТДТУ от 13 сентября 2021 г.).

В результате удалось получить полупроводниковый материал с наноразмерной структурой и стабильными электрофизическими параметрами, что позволило повысить эффективность экспериментальных исследований процессов внедрения атомов соединений, а также формировать наноразмерные структуры и напряженные слои в процессе ионной имплантации в полупроводник.

**Апробация результатов исследования.** Основные результаты диссертации обсуждались на 14 международных и 3 республиканских научно-практических конференциях.

**Опубликованность результатов исследования.** По теме диссертации опубликовано всего 26 научных работ, включая 9 статей, опубликованных в научных изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов докторских диссертаций. Из них 6 статьи опубликованы в scopus журналах, 3 - в республиканских журналах.

**Структура и объём диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырёх глав, общего заключения и приложений. Объём научной работы

составляет 118 страниц машинописного текста, 16 рисунков, 5 таблиц и список литературы из 97 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Во введении** показана актуальность темы, которая обусловлена остро стоящими в настоящее время проблемами разработки и использования нетрадиционных альтернативных источников энергии как в Республике Узбекистан, так и в целом во всем мире. Приводилась новизна и практическая значимость полученных результатов. Отражена структура, объем диссертации и ее апробация.

**Первая глава** посвящена литературному обзору работ по проблемам разработки и изготовления эффективных солнечных элементов на основе кремния со стабильными электрофизическими параметрами, способам повышения их радиационной устойчивости и термостабильности, анализу поведения изовалентных примесных атомов (ИВП) и редкоземельных элементов (РЗЭ) в объеме кристаллической решетки кремния и их влияния на его электрофизические параметры.

Как следует из литературного обзора внедрение в кремний ИВП и РЗЭ, является одним из перспективных способов формирования необходимых комплексов с новыми электрофизическими и фотоэлектрическими свойствами. В конце главы показано, что не до конца исследованы вопросы, связанные с влиянием дополнительного легирования различными примесными атомами на повышение эффективности и стабильности электрофизических параметров кремниевых СЭ.

Из приведенного обзора существующих экспериментальных результатов следует, что возможно однородное геттерирование загрязняющих элементов путем легирования атомами ИВП и РЗЭ.

Из анализа большого количества литературных работ, показана возможность повышения стабильности электрофизических параметров исходного кремния путем его легирования различными примесными атомами. В конце главы обоснована целесообразность проведения научных исследований по влиянию дополнительного легирования изовалентными примесными атомами (ИВП) и (РЗЭ) на параметры СЭ на основе кремния с целью улучшения их эффективности и стабилизации электрофизических параметров.

**Во второй главе** описаны:

использованные методы при проведении исследований;

технологические методы определения основных электрофизических параметров полупроводниковых пластин;

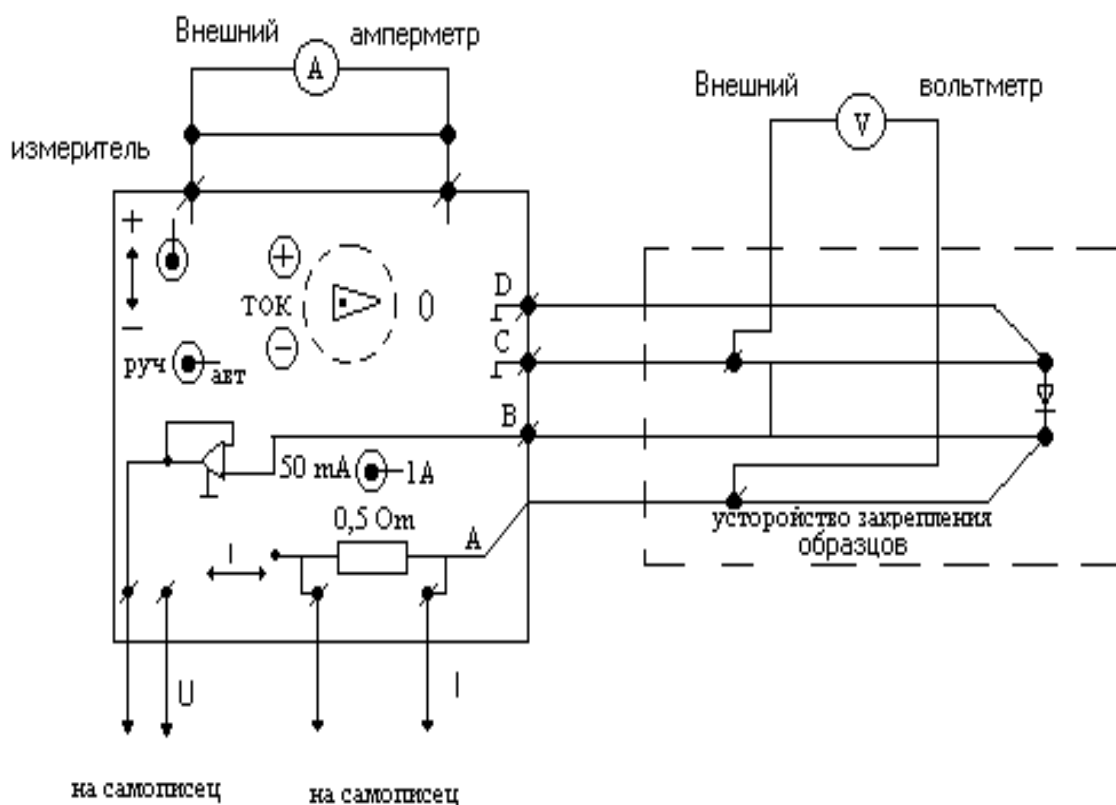
технология изготовления кремниевых СЭ на основе промышленной технологии.

этапы разработки и изготовления имитатора солнечного излучения и автоматизированного измерителя ВАХ СЭ.

даны характеристики имитатора Солнца, изготовленного на основе лампы накаливания и корректирующего фильтра (рис. 1).

Для получения строго параллельного направления излучения использовался сферический отражатель и концентратор, состоящий из двух плосковыпуклых линз. Лампа накаливания, используемая в имитаторе, имеет мощность 300 Вт и "квазиплоскую" спираль накала, что позволяет получить значительную плотность тока излучения и малую неравномерность плотности потока излучения по поверхности испытуемого солнечного элемента. Конструктивно имитатор был выполнен в виде переносного осветителя со съемным жидкостным фильтром. Лампа, стеклянный фильтр, линзы и отражатель охлаждаются с помощью принудительного охлаждения воздушным потоком, создаваемого вентилятором. Регулируемый выпрямитель и стабилизатор установлены отдельно и соединяются проводами.

Для измерения вольтамперных характеристик солнечных элементов при различных потоках солнечного излучения нами разработана схема, позволяющая исключить влияние измерительных приборов на истинные значения снимаемых величин.



**Рис. 1. Блок – схема измерителя ВАХ солнечных элементов**

Устройство позволяет исследовать зависимость характеристик солнечных элементов от интенсивности падающей радиации, длительности экспозиции и температуры в натуральных условиях. Работа измерителя

основана на задании тока через измеряемый солнечный элемент и измерения падения напряжения на нем. При этом ток может менять свое направление, что позволяет изучать как прямые, так и обратные ветви темновых и световых вольтамперных характеристик.

**В третьей главе** приведены результаты исследований влияния изовалентных примесных атомов и редкоземельных элементов на электрофизические параметры кремниевых солнечных элементов. Показана возможность повышения эффективности солнечных элементов на основе кремния, дополнительно легированного атомами ИВП и РЗЭ. Исследование влияния ИВП и РЗЭ на электрофизические параметры готовых солнечных элементов показало, что наиболее эффективными примесными атомами являются Ge с концентрацией  $N_{Ge} \approx 1,5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$  и гольмий (Ho) с концентрацией  $N_{Ho} \approx 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , введенные при выращивании исходного монокристаллического кремния.

При этом, как известно энергия образования вакансии вблизи чужеродного атома в кристаллической решетке уменьшается на  $\Delta H'_s$ , значение которого определяется выражением:

$$\Delta H'_s \approx \frac{6\pi(r_s - r'_s)^2 r'_s}{Z(1 + \alpha)\chi'} \quad (1)$$

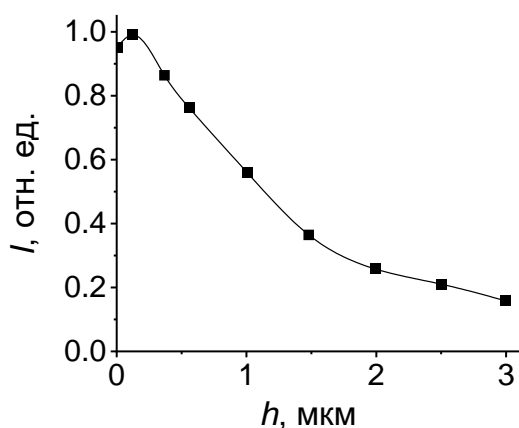
$$\alpha = \frac{(1 + p)\chi r'_s}{2(1 - p)\chi' r_s} \quad (2)$$

Здесь:  $r'_s$  и  $r_s$  - ковалентные радиусы примесного и основного атомов,  $\chi'$  и  $\chi$  - сжимаемости основного и примесного вещества,  $p$  - коэффициент Пуассона,  $Z$  - координационное число. Как видно из формул, чем больше разница между  $r'_s$  и  $r_s$ , тем больше  $\Delta H'_s$  - т.е. тем больше уменьшается энергия образования вакансии.

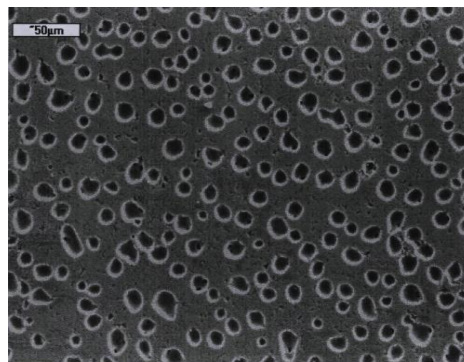
Установлено, что для создания более эффективных солнечных элементов с хорошо воспроизводимыми электрофизическими параметрами, оптимальным материалом является кремний, легированный примесными атомами германия (Si<Ge>) с  $\rho = 0,5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$  и концентрацией  $N_{Ge} \approx 1,5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ . Разработаны солнечные элементы на основе кремния, легированного примесными атомами германия с оптимальной концентрацией, обладающие стабильными эксплуатационными параметрами и повышенной эффективностью в среднем на  $2,1 \div 2,5 \%$  от исходного СЭ.

На рис.2 представлено распределение атомов германия в приповерхностной области кремния. Как видно из рисунка до глубины 1 мкм на поверхности кремния содержание атомов германия больше, чем атомов кремния, т.е. получается варизонная структура на основе непрерывного твердого раствора  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  с  $x > 0,5$ , дальше содержание примесных атомов германия резко снижается и при  $d > 3 \text{ мкм}$  уменьшается настолько, что из-за ограниченности чувствительности прибора их содержание трудно определить.

Управление скоростью нагрева между этапами диффузии и выбор параметров этапов в процессе диффузии позволяют получить твердый раствор  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  необходимой толщины и состава, т.е. можно получить в кремнии варизонную структуру на основе непрерывного твердого раствора  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  со значением  $x$  от 0 до 1.



**Рис. 2. Распределение атомов германия в приповерхностной области кремния**



**Рис. 3. Фотография поверхности кремния, легированного атомами германия (Ge), после термоотжига при  $T=850^\circ\text{C}$ , в течение 3 часов**

Установлено, что дополнительный термоотжиг полученных образцов в интервале температура  $T=700-1050^\circ\text{C}$ , позволяет образовать микрогетеропереходы  $\text{Si}/\text{SiGe}/\text{Si}$  в кристаллической решетке кремния. При этом, существенную роль играет температура и время дополнительного термоотжига. Экспериментально установлено, что для образования микрогетеропереходов типа  $\text{Si}/\text{SiGe}/\text{Si}$  оптимальным является термоотжиг при температуре  $T=850^\circ\text{C}$  в течении  $t=3$  часов. На рис. 3 представлено перераспределение атомов германия на поверхностной области кремния и образование кластеров германия, после дополнительного отжига при температуре  $T=850^\circ\text{C}$ . Результаты экспериментов показывают, что можно управлять структурой, концентрацией и размерами кластеров примесных атомов германия как на поверхности, так и по глубине кремния.

Установлено, что термоотжиг при  $T=850^\circ\text{C}$  монокристаллического кремния, легированного примесными атомами германия с концентрацией  $N_{\text{Ge}} \approx 1,5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ , приводит к образованию внутренних микрогетеропереходов  $\text{Si}/\text{SiGe}/\text{Si}$ , которые дополнительно повышают до 2,5 % эффективность солнечных элементов, изготовленных на их основе.

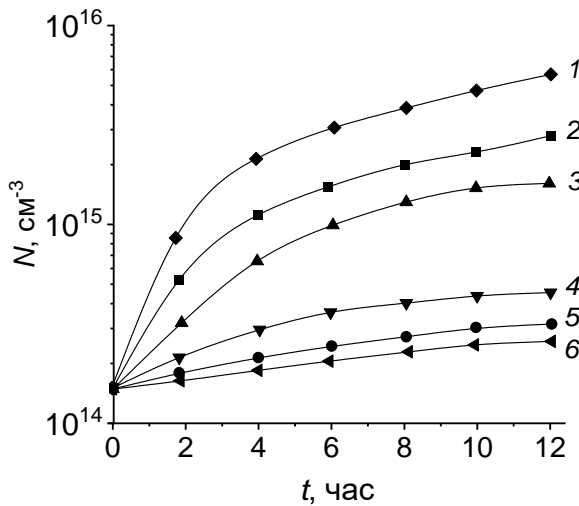
Показано, что СЭ на основе кремния, легированного примесными атомами гольмия ( $\text{Si}\langle\text{Ho}\rangle$ ) ток короткого замыкания  $I_{\text{к.з}}$  обладает на 1,1÷1,4% значения больше, чем СЭ без гольмия, также улучшается воспроизводимость электрофизических параметров СЭ. Установлено, что при концентрации

$N_{Ho} \approx 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , можно получить солнечные элементы с КПД на 1,5÷1,6 % больше, чем исходные СЭ без примесных атомов кремния.

**В четвертой главе** приведены результаты исследования влияния внешних воздействий на электрофизические параметры разработанных солнечных элементов. Показано, что внедрение примесных атомов германия в кремний, существенно уменьшает скорость генерации и накопления термодоноров при температуре отжига  $T=450 \text{ }^\circ\text{C}$ .

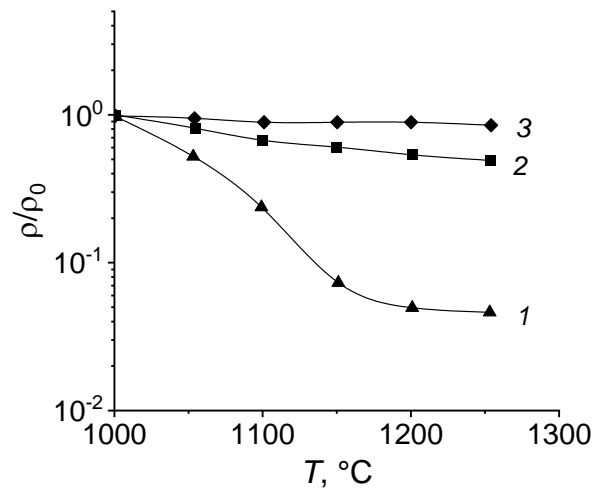
Интересные результаты были получены в образцах кремния, легированных германием (рис. 4. кривые 4,5,6). При этом нами были использованы образцы кремния, которые содержали германий с концентрациями  $N_{Ge}=1,5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ ,  $6 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$  и  $9 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ .

Как видно из полученных данных, в этом случае генерация термодоноров (ТД) и их накопление существенно меньше, чем в контрольных образцах, т.е. происходит эффект гашения генерации термодоноров.



**Рис. 4. Кинетика образования термодоноров при  $T=450 \text{ }^\circ\text{C}$ .**

- 1 – Si<Sn>  $N_{Sn}=2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ;
- 2 – Si<Sn>  $N_{Sn}=5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ;
- 3 – Si<P>; 4 – Si<Ge>
- $N_{Ge}=1,5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ ; 5 – Si<Ge>
- $N_{Ge}=6 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ ;
- 6 – Si<Ge>  $N_{Ge}=9 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$



**Рис. 5. Относительное изменение удельного сопротивления образцов в зависимости от температуры отжига (время отжига  $t=10$  часов).**

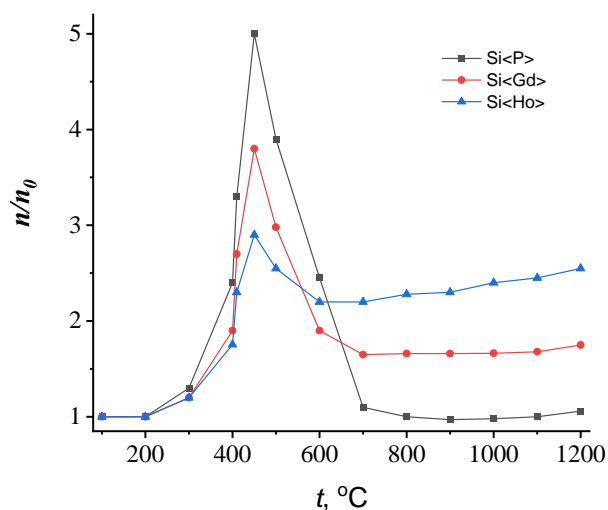
- 1 – Si<P>, 2 – Si<Sn>, 3 – Si<Ge>

Следует отметить, что этот эффект тем сильнее, чем больше концентрация атомов германия в объеме материала. Таким образом, на основе статистически достоверных экспериментальных результатов установлено, что концентрация ТД в образцах Si <Ge> почти на 1,5 порядка

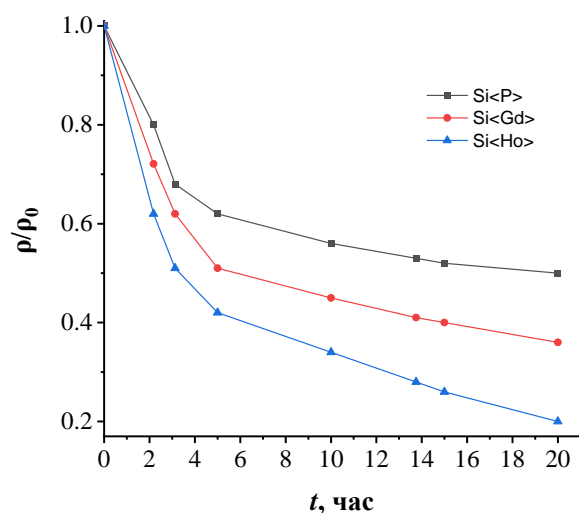
меньше, чем в образцах Si <Sn> и на 1 порядок меньше, чем в контрольных образцах.

На рис. 5. показано относительное изменение удельного сопротивления образцов в зависимости от температуры отжига (время отжига  $t=10$  часов) для образцов: 1-Si<P>, 2-Si<Sn>, 3-Si<Ge>. Относительное изменение концентрации носителей заряда в зависимости от температуры отжига при времени  $t=10$  часов, показано на рис. 6. На рис. 7 показано относительное изменение удельного сопротивления материала от времени отжига при  $T=450$  °C.

Установлено, что с увеличением концентрации атомов германия эффективность подавления термодоноров увеличивается. При легировании кремния примесными атомами олова наблюдается обратный эффект, т.е. олово существенно стимулирует генерацию и накопление термодоноров.



**Рис. 6. Относительное изменение концентрации носителей заряда в зависимости от температуры термоотжига. Время отжига  $t=10$  час. 1 – Si<Ho>; 2 – Si<Gd>; 3 – Si<P>**



**Рис. 7. Относительное изменение удельного сопротивления материала от времени отжига,  $T=450$  °C. 1- Si<P>; 2 – Si<Gd>  $N_{Gd}=5 \cdot 10^{17}$  см<sup>3</sup>; 3 – Si<Ho>,  $N_{Ho} =6 \cdot 10^{17}$  см<sup>3</sup>**

Исследовано влияние высокотемпературной обработки ( $T=1000-1250$  °C) с длительностью до  $t=20$  часов на свойства образцов Si<Ge> и Si<Ho>. Установлено, что при наличии ИВП (Ge, Sn)  $\tau$ - и  $\rho$ - остаются достаточно стабильными, независимо от времени и температуры отжига.

Особенно следует отметить стабильность времени жизни неосновных носителей заряда в образцах кремния, легированных примесными атомами германия. В таблице-1 показана зависимость времени жизни неосновных носителей заряда в образцах Si<Ge> от температуры отжига.

Установлено, что легирование кремния РЗЭ (Gd, Ho) существенно подавляет генерацию и накопление ТД при температуре отжига  $T=450$  °С. В образцах Si<Ho> скорость генерации и накопления ТД в 5÷10 раз меньше, чем в контрольных образцах. Показано, что примесные атомы гольмия Ho в кремнии существенную роль играют при высокотемпературных отжигах в интервале  $T=1000-1200$  °С.

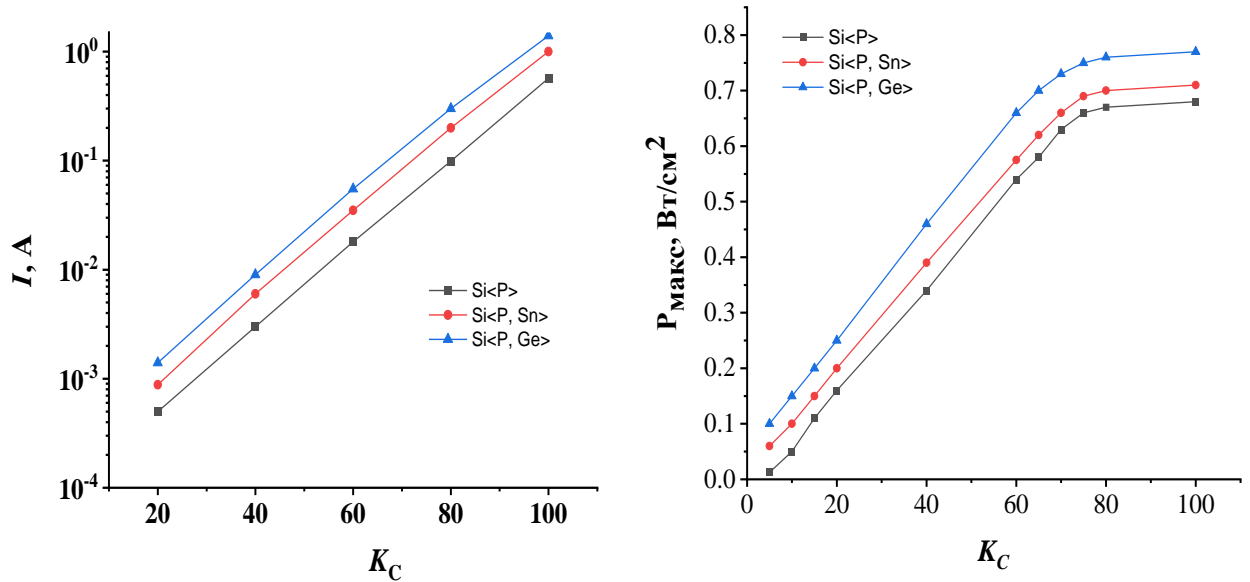
**Зависимость времени жизни неосновных носителей заряда в образцах Si<Ge>, Si<Ho> и Si<P> от температуры отжига, где  $N_{Ho}=2\cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup>,  $N_P = 4\cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup> и  $N_{Ge} \approx 1,5\cdot 10^{20}$  см<sup>-3</sup>.**

**Таблица 1.**

Образцы	Температура отжига, °С.				Время отжига, час
	1000	1100	1150	1200	
	$\tau$ , мкс	$\tau$ , мкс	$\tau$ , мкс	$\tau$ , мкс	
Si<Ge>	7- 20	8-22	9-25	6-20	5
Si<Ge>	10-25	12-20	10-25	9-18	5
Si<Ge>	15-20	10-25	7-20	10-21	5
Si<Ge>	12-25	8-20	12-20	7-25	5
Si<Ge>	12-30	9-18	10-25	12-20	5
Si<Ho>	15-20	20-30	25-40	25-35	5
Si<Ho>	17-25	17-35	20-35	20-40	5
Si<Ho>	16-20	14-25	25-40	20-40	5
Si<Ho>	15-25	16-30	20-40	25-40	5
Si<Ho>	10-20	20-30	22-38	20-40	5
Si<P>	менее 1 мкс	менее 1 мкс	менее 1 мкс	менее 1 мкс	5
Si<P>	менее 1 мкс	менее 1 мкс	менее 1 мкс	менее 1 мкс	5
Si<P>	менее 1 мкс	менее 1 мкс	менее 1 мкс	менее 1 мкс	5

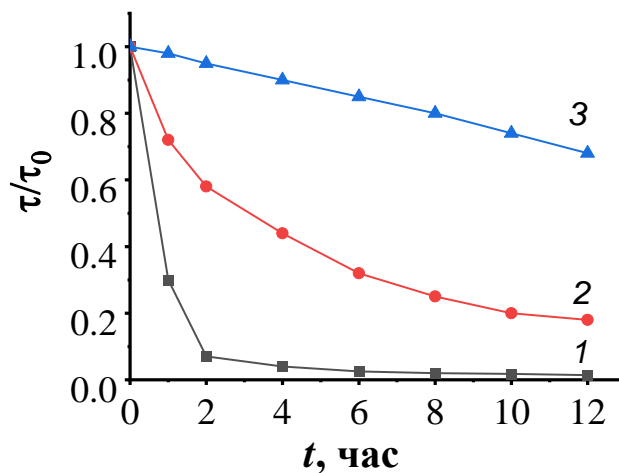
Зависимость тока короткого замыкания СЭ от концентрированного солнечного излучения, показана на рис. 8. Зависимость максимальной выходной мощности кремниевых солнечных элементов от

концентрированного солнечного излучения показана на рис. 9. Установлено, что при таких условиях во всех солнечных элементах наблюдается уменьшение  $I_{к.з.}$  и  $U_{х.х.}$ . Однако наименьшее уменьшение наблюдается в солнечных элементах на основе Si<Ge>. Деградикация параметров солнечных элементов на основе Si<Ge> почти в  $2,8 \div 3$  раза меньше, чем в контрольных солнечных элементах.



**Рис. 8. Зависимость тока короткого замыкания СЭ от концентрированного солнечного излучения.**  
**1 - СЭ на основе Si<P>; 2 – СЭ на основе Si<P, Sn>; 3 – СЭ на основе Si<P, Ge>**

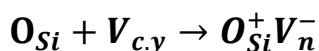
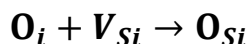
**Рис. 9. Зависимость максимальной выходной мощности кремниевых солнечных элементов от концентрированного солнечного излучения.**  
**1 – Si<P>; 2 – Si<P,Sn>; 3 – Si<P,Ge>**



**Рис. 10. Зависимость относительного изменения времени жизни неосновных носителей заряда от времени термоотжига,  $T=1000$  °С.**  
**1 – Si<P>; 2 – Si<P,Ge>; 3 – Si<P,Ho>**

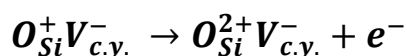


и такие модели, в которых образование доноров является результатом прямого взаимодействия кислорода и вакансий согласно следующим реакциям:

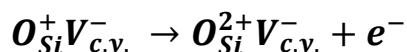


где  $O_i$  - междуузельный кислород;  $O_{Si}$  - атом кислорода в кристаллическом узле решетки;  $V_{c.y.}$  - вакансия, расположенная рядом с узельным кислородом.

Первая реакция переводит междуузельный кислород в узельный. Во второй реакции этот узельный атом кислорода соединяется с ближайшей соседней вакансией ( $V_{c.y.}$ ), при этом кислород "отдает" один из своих валентных электронов вакансии и может служить термодонором в соответствии со следующей "реакцией":



Образование доноров, согласно этой модели, в более общем виде, можно представить как:



где кремниевая вакансия  $O_{Si}$  или атом какой-либо металлической акцепторной примеси, например,  $Ca_{Si}$   $Al_{Si}$  и т.д.

Установлено, что СЭ на основе  $Si\langle Ho \rangle$  обладают повышенной радиационной стойкостью, также параметры данных СЭ являются более стабильными к деформации по сравнению с нелегированных.

Показано, что легирование кремния атомами примесей Ge и Ho в процессе выращивания является оптимальным технологическим решением. Оно позволяет получать более эффективные солнечные элементы, обладающие термостабильностью и радиационной стойкостью, без существенного усложнения технологии и дополнительных затрат по сравнению с элементами без редкоземельных примесей.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана технология безэрозионной диффузии при низких температурах для кремния, легированного изовалентными примесными атомами и редкоземельными элементами. Данная технология не требует дополнительных энергетических затрат, не усложняет производственный процесс и обеспечивает возможность многократного повторения диффузии.

2. Установлено, что коэффициент полезного действия (КПД) солнечных элементов на основе кремния, легированного германием, на 2,1–2,5 % выше из-за разности ковалентных радиусов, а также концентрации этих примесных атомов по сравнению с контрольными образцами, а для образцов, легированных гольмием — на 1,5–1,6 % выше.

3. Показано, что в солнечных элементах на основе кремния, легированного германием и гольмием, время жизни неосновных носителей заряда ( $\tau$ ) и

удельное сопротивление ( $\rho$ ) сохраняют термическую стабильность даже после воздействия высоких температур (1000–1250 °С) и длительного нагрева (10–20 ч). Особенно отмечено, что степень деградации электрофизических параметров солнечных элементов на основе Si<Ge> почти в три раза ниже, чем у контрольных образцов.

4. Установлено, что солнечные элементы на основе кремния, легированные гольмием, сохраняют стабильность электрофизических параметров и в условиях интенсивного радиационного воздействия, и при механических деформациях.

5. Предложены физические механизмы, объясняющие повышение эффективности, термической стабильности и радиационной стойкости солнечных элементов на основе кремния, легированного изовалентными примесными атомами и редкоземельными элементами.

**SCIENTIFIC COUNCIL PhD.03/30.11.2022.FM/T.66.04  
ON AWARDING SCIENTIFIC DEGREES AT THE  
NAMANGAN STATE TECHNICAL UNIVERSITY**

---

**TASHKENT STATE TECHNICAL UNIVERSITY**

**TOSHEV ALISHER RAKHMATULLAEVICH**

**INFLUENCE OF ISOVALENCE AND RARE-EARTH ELEMENTS ON  
THE PARAMETERS OF SOLAR CELLS BASED ON SILICON**

**01.04.10 - Physics of semiconductors**

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

**Namangan – 2025**

**The theme of the dissertation of doctor of philosophy (PhD) on physical and mathematical sciences was registered by the Supreme Attestation Commission under the Ministry of Higher Education, Science, and Innovation of the Republic of Uzbekistan under No. B2021.2.PhD/T2222.**

The dissertation was carried out at the Tashkent State Technical University.

The abstract of the dissertation was posted in three languages (Uzbek, Russian, English (resume)) on the website of Scientific Council at ([www.namdu.uz](http://www.namdu.uz)) and on the website “ZiyoNet” Information and Educational Portal at ([www.ziynet.uz](http://www.ziynet.uz)).

**Scientific supervisor:** **Egamberdiev Bakhrom Egamberdievich**  
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor.

**Official opponents:** **Zaynobiddinov Sirojiddin Zaynobiddinovich**  
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Academician  
of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan

**Abduraxmonov Qaxxor Fataxovich**  
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

**Leading organization:** **National university of Uzbekistan**

The defense of the dissertation will be held at 11:00 on October 24, 2025 at the meeting of Scientific Council PhD.03/30.11.2022.FM/T.66.04 at the Namangan State Technical University. (Address: 160115, Namangan city, I.Karimov Str 12, Building 6, 1st floor, Scientific Council room, phone: (+99869)228-76-68, 225-10-07, Fax: (+99869) 228-76-75. e-mail: [info@namdtu.uz](mailto:info@namdtu.uz))

You can get acquainted with the dissertation work at the Information Resource Center of the Namangan State Technical University (registration number No.\_\_). Address: 160115, Namangan city, I.Karimov Str 12, tel. (+99869) 228-76-68; Fax: (+99869) 228-76-75, e-mail: [info@namdtu.uz](mailto:info@namdtu.uz)

The abstract of the dissertation was sent on October 9, 2025.  
(mailing protocol No. 6 on October 9, 2025)

**U.I. Erkaboyev**

Chairman of the scientific council on awarding scientific degrees, doctor of physical-mathematical sciences, professor

**A.A. Abdukarimov**

Scientific secretary of scientific council  
awarding scientific degrees,  
candidate of physical-mathematical sciences

**N. Y. Shariboyev**

Chairman of the academic seminar under  
the Scientific council awarding scientific degrees,  
doctor of physical-mathematical science, professor

## INTRODUCTION (abstract of the PhD dissertation)

**The aim of the research work** is to study the influence of doping with isovalent (Ge, Sn) and rare-earth elements (Ho, Gd) on the parameters of silicon solar cells, to determine the optimal doping conditions, and to increase the stability of the solar cells.

**The object of the research** were silicon-based solar cells, silicon materials doped with isovalent impurities (Ge, Sn), and silicon structures doped with rare-earth elements (Ho, Gd).

**The scientific novelty of the research** is as follows:

a method has been developed for forming germanium clusters that create Si/SiGe/Si microheterojunctions through thermal processing at  $T=850$  °C for  $t=3$  hours following the diffusion of Ge atoms into silicon samples;

the optimal doping concentration ( $1.5 \cdot 10^{18}$  to  $1.5 \cdot 10^{20}$  cm<sup>-3</sup>) for silicon doped with germanium and tin has been determined. It was established that this leads to a 2.5% increase in the solar cell efficiency, due to a significant increase in the minority charge carrier lifetime;

it has been proven that the band gap is defined by the formation of binary Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub> compounds on the surface and in the bulk of the silicon. The expansion of the sunlight absorption spectrum into the infrared region results in an efficiency increase of 1.5–2%;

Stable operation of silicon solar cells doped with rare-earth elements, such as gadolinium and holmium, has been ensured under conditions of high temperatures ( $T=30 \div 100$  °C) and high radiation ( $10^6$  to  $10^9$  rad).

A new physical mechanism has been proposed to explain the efficiency, thermal and radiation resistance of silicon solar cells doped with isovalent and rare-earth elements.

**Implementation of Research Results.** Based on the results obtained from studying the influence of isovalent and rare-earth elements on the parameters of silicon solar cells:

JSC "PHOTON" has implemented the optimal technological regime for doping silicon with Ge and Sn impurities (concentration  $1.5 \cdot 10^{18} \div 1.5 \cdot 10^{20}$  cm<sup>-3</sup>). (Reference No. 04-3/267 from JSC "UZELTEXSANOAT" dated 03.03.2023). As a result, it was possible to stabilize the electrophysical parameters and the minority charge carrier lifetime of semiconductor devices manufactured based on semiconductor monocrystals and to increase their service life.

The method of forming germanium clusters, which create Si/SiGe/Si microheterojunctions as a result of thermal treatment at  $T=850$  °C for  $t=3$  hours after the diffusion of Ge atoms into silicon samples, was used in the execution of the fundamental project F-2-41 "Theoretical and experimental studies of sputtering processes, atom implantation, formation of nanostructures and strained layers during ion implantation into materials of various nature (metals, semiconductors, and dielectrics)" (Reference TDTU dated September 13, 2021).

As a result, it was possible to obtain a semiconductor material with a nanoscale structure and stable electrophysical parameters, which made it possible

to increase the efficiency of experimental studies of atom implantation processes, as well as to form nanoscale structures and strained layers during the process of ion implantation into the semiconductor.

**The validity of the findings** is supported by well-established experimental techniques, the high reproducibility of extensive statistically significant data, and the use of accepted principles of semiconductor physics.

**Approbation of research results.** The main results of the dissertation were presented and discussed at 14 international and 3 republican scientific conferences.

**Publication of the research results.** A total of 26 scientific works have been published on the topic of the dissertation, including 9 articles in scientific journals recommended by the Higher Attestation Commission under the Ministry of Higher Education, Science and Innovation of the Republic of Uzbekistan for publishing the main scientific results of doctoral dissertations (6 in Scopus-indexed journals, and 3 in national journals).

**The structure and scope of the dissertation.** The dissertation consists of an introduction, four chapters, a general conclusion and addendum. The thesis contains 118 pages of typewritten text, 16 figures, 5 tables, a list of cited literature of 97 titles.

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

**I част (I bo'lim, part I)**

1. Zikrillaev N. F., Urakova F. E., **Toshev A. R.**, Kushiev G. A., Ismailov T. B., Abduganiev Y. A., & Norkulov N. Physical and Magnetic Properties of Silicon Doped with Impurity Germanium Atoms // East European Journal of Physics. 2025. Vol (1), pp 184-189. (**Scopus:** IF: 0.227. Q3: <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2025-1-18>).
2. Zikrillaev N.F., Ismaylov K.A., Egamberdiev B.E., **Toshev A.R.**, Urakova F.E., Kurbonaliev K.K. Solar cells with microheterojunctions Si/SiGe/Si // Science and Education in Karakalpakstan. No.1/2 ISSN 2181-9203. 2025. pp. 73-76. [01.00.00 №11].
3. Abdurakhmanov B.A., Iliev Kh.M., Tachilin S.A., **Toshev A.R.** Silicon Solar Cells with Si-Ge Microheterojunctions // Russian Mikroelektronics, 2012.vol 41. №3. pp. 169-171. (**Scopus:** IF: 0.194. Q4: <https://doi.org/10.1134/S1063739712020023>).
4. Abdurakhmanov B.A., Iliev Kh.M., Tachilin S.A., **Toshev A.R.**, and Egamberdiev B.E. The Effect of Silicon–Germanium Microheterojunctions on the Parameters of Silicon Solar Cells // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2010. Vol. 46, No 5, pp. 505–507. (**Scopus:** IF: 0.232. Q3: <https://doi.org/10.3103/S1068375510050170>).
5. Бахадырханов М.К., Зикриллаев Н.Ф., **Тошев А.Р.**, Абдурахманов Б.А., Илиев Х.М., Аюпов К.С., Бобонов Д.Т., Сапарниязова З.Т. Низкотемпературная диффузия примесей в кремнии // Доклады академии наук. 2010. №4. С. 32-35 [01.00.00 №7].
6. **Тошев А.Р.**, Тачилин С.А., Илиев Х.М. Радиационная стабильность кремниевых солнечных элементов, легированных гольмием // Доклады академии наук. 2009. №5, с. 39-41. [01.00.00 №7].
7. Абдурахмонов Б.А., Бахадырханов М.К., Илиев Х.М., Тачилин С.А., **Тошев А.Р.** Влияние деформации на параметры кремниевых солнечных элементов // Гелиотехника. 2005. №2. С. 67-69. [01.00.00 №1].
8. Бахадырханов М.К., Илиев Х.М., Хамидов А., **Тошев А.Р.** Деградационные свойства кремниевых солнечных элементов с редкоземельными примесями // Гелиотехника. 2002. №3. С. 19-22. [01.00.00 №1].
9. Бахадырханов М.К., Илиев Х.М., **Тошев А.Р.**, Саидов М.С. Влияние изовалентных примесей на параметры кремниевых солнечных элементов // Гелиотехника. 2001. №4. С. 13-18. [01.00.00 №1].

**II част (II bo'lim, part II)**

10. А.Р.Тошев, Б.Э.Эгамбердиев, Б.А. Абдурахмонов, О.Э.Саттаров Солнечные элементы с микрогетеропереходами Si/SiGe/Si.

- Наноструктурные полупроводниковые материалы в фотоэнергетике // II Международная научная конференция. 19-20 ноября 2021 г. Ташкент.
11. B.E. Egamberdiev, Toshev A.R. Stability of silicon-based solar cell parameters implanted with rare earth elements// Pakistan 2017 г.
  12. B.E. Egamberdiev, A.T. Rahmonov, A.R.Toshev Radiation stability of silicon-based solar cell parameters implanted with rare earth elements// Международное конференция. London. 2015г. С 23-27.
  13. Bakhadirkhanov M.K., Iliev Kh.M., Toshev A.R. «Stabilization methods of parameters of silicon solar elements», 7-th International Symposium on Advanced Materials, September 17-23, 2001, Islamabad, Pakistan.
  14. Bakhadirkhanov M.K., Iliev Kh.M., Tachilin S.A., Toshev A.R., Sattarov O.E. «Control of degradation parameters of solar cells on basis of silicon», 3-rd International EUSPEN Conference and 4-th General Meeting (European Society for Precision Engineering and Nanotechnology) Conference at Eindhoven University of Technology Eindhoven, Netherlands, May, 2002.
  15. Bakhadirkhanov M.K., Abdurakhmanov B.A., Iliev K.M., Tachilin S.A., Toshev A. «Increasing of Solar Cell's Efficiency on the Basic of the Impurity Photo - Electric Effect. 20<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition CCIB, Barcelona, Spain 6-10 June 2005.
  16. Эгамбердиев Б.Э., Илиев Х.М., Тачилин С.А., Тошев А.Р. «Радиационная стабильность кремниевых солнечных элементов, легированных гольмием»// Труды XI Международной конференции «Физика твердого тела» Усть-Каменогорск, Казахстан, 9-12 июня 2010 г.
  17. Илиев Х.М., Тошев А.Р. «Особенности дефектообразования в кремнии, легированного гольмием», Труды II-Национальной конференции по росту кристаллов (НКРК-2), г. Ургенч, 3-4 ноября, стр. 10-11, 2000.
  18. Илиев Х.М., Тошев А.Р. «Деградиционные свойства фотоэлементов на основе кремния, легированного изовалентными примесями», Труды II-Национальной конференции по росту кристаллов (НКРК-2), г. Ургенч, 3-4 ноября, с. 7, 2000.
  19. Бахадырханов М.К., Илиев Х.М., Тошев А.Р. «Влияние деформации на параметры кремниевых солнечных элементов», II-Республиканская конференция по физической электронике, Ташкент, 3-5 ноября, с. 131, 1999.
  20. Илиев Х.М., Тошев А.Р. «Тензоэффект в упруго деформированном компенсированном кремнии», Труды Международной конференции по прикладным проблемам физики полупроводников, г. Ташкент, 15-17 сентября, стр. 50, 1999г.
  21. Бахадырханов М.К., Хамидов А., Тошев А.Р., Мавлянов А., Рахматиллаев Р. «Образование химически связанных комплексов (молекул) между примесными атомами элементов VI групп в кремнии», Труды Второй Российской конференции по материаловедению и физико-химическим основам технологий получения легированных кристаллов кремния («Кремний-2000»), г. Москва, 9-11 февраля, стр. 171, 2000г.
  22. Илиев Х.М., Хамидов А., Тошев А.Р., Саттаров О.Э. «Технология солнечных элементов на основе кремния, легированного изовалентными

- примесями», Международная конференция по проблеме производства поли- и монокристаллического кремния для микроэлектроники и солнечной энергетики, г. Андижан, 18-20 мая, стр. 55, 2000г.
23. Тачилин С.А., Баходирханов М.К., Эгамбердиев Б.Э., Тошев А.Р., Ковешников С.В., «Использование солнечной энергии в Узбекистане», сборник трудов международной научной конференции «Физика и физическое образование: достижения и перспективы развития», Кыргызская Республика, Бишкек, 18 -20 сентября 2008 года.
24. Tachilin S.A., Bakhadir Khanov M.K., Abdurakhmanov B.A., Iliev K.M., Toshev A., Study of the Effect of Near-Surface Region Enriched by Germanium on Parameters of Silicon Solar Cells // 20<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Exhibition and Convention Centre Dresden, 4-8 September 2006, Dresden, Germany.
25. Тачилин С.А., Эгамбердиев Б.Э., Илиев Х.М., Тошев А.Р. «Радиационная стабильность параметров кремниевых солнечных элементов, легированных РЗЭ», сборник трудов «Наука и производство», Казахстан, Жетысай, 2009 год, с. 401-405.
26. Тачилин С.А., Ковешников С.В., Бахадарханов М.К., Илиев Х.М., Абдурахманов Б.А., Тошев А.Р. Кремний с нанокластерами атомов марганца - новый материал для солнечных элементов // Сборник трудов VII Международной конференции «Кремний-2010», Россия, Нижний Новгород, 6-9 июля 2010 г., с. 68.

Avtoreferat Namangan shahar U.Nosir nashriyotida tahrirdan o‘tkazildi va o‘zbek, rus, ingliz tillaridagi matnlari mosligi tekshirildi (08.10.2025).

Bosishga ruxsat etildi 09.10.2025 y.  
Bichimi 60X84 1/16, “Times New Roman”  
Garniturada raqamli bosma usulida bosildi.  
Shartli bosma tobog‘i 3. Adadi: 100. Buyurtma: № 67

---

“FAZILAT ORGTEX SERVIS”  
hususiy korxonasi bosmaxonasida chop etildi.  
Manzil: Namangan sh. Amir Temur ko‘chasi 97 uy.  
Tel: (+998) 91-346-44-43, (+998) 99-608-69-44