

**NAMANGAN MUHANDISLIK-TEXNOLOGIYA INSTITUTI  
HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI  
PhD.03/30.11.2022.FM/T.66.04 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

---

**ANDIJON MASHINASOZLIK INSTITUTI**

**ANARBOYEV IQBOLJON IBROXIMOVICH**

**QUYOSH NURLARI BILAN QIZDIRIB OLINGAN KREMNIYNING  
ELEKTROFIZIK VA TERMOELEKTRIK XOSSALARI**

**01.04.10 – Yarimo‘tkazgichlar fizikasi**

**FIZIKA-MATEMATIKA FANLARI BO‘YICHA FALSAFA DOKTORI  
(PHD)**

**DISSERTATSIYASI AVTOREFERATI**

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

**Оглавление автореферата диссертации доктора философии (PhD)  
физико-математических наук**

**Content of the dissertation abstract of the doctor of philosophy (PhD) on  
physical and mathematical sciences**

**Anarboyev Iqboljon Ibroximovich**

Quyosh nurlari bilan qizdirib olingan kremniyning elektrofizik va termoelektrik

xossalari..... 3

**Анарбоев Икболжон Иброрхимович**

Электрофизические и термоэлектрические свойства кремния  
полученного нагреванием солнечными излучениями.....

23

**Anarboyev Iqboljon Ibroximovich**

Electrophysical and thermoelectric properties of silicon obtained by solar  
radiation .....

41

**E'lon qilingan ishlar ro'uxati**

Список опубликованных работ

List of published works..... 43

**NAMANGAN MUHANDISLIK-TEXNOLOGIYA INSTITUTI  
HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI  
PhD.03/30.11.2022.FM/T.66.04 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

---

**ANDIJON MASHINASOZLIK INSTITUTI**

**ANARBOYEV IQBOLJON IBROXIMOVICH**

**QUYOSH NURLARI BILAN QIZDIRIB OLINGAN KREMNIYNING  
ELEKTROFIZIK VA TERMOELEKTRIK XOSSALARI**

**01.04.10 – Yarimo‘tkazgichlar fizikasi**

**FIZIKA-MATEMATIKA FANLARI BO‘YICHA FALSAFA DOKTORI  
(PHD)**

**DISSERTATSIYASI AVTOREFERATI**

**Fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Vazirlar Mahkamasi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida V2017.2.PhD/FM100 raqam bilan ro'yxatga olingan.**

Dissertatsiyasi Andijon mashinasozlik institutida bajarilgan.

Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o'zbek, rus, ingliz (rezyume)) Ilmiy kengashning veb-sahifasida ([www.adu.uz](http://www.adu.uz)) hamda «ZiyoNet» Axborot ta'lim portalida ([www.ziynet.uz](http://www.ziynet.uz)) joylashtirilgan.

**Ilmiy rahbar:**

**Olimov Lutfiddin Omanovich**

fizika-matematika fanlari doktori., professor

**Rasmiy opponentlar:**

**Onarqulov Karimberdi Egamberdiyevich**

fizika-matematika fanlari doktori., professor

**Abdulazizov Baxrom Toshmirza o'gli**

fizika-matematika fanlari doktori., professor

**Yetakchi tashkilot:**

Urganch davlat universiteti

Dissertatsiya himoyasi Namangan muhandislik-texnologiya instituti huzuridagi ilmiy darajalar beruvchi PhD.03/30.11.2022.FM/T.66.04 raqamli Ilmiy kengashning 2025 yil soat 1200 dagi majlisida bo'lib o'tadi. (Manzil: 160115, Namangan shahri, Kosonsoy ko'chasi, 7-uy. Tel./faks: (99869) 225-1007; (99869) 225-76-75, e-mail: [niei\\_info@edu.uz](mailto:niei_info@edu.uz), Namangan muhandisliktexnologiya instituti 3-bino, 1-qavat, ilmiy kengash xonasi).

Dissertatsiya bilan Namangan muhandislik-texnologiya institutining Axborot-resurs markazida tanishish mumkin. (Manzil: 160115, Namangan shahri, Kosonsoy ko'chasi, 7-uy. Tel: (99869) 225-10-07.)

**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. Sharibayev**

Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy

kengash qoshidagi ilmiy seminar raisi,

f.-m.f.d., professor

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

**Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zaruriyati.** Bugungi kunda jahonda yarimo‘tkazgichlar fizikasi sohasining rivojlanishida polikristal kremniy materiallarini tadqiq etish yetakchi o‘rinlarni egallaydi. Bunday turdagi materiallarning asosiy xarakteristikalarini murakkab shakldagi donadorlik va donadorliklararo chegara sohalarining morfologik xususiyatlari va fizik parametrlariga bog‘liq bo‘lib, ularni boshqarish orqali yuqori samarali energiya o‘zgartirgich qurilmalari yoki generatorlari yaratishga e‘tibor kuchaymoqda. Hususan, issiqlik ta‘sirida donadorliklararo chegara sohalarida temperaturalar farqi hisobiga Zeebek koefitsienti ortishi yoki bu sohada fononlar yutilishi bilan issiqlik o‘tkazuvchanlikning kamayishi generatorlarning termoelektrik ko‘rsatkichini orttirishga olib keladi. Bu sohada quyosh nurlari bilan qizdirib olingan polikristal kremniyning mu‘ayyan sharoitlarda namoyon bo‘luvchi fizik xususiyatlarini tadqiq etish ilmiy texnika sohasida muhim ahamiyatga ega hisoblanadi.

Jahondagi yetakchi ilmiy-tadqiqot markazlarida asosiy e‘tibor kukunsimon zarrachalarni issiqlayin preslash orqali energiya o‘zgartirgich uchun mo‘ljallangan polikristal tuzilmalari ishlab chiqishga e‘tibor qaratilgan. Ushbu usullarda sintezlash, presslash hamda yuqori haroratlarda termik ishlav berish kabi yuqori texnologiyalar qo‘llanilishi yakuniy mahsulot tannarhining ortirishga, tashqi muhitdan kirib qoluvchi begona kirishma atomlarining boshqarib bo‘lmazligi esa sof polikristal tuzilmalar olishda samarasiz hisoblanadi. Natijada, bu noqulayliklar yakuniy energiya o‘zgartirgich materiallarining asosiy termoelektrik parametrlari Zeebek koefitsienti va elektro‘tkazuvchanlikning bir me‘yorda o‘sishini hamda issiqlik o‘tkazuvchanlikning kamayishini ta‘minlab bo‘lmaydi. Shu jihatdan, quyosh nurlarini qo‘llagan holda kremniy olish va ularning mu‘ayyan sharoitlarda namoyon bo‘luvchi fizik xususiyatlarini tadqiq etish orqali polikristal kremniyli energiya o‘zgartirgichlar yaratish dolzarb hisoblanadi.

Keyingi yillarda Respublikamizda granullangan kremniyli termoelektrik materiallar olish va ularning elektr va termoelektrik xarakteristikalarini o‘rganishga alohida e‘tibor qaratilmoqda. 2022-2026 yillarga mo‘ljallangan Yangi O‘zbekistonning taraqqiyot strategiyasida, jumladan “Iqtisodiyotni elektr energiyasi bilan uzluksiz ta‘minlash hamda “Yashil iqtisodiyot” texnologiyalarini barcha sohalariga faol joriy etish, iqtisodiyotning energiya samaradorligini 20 foizga oshirish”<sup>1</sup> bo‘yicha bir qator vazifalar belgilangan. Ushbu vazifalarni amalga oshirishda granullangan kremniy zarrachalarini quyosh nurlari bilan qizdirib biriktirish orqali polikristal kremniyli energiya o‘zgartirgich materiallari ishlab chiqish va ularning mu‘ayyan sharoitlarda namoyon bo‘luvchi fizik xususiyatlariga bog‘liq fizik jarayonlarni tadqiq etish muhim masalalardan hisoblanadi.

O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 9-sentabrdagi PF-220-son “Energiya tejoychi texnologiyalarni joriy qilish va kichik quvvatli qayta tiklanuvchi energiya manbalarini rivojlantirish bo‘yicha qo‘shimcha chora-tadbirlar

---

<sup>1</sup> O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 28.01.2022 yildagi PF-60-son “2022 — 2026-yillarga mo‘ljallangan Yangi O‘zbekistonning taraqqiyot strategiyasi to‘g‘risida” gi Farmoni.

to'g'risida"gi Farmoni, 2021-yil 9-apreldagi PQ-5063-son "O'zbekiston Respublikasida qayta tiklanuvchi va vodorod energetikasini rivojlantirish chora-tadbirlari to'g'risida", 2021-yil 19-martdagi PQ-5032-son "Fizika sohasidagi ta'lim sifatini oshirish va ilmiy tadqiqotlarni rivojlantirish chora-tadbirlari to'g'risida" hamda 2020-yil 10-iyuldagi PQ-4779-son "Iqtisodiyotning energiya samaradorligini oshirish va mavjud resurslarni jalb etish orqali iqtisodiyot tarmoqlarining yoqilg'i-energetika mahsulotlariga qaramligini kamaytirishga doir qo'shimcha chora-tadbirlar to'g'risida" kabi qator vazifalar belgilab berilgan. Jumladan, energiya tejamkor usullarni qo'llagan holda chiqindi issiqlik energiyasini elektr energiyasiga aylantirishga mo'ljallangan polikristal kremniy ishlab chiqish va ularning mu'ayyan sharoitlarda namoyon bo'luvchi fizik xususiyatlarini tadqiq qilish muhim masalalardan hisoblanadi.

**Tadqiqotning respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo'nalishlariga bog'liqligi.** Mazkur tadqiqot respublika fan va texnologiyalar rivojlanishining III. «Energetika, energoresurs tejamkorligi, transport, mashina va asbobsozlik, zamonaviy elektronika, mikroelektronika, fotonika va elektron asbobsozligi rivojlanishi»ning ustuvor yo'nalishiga doir bajarilgan.

**Muammoning o'rganilganlik darajasi.** Mikro va nano o'lchamli polikristal kremniy asosida quyosh elementlari, yarimo'tkazgichli termoelektrik materiallar, yarimo'tkazgichli asboblarni yaratish va ularning elektrofizik, fotoelektrik va termoelektrik xarakteristikalarini tadqiq qilishda ko'plab xorijlik olimlar tomonidan ilmiy markazlarda tadqiqotlar olib borilmoqda. Xususan amerikalik (T.P. Hogan, D. Kendig, A. Shakuri, A.I. Xochbaum. Devid Maykl Rou., H. Julian. Goldsmid<sup>2</sup>), germaniyalik (M. Asen-Palmer, E. Gmelin, M. Kardona, J. Debur, S. Stive, Sh. Folker, YE. Muller, K. Zabreki), gretsiyalik (A.Valalaki, A.G.Nassiopoulou), yaponiyalik (L.Yan, N.Yan, B. Li, P.Juud, M.Oxta, Chongpu Zai, S. Sano, Sh. Yamamoto), rossiyalik (Yu. M .Smirnov, I.A.Kaplunov, V.I.Smirnov, A. P. Jernov, A. V. Inyushkin, A. Taldenkov, V.I. Ojogin, Dmitriyev, I.P. Zvyagin, YA.B. Magomedov, M.I. Fedorov, M.M. Gadjaliyev, V.V. Kaminskiy) va boshqalar turli texnologiyalardan foydalangan holda polikristal kremniy olish, uning termoelektrik xususiyatini oshirish va samaradorligi yuqori bo'lgan qurilmalar hamda integral mikrosxemalarda qo'llash ustida ilmiy tadqiqotlar olib borishgan. Shuningdek, D.Kexill polikristal kremniyda issiqlik tasirida hosil bo'luvchi xususan, termoelektrik xususiyatlarini haroratga bog'liqligini o'rgangan. L.Veber, E.Gmelin polikristal yarimo'tkazgichni issiqlik tasiridagi zaryad ko'chishi bilan bog'liq jarayonlarni  $30 < T < 300$  K oralig'ida solishtirma qarshilikning kamayishi zaryadlar harakatchanligining ortishiga olib kelishini va elektr o'tkazuvchanlikga ta'sirini o'rganishgan. P.Juud, M.Oxta, Chongpular yarimo'tkazgichlarning issiqlik o'tkazuvchanligini kamaytirish usullari orqali termoelektrik xossasini ortishiga erishishda turli o'lchamdagi polikristal kremniydan termoelektrik material olishda

---

<sup>2</sup> Disertatsiya mavzusi bo'yicha halqaro ilmiy tadqiqotlar sharhi quyidagilar asosida amalga oshirildi: Kanatzidis, Mercouri G. n. Mahanti, S.D. Hogan, Timothy P. Thermoelectric materials-Congresses. Title. Series Book 2021. Devid Maykl Rou. Materials, Preparation, and Characterization in Thermoelectrics: Thermoelectrics and Its Energy Harvesting. Book .April 25, 2012. H. Julian. Goldsmid. Introduction to Thermoelectricity Book © 2016

foydalangan. L.Yan, N.Yan, B.Li lar nanostrukturali kremniy tuzilmalarining fizik xususiyatlaridan kelib chiqqan holda, ularning o‘zaro birikishdagi ayrim muammolarni bartaraf etish bilan polikristal kremniy olish mumkinligini ta’kidlashgan. Yarimo‘tkazgichlarni turli hajmdagi mikro va nano tuzilmalarni hosil qilishda A.P.Jernov, A. V. Inyushkinlar kukunli texnologiya asosida polikristal kremniy olish usullarini ishlab chiqishgan.

O‘zbek olimlari akademiklar M.S. Saidov, A.Mamadolimov, M.Baxadirxonov, S.Z.Zaynobiddinovlar nano zarralar va nano texnologiyalar fizikasining rivojlanishiga katta hissalarini qo‘shishdi. A.M. Qosimoxunov, A.YU. Leyderman va A.S. Saidov, B.M. Abduraxmanov, L.O. Olimov, N.A. Matchanov turli usullarda olingan mono va polikristal Si ning donadorlararo chegaralarida hosil bo‘luvchi elektrofizik va fotoelektrik xossalarni keng yoritib berish bilan birgalikda, donadorliklararo chegaralarda joylashgan polikristal atomlar tuzilishining yangi modelini taklif etishgan, shuningdek, B.M. Abduraxmanov, L.O. Olimov, N.A.Matchanov, M.A.Adilovlar ilk bor mikro va nano o‘lchamli polikristal kremniyda kirishmali issiqlik teplovoltai va fotovoltai effektlar hosil bo‘lishini aniqlashgan.

**Tadqiqotning dissertatsiya bajarilgan oliy ta’lim muassasasidagi ilmiy tadqiqot ishlari rejalari bilan bog‘liqligi.** Dissertatsiya ishi Andijon mashinasozlik instituti ilmiy-tadqiqot ishlari rejasining № BF3-003 «Kirishmali voltaik effektga asoslangan yarimo‘tkazgich negizli mikro va nanoo‘lchamli noan’anaviy va muqobil energiya manbalarini yaratish» (2017-2020 yy.) hamda № UZB-Ind-2021-92 “Mikro- va nanoo‘lchamli (granullangan) yarimo‘tkazgichli termoelektrik materiallarini ishlab chiqish va joriy etish” (2021-2023 yy.) mavzusidagi tadqiqot loyihalari doirasida bajarilgan.

**Tadqiqotning maqsadi:** kremniy zarrachalarini quyosh nurlari yordamida qizdirib biriktirish orqali olingan polikristal kremniyning elektrofizik va termoelektrik xarakteristikalarini hajmiy nuqson va lokallashtirilgan kirishmali holatlariga bog‘liqlik qonuniyatlarini aniqlash, ular asosida termoelektrik materiallar olishning fizik mexanizmlari hamda texnik yechimlarini aniqlashdan iborat.

**Tadqiqot vazifalari:**

- Kukunli texnologiya asosida kremniy zarrachalarini tayyorlash va ularni quyosh nurlari bilan qizdirib biriktirish orqali polikristal kremniy namunalari olish texnologiyasini ishlab chiqish va namunalarni tayyorlash;

- Quyosh nurlari bilan qizdirib olingan polikristal kremniyning mikrotuzilmasi va morfologiyasini o‘rganish, kremniy zarrachalari birikishida kirishmali holatlar va nuqsonlar hosil bo‘lish mexanizmlarini oydinlashtirish;

- T~300÷800 K polikristal kremniy hajmiy nuqsonlari va donadorliklararo chegara sohalarining zaryad ko‘chish jarayonlariga ta’sirini aniqlash;

- T~300÷800 K harorat o‘zgarishi jarayonida kirishmali holatlarda tok va kuchlanish hosil bo‘lish mexanizmlarini oydinlashtirish;

- T~300÷800 K harorat oraliklarida polikristal kremniyning termoelektrik xossalarni o‘rganish;

• Kremniy zarrachalari asosida termoelektrik materiallar olishning mexanizmlarini aniqlash.

**Tadqiqotning ob'ekti** sifatida Si zarrachalarini quyosh nurlari bilan qizdirib biriktirish orqali olingan polikristal kremniy namunalari tanlab olingan.

**Tadqiqotning predmeti** kremniy zarrachalarini quyosh nurlari bilan qizdirib biriktirish orqali olingan polikristal kremniyning mikrostrukturasi, elektrofizik va termoelektrik xossalari o'rganish va ularda zaryad ko'chish mexanizmlarini aniqlashdan iborat.

**Tadqiqotning usullari.** Qo'yilgan vazifalarni yechish uchun quyidagi usullar qo'llanilgan: Kremniy zarrachalarini quyosh nurlari bilan qizdirib biriktirish, orqali polikristal kremniy olish va morfologiyasini tadqiq qilish, harorat o'zgarishi jarayonida namunalarning solishtirma qarshiligini, zaryad tashuvchilar harakatchanligi va kontsentratsiyasini aniqlashning ikki va to'rt zondli hamda modernizatsiya qilingan Vander-Pau usullari foydalanilgan.

**Tadqiqotning ilmiy yangiligi** quyidagilardan iborat, ilk bor,:

kremniy zarrachalarini quyosh nurlari bilan kremniyning erish haroratidan 20 % past ( $T \sim 1350$  K) haroratda qizdirib biriktirish vaqtini boshqarish begona kirishmalardan holi sof polikristal kremniy hosil qilishi asoslangan;

$T \leq 575$  K da polikristal kremniy old sirtida elektro'tkazuvchanligi hamda zaryad tashuvchilar kontsentratsiyasi ortib so'ngra kamayishi, aksincha, orqa tomoni elektro'tkazuvchanligi hamda zaryad tashuvchilar kontsentratsiyasi kamayib so'ngra ortishi mos holda, old va orqa sirt soha donadorliklararo chegaralarida lokallashgan tuzoqlarda zaryad tashuvchilar ushlanishi va ozod bo'lishiga bog'liqligi aniqlangan;

$T \sim 300 \div 800$  K da donadorliklararo chegaradagi lokallashgan tuzoqlarda zaryad tashuvchilar ushlanishi hisobiga ularning yashash vaqtining kamayishi polikristal kremniyning har ikki old va orqa tomonida zaryad tashuvchilar harakatchanligining 0,0245 dan 0,015  $\text{sm}^2/\text{Vs}$  gacha kamayishiga olib kelishi aniqlangan;

donadorliklararo chegaradagi potensial to'siq balandligi  $\phi \sim 0,39 \div 1,0$  eV oraliqlarida o'zgarib,  $T = 300 \div 775$  K da old yuza sirt sohasiga nisbatan orqa yuza sirtida  $\phi \sim 0,061$  eV farq bilan o'zgarishi aniqlangan;

$T \sim 300 \div 800$  K da donadorliklararo chegara sohalardagi kirishmali holat va nuqsonlarda elektron-kovak juftliklarining hosil bo'lishi bilan  $U_q$  va  $I_q$  hamda  $U_f$  va  $I_f$  paydo bo'lishi aniqlangan;

kremniy zarrachalari negizida tayyorlangan polikristal kremniy solishtirma termoeuykkasi 400 K da 800-1000 mikrovolt/gradus, issiqlik o'tkazuvchanligi esa 0,12  $\text{Vt/m}^*\text{K}$  ekanligi, bu esa monokristal kremniydan mos holda, 20 marta katta va 1240 marta kichikligi aniqlangan.

**Tadqiqotning amaliy natijalari** quyidagilardan iborat:

Quyosh nurlari bilan qizdirib biriktirish orqali kremniy zarrachalari negizida qalinligi 2,5  $\div$  3,0 mm, donadorlik o'lchami 10  $\div$  20 bo'lgan ikki tuzilmali polikristal kremniy namunalari ishlab chiqilgan;

kremniy zarrachalarini quyosh nurlari bilan qizdirib biriktirish orqali chiqindi issiqlik energiyasini elektri energiyasiga aylantirishga mo'ljallangan polikristal tuzilmali termoelektrik material ishlab chiqarish mumkinligi ko'rsatilgan;

**Tadqiqot natijalarining ishonchliligi** kremniy zarrachalarini quyosh nurlari bilan qizdirib polikristal kremniy olish texnologiyasi, uning mikrotuzilmasi va morfologiyasini, shuningdek, elektrofizik hamda termoelektrik xarakteristikalari va parametrlarini tekshirishda standart va keng qo'llaniladigan zamonaviy ilmiy va texnologik metodlardan foydalanilganligi bilan izohlanadi. Natija va xulosalar fizikaviy tasavvurlarga asoslangan nazariy va eksperimental natijalar bilan tasdiqlangan.

**Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati.** Tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati kremniy zarrachalarini quyosh nurlari bilan qizdirib ikki strukturali polikristal kremniy olish texnologiyasi, donadorliklararo chegara sohalarida zaryad ko'chish jarayonlari, uning mikrotuzilmasiga bog'liqligi va termoelektrik xarakteristikalariga bog'liqligi haqida kengroq tasavvur xosil qilish imkonini bergan.

Tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati kremniy zarrachalarini quyosh nurlari bilan qizdirib biriktirish orqali termoelektrik materiallarni tayorlash usuli ishlab chiqilganligi bilan izohlanadi.

**Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi.** Quyosh nurlari bilan qizdirib olingan kremniyning elektrofizik va termoelektrik xossalari tadqiq qilish bo'yicha olingan ilmiy natijalar asosida:

quyosh nurlari yordamida kremniy zarrachalarini qizdirib biriktirish orqali "Termoelektrik material tayyorlash usuli" ishlab chiqilgan va ilmiy asoslangan (O'zbekiston Respublikasi Intelektual mulk agentligining foydali model uchun Patenti Uz FAP 01593, sana 25.02.2021). Ishlab chiqilgan usul kremniy zarrachalari negizida polikristal tuzilmali issiqlik energiyasi o'zgartirgichini yaratish imkonini bergan;

granullangan kremniy zarrachalari va ularni quyosh nurlari bilan qizdirib quyish texnologiyasini ishlab chiqishda olingan ilmiy natijalari "Andijon kabel" aksionerlik jamiyati O'zbekiston Rossiya qo'shma korhonasida mis granularining xossalari va ular asosida elektrokabellar quyish jarayonlarini ilmiy asosda tahlil qilishda qo'llanilgan ("O'zeltexsanoat" aksionerlik jamiyatining 2022 yil 12 avgustdagi № 04-3/1836- sonli ma'lumotnomasi). Ishlab chiqilgan usul mis elektrokabellarini oksidlanish holatini 50% dan 80% gacha boshqarish hamda ularda yuz beruvchi fizik jarayonlarni tahlil qilish imkonini bergan;

granullangan kremniy zarrachalarini quyosh nurlari bilan qizdirib biriktirish orqali kremniy tuzilmalari olishda olingan ilmiy natijalari Qirg'iziston respublikasi Osh Davlat universitetining olimlari tomonidan fundamental va amaliy loyxalarida qo'llanilgan (Osh davlat universitetining 2022 yil 25 yanvardagi №150 sonli ma'lumotnomasi). Natijada, ilmiy natijalardan foydalanish temperatura o'zgarishi jarayonida polikristal yarimo'tkazgichli energiya o'zgartirgichlarning ishchi parametrlarini orttirish hamda ularning hajmida yuz beradigan fizik jarayonlarni tushuntirish imkonini bergan;

kremniy zarrachalarini quyosh nurlari bilan qizdirib biriktirish orqali temoelektrik material olishda olingan ilmiy natijalari Qirg'iziston respublikasi Osh Davlat texnologiyalar universiteti "Fizika va energo mashinasozlik" kafedrasida ilmiy laboratoriyasi va ilmiy ishlarida foydalanilgan (Qirg'iziston respublikasi Osh Davlat texnologiyalar universitetining 2022 yildagi 10 febraldagi № 04-02/22 sonli ma'lumotnomasi). Natijada, ilmiy natijalardan foydalanish kremniy zarrachalarini quyosh nurlari bilan qizdirish yo'li bilan polikristal kremniy va temoelektrik materiallar olishning optimal rejimini aniqlash, harorat o'zgarishi jarayonida polikristal tuzilmalar donadorliklararo chegara sohalarida zaryad ko'chish jarayonlarini va temoelektrik xarakteristikalarini aniqlash imkonini bergan.

**Dissertatsiya ishining natijalari** 2 ta xalqaro va 11 ta respublika miqyosida ilmiy jurnallarda va konferensiyalarda ma'ruza qilingan hamda muhokamadan o'tkazilgan.

**Tadqiqot natijalarining e'lon qilinishi.** Dissertatsiya mavzusi bo'yicha jami 22 ta ilmiy ish chop etilgan, shulardan 11 tasi mahalliy, 2 tasi xorijiy ilmiy jurnallarda nashr etilgan. 1 ta foydali modelga O'zbekiston Respublikasi intellektual mulk agentligi patent guvohnomasi olingan. 1 ta monografiya chop etilgan.

**Dissertatsiyaning hajmi va tuzilishi.** Dissertatsiya kirish, to'rtta bob, xulosa, foydalanilgan adabiyotlar ro'yxatidan iborat. Dissertatsiya matni 120 betda ifodalangan.

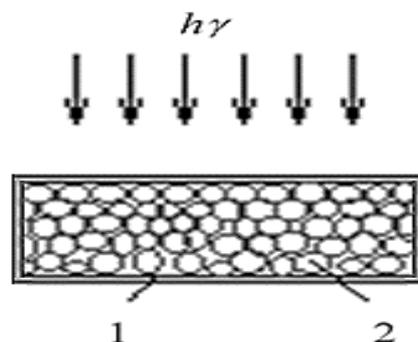
## DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

**Kirish** qismida dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati asoslangan, tadqiqotning O'zbekiston Respublikasi fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo'nalishlariga mosligi ko'rsatilgan, mavzu bo'yicha xorijiy ilmiy tadqiqotlar sharhi, muammoning o'rganilganlik darajasi keltirilgan, tadqiqot maqsadi, vazifalari, ob'ekti va predmeti tavsiflangan, tadqiqotning ilmiy yangiligi va amaliy natijalari bayon qilingan, olingan natijalarning nazariy va amaliy ahamiyati ochib berilgan, tadqiqot natijalarining joriy qilinishi, nashr etilgan ishlar va dissertatsiya tuzilishi bo'yicha ma'lumotlar berilgan.

Dissertatsiyaning «**Muammoning holati va poli-Si hamda uning hajmidagi donadorliklararo chegaralarining funksional xarakteristikalarini yaxshilash тенденциялари**» deb nomlangan birinchi bobida muammoning holati, kremniy zarrachalari asosida **poli-Si olish texnologiyalari, uning hajmida** donadorliklararo chegara hosil bo'lish mexanizmlari, elektron holatlari, ularning **poli-Si** elektrofizik va optik xossalariga ta'siriga oid adabiyot ma'lumotlari sharhi keltirilgan. Bunday tuzilmalarning mikro-elektronika, fotoenergetika va temoelektrik materiallar yaratishda qo'llanish usullari va muammolarini taxliliga oid tadqiqot natijalari, ular asosida mavzu muammosining qo'yilishi yoritib berilgan. Mavjud ma'lumotlarning nazariy va eksperimental tahlili natijasida vazifalarning qo'yilishi shakllantirilgan.

Dissertatsiyaning «**Amaliy va nazariy tadqiqot metodlari**» deb nomlangan ikkinchi bobida qo'llanilgan metodlar tavsiflari hamda mohiyati yoritilgan. Hususan, kukunli texnologiyasi asosida kremniy zarrachalarini tayyorlash, ularni quyosh nurlari bilan qizdirib biriktirish orqali polikristal kremniy olish

texnologiyasini ishlab chiqish, kremniy zarrachalari va polikristal kremniy namunalarning mikrotuzilmasi va morfologiyasini, elektrofizik va termoelektrik xossalarni aniqlash metodlari va tavsiflari keltirilgan. Kremniy zarrachalarini olish uchun kukunli texnologiyadan foydalanilgan. An'anaviy kukunli texnologiyasidan farqli ravishda kremniy zarrachalarini tayyorlash datallari issiqqa bardosh, tarkibida metal birikmalari bo'lmagan keramik materiallardan tashkil topgan. Bu kremniy zarrachalarini tashqi muhitdan kirib qoluvchi turli kirishmalar bilan ifloslanmasligini ta'minlaydi. Shuningdek, ushbu usul 0,5 mikrometrgacha kremniy zarrachalarini tayyorlash imkonini beradi. Fokusidagi temperatura  $1500^{\circ}\text{C}$  ga teng "Quyosh sandoni" konstruksiyasi yaratilgan va uning yordamida kremniy zarrachalarini quyosh nurlari bilan biriktirish usuli ishlab chiqildi. Ushbu usulda istalgan shakldagi dielektrik korpus taglikdan foydalanish mumkin (1-rasm). Dastlab 70 foizli etilspirti yordamida tayyorlangan kremniy zarrachalari qorishmasi (2) taglikka (1) solinadi va qo'l yordamida uncha katta bo'lmagan kuch bilan bosiladi, natijada kremniy zarrachalari taglik shaklini oladi.



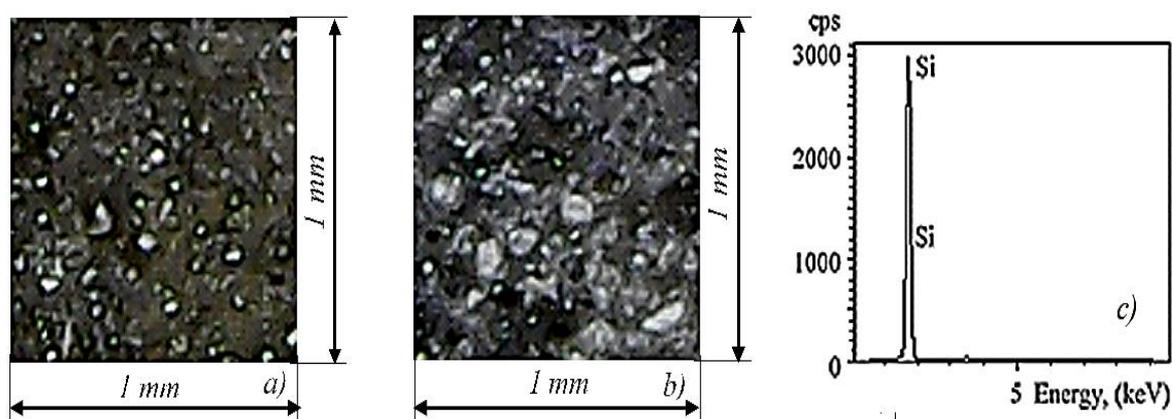
**1-rasm. Kremniy zarrachalarini quyosh nurlari bilan qizdirib biriktirish sxemasi.**

Bunda kremniy zarrachalari qorishmasi qalinligi  $2,5\div 3$  mm.dan oshmasligi zarur. Aralashma qalinligi  $2,5\div 3$  mm.dan kam bo'lganda granulalar birikishi o'rniga suyuqlanish darajasi ortadi, aksincha, undan yuqori bo'lganda esa hajm bo'ylab temperatura bir me'yorda taqsimlanmaydi. Temperaturalar farqi xisobiga sirt sohalarida birikish yuqori aksincha, ostki qismida birikish sust bo'ladi. Quyosh nurlari ( $h\gamma$ ) bilan qizdirib biriktirish ham o'ziga xos jarayonlardan iborat. Quyosh nurlari ( $h\gamma$ ) dastasi perpendikulyar ravishda to'g'ridan-to'g'ri kremniy zarrachalariga tushadi va u quyosh sandoni fokusi bo'ylab harakatlantiriladi. Bunda kremniy zarrachalariga tushayotgan quyosh nurlari temperatura  $600^{\circ}\text{C}$  dan sekin astalik bilan  $1200^{\circ}\text{C}$  bo'lgan masofaga siljitib boriladi, bu jarayon  $5\div 7$  minutda bajariladi. Ushbu usulda an'anaviy usullardan farqli o'laroq, maxsus qurilmalar yordamida preslash yoki katta energiyalarda termik ishlov (spekaniya) berish jarayonlari umuman bajarilmaydi.

Kremniy zarrachalari va ular asosida tayyorlangan namunalarning mikrotuzilmasini o'rganish uchun elektron mikroskopdan foydalanilgan. Tyemperatura o'zgarishi jarayonida namunalarning elektrofizik xossalari an'anaviy ikki va to'rt zondli hamda Vander-Pau usullari modernizatsiya qilingan tajriba qurilmalari va metodlaridan foydalanilgan. Solishtirma qarshilik ( $\rho$ ), zaryad tashuvchilar harakatchanligi ( $\mu$ ) va konsentratsiya ( $n$ )ning temperaturaga bog'liqligi  $\sim 300\div 800$  K oraliqda temperatura ortishi va kamayishi jarayonida o'rganilgan. Namunalarning termoelektrik xossalari temperatura o'zgarishi jarayonida hosil

boʻlgan kuchlanish va tok kuchini hamda Zebbek effektini aniqlash asosida oʻrganilgan.

Dissertatsiyaning “**Kremniy zarrachalari va ular asosida olingan poli-Si mikrotuzilmasi va elektrofizik xossalari**” deb nomlangan uchinchi bobida kremniy zarrachalari va ular asosida olingan poli-Si mikrotuzilmasi va morfologiyasi, donadorlik va donadorliklararo chegara sohalarining hosil boʻlish mexanizmlari, ularning zaryad koʻchish jarayonlariga taʼsiri va ularni tushuntirish mexanizmlari keltirilgan. Tadqiqot natijalari koʻrsatadiki, kremniy zarrachalarini quyosh nurlari bilan qizdirib olingan polikristal kremniy ikki strukturali tuzilishga ega boʻlib, quyosh nurlari tushgan (*a*) va tushmagan (*b*) sirt sohalar mikrotuzilmasi bir-biridan farq qilishi aniqlandi (2-rasm). Rentgen spektral taxlil (*c*) natijalari koʻrsatadiki, namuna har ikki tomoni 10÷20 mkm boʻlgan donadorliklar Si atomlaridan iborat boʻlib, kremniy zarrachalari va uning asosida poli-Si olish jarayonida tashqi muhit tomonidan begona kirishma atomlari kirib qolmasligi aniqlandi.



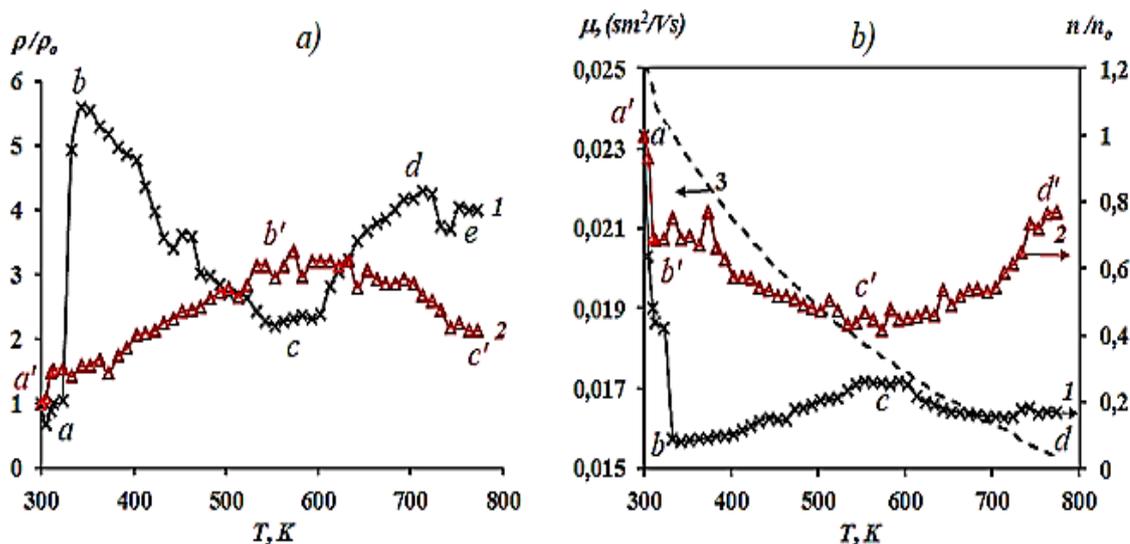
**2-rasm. Namuna mikrofotografiyasi va rentgen spektral xarakteristiksi.**

Quyosh nurlari tushgan (*a*) sirt sohada va tushmagan (*b*) sirt sohalar mikrotuzilmasi bir-biridan farq qilishi kukunli texnologiya asosida tushuntirildi. Kukunli texnologiyadan maʼlumki, termik ishlov berish kukunlash uchun foydalanilgan kristalning erish temperaturasidan masalan, kremniy uchun kremniyning erish temperaturasidan 10÷20 % pastroq boʻlgan temperaturada bajariladi. Masalan, kremniyning erish temperaturasi ~1420 °C ga teng boʻlib, u asosida olingan plastinalarga ~1250 °C da termik ishlov berish talab qilinadi<sup>3</sup>. Buning asosiy sababi kukunlash jarayonida kremniy zarrachalarining qizishi natijasida yetarli darajada energiya bilan taʼminlanishidir. Bu mexanizm quyosh nurlari tushmagan (*b*) sirt soha uchun ham oʻrinlidir. Ushbu sohada temperatura past boʻlgani uchun kremniy zarrachalari birikishi nisbatan dagʻalroq boʻladi. Bu oʻz navbatida quyosh nurlari tushgan (*a*) va (*b*) sirt soha mikrostrukturasi bir-biridan farq qilishiga olib keladi. Huddi shunday holni namunalarning elektrofizik xossalari oʻrganishda olingan natijalarda ham kuzatildi.

3-rasmda  $\rho$ ,  $n$  hamda  $\mu$  larining temperaturaga bogʻliqligi keltirilgan. Taʼkidlash joizki,  $T \sim 300$  K da namunaning (*a*) sirt sohasi  $\rho \sim 191,9 \text{ Om}\cdot\text{sm}$ ,

<sup>3</sup>Olimov L.O, Abdurakhmanov B.M, Teshaboev A. 2014. Influence of alkali metal atoms on transport of charge carriers in the between grain boundaries of polycrystalline silicon. *J. Material Science*, 1 14

$n \sim 3,11 \cdot 10^{18} \text{ sm}^3$ ,  $\mu \sim 0,025 \text{ sm}^2/\text{Vs}$ ; (b) sirt sohasi  $\rho \sim 452 \text{ Om}\cdot\text{sm}$ ,  $n \sim 5,52 \cdot 10^{17} \text{ sm}^3$ ,  $\mu \sim 0,025 \text{ sm}^2/\text{Vs}$  qiymatlarni qabul qiladi. Tadqiqot natijalari ko'rsatadiki, har ikki (a) va (b) sirt sohada  $\mu$  kamayishi (3 chiziq) aniqlandi. Biroq, (a) va (b) sirt sohada  $\rho$  va  $n$  ning temperaturaga bog'liqligi bir-biridan farq qiladi. Masalan, (a) sirt sohada  $T \sim 300 \div 350 \text{ K}$  da  $\rho$  ortsa,  $n$  kamayyadi (a-b holat),  $T \sim 350 \div 550 \text{ K}$  da  $\rho$  kamaysa,  $n$  ortib boradi (b-c holat). So'ngra, 50 K oralig'ida har ikki parametr nisbatan turg'un o'zgaradi (1 chiziq).  $T \sim 600 \div 710 \text{ K}$  da  $\rho$  yana ortsa,  $n$  775 K gacha kamayyadi (c-d holat).  $T \sim 710 \div 775 \text{ K}$  da  $\rho$  ning (d-e holat) sarkab o'zgarishi aniqlandi. Aksincha, namunaning (b) sirt sohada  $\rho$   $T \leq 575 \text{ K}$  da ortsa (a'-b' holat),  $n$  kamayyadi (a'-b'-c' holat), temperatura ortishining keyingi bosqichlarida (b'-c' holat)  $\rho$  kamaysa,  $n$  (c'-d' holat) ortib boradi (2 chiziq). Tadqiqot natijalarini 4-rasmda keltirilgan namunaning mikrotuzilma modeli va zonalar diagrammasi asosida quyidagicha tushuntirish mumkin.



3-rasm. Solishtirma qarshilik (a), zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi va harakatchanligining (b) temperaturaga bog'liqligi.

4-rasmda mos holda, namunaning (a) va (b) sirt sohalarini mikrostruktura tuzilishi modeli va donadorliklararo chegara sohasi zonalar diagrammasi (c) tasvirlangan. Namuna tuzilishini shartli ravishda, uning donadorligini (1) va donadorliklararo chegara sohalarini (2) bilan belgilash mumkin. Polikristal yarimo'tkazgichda zaryad ko'chish jarayoni asosan donadorliklararo chegara sohalarini bilan izohlanadi<sup>4</sup>.

Donadorliklararo chegara sohalarida kirishmali holat va nuqsonlar turli  $E_{ip}$  energetik sathli rekombinatsiya markazlaridan iborat lokallashgan tuzoqlarni hosil qiladi (4c-rasm). Ular donadorliklararo chegaralarida lokallashgan holatda bo'lib, to'siq effektini hosil qiladi. Lokallashgan tuzoqlarda zaryad tashuvchilar ushlanishi va qayta ozod bo'lishi potensial to'siq balandligi ( $\phi$ )ning, bu esa o'z navbatida  $\rho$  ning o'zgarishiga olib keladi. Setto modeliga asosan  $\rho$  uchun quyidagi ifodani yozish mumkin:

<sup>4</sup>Поликристаллические полупроводники. Физические свойства и применения: Пер. с англ. // Под.ред. Харбек Г. -М., «Мир». 1989-344 с., ил.

$$\rho = \frac{k}{q\langle a \rangle A^* T} \exp(q\phi/kT) \quad (1)$$

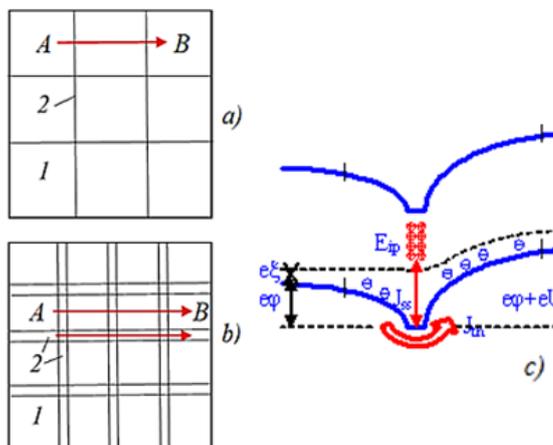
bu yerda,  $q$  – elektron zaryadi,  $k$  – Bolsman doimiysi,  $\langle a \rangle$  - donadorlik o‘lchami,  $A^*$  – Richardsonning effektivlik doimiysi,  $T$  – temperatura.

Donadorliklararo chegara sohalari  $\phi$  lokallashgan tuzoqlarda ushlanayotgan zaryadlar miqdori ( $Q_i$ )ga bog‘liq:

$$\phi = \frac{Q_i^2}{8\epsilon\epsilon_0 q N_G} \quad (2)$$

bu yerda  $N_G$  – elektrik jihatdan faol bo‘lgan legirlangan kirishmalar konsentratsiyasi,  $\epsilon$  va  $\epsilon_0$  mos holda muhitning nisbiy va vakuumning dielektrik singdiruvchanligi.

(2) ifodadan ko‘rinadiki, donadorliklararo chegara sohadagi (2 - soha, 4s-rasm)  $Q_i$  ning ortishi  $\phi$  ning, bu esa o‘z navbatida  $\rho$  ning ortishiga olib keladi. Bizning holda,  $\rho$  ning ortishi (a) va (b) sirtida lokallashgan tuzoqlar paydo bo‘lish tabiatiga bog‘liq. Dastlab, (a) sirt soha mikrostuzilma modeli va zaryad ko‘chish jarayonlarini ko‘rib chiqaylik. Tyemperatura ortishining dastlabki bosqichida,  $T \sim 300 \div 350$  K da  $E \sim 0,15$  eV



**4-rasm. Namunaning mikrotuzilish modeli va zaryad ko‘chish jarayonini**

va  $E \sim 0,17$  eV energetik sathlar paydo bo‘ladi<sup>5</sup>. Ularda ushlangan zaryad tashuvchilar miqdori  $Q_i$  ning ortishi  $n$  ning kamayishiga va  $\rho$  ning ortishiga olib keladi (3-rasm, a-b holat).  $T \sim 350 \div 550$  K da  $E_{ip}$  sathli lokallashgan tuzoqlar konsentratsiyasiga nisbatan valent zonadan ajralib chiqqan  $n$  ortib boradi. Bu  $\rho$  ning kamayishiga olib keladi (b-c sohada).  $T \sim 550 \div 600$  K  $n$  hamda lokallashgan tuzoqlar konsentratsiyasi tenglashadi va bu holda  $\rho$  turg‘un o‘zgaradi.  $T \sim 600 \div 710$  K da  $E_{ip}$  sathli lokallashgan tuzoqlar konsentratsiyasi yana  $n$  ga nisbatan ortadi. Bunda,  $Q_i$  bilan  $\rho$  ortadi (c-d holat).  $T \sim 710 \div 775$  K da yangi  $E_{ip}$  sathli rekombinatsiya markazlarining namoyon bo‘lishi  $\rho$  ning (d-e holat) sarkab o‘zgarishiga olib kelayotgan bo‘lishi mumkin.

(b) sohada donadorliklararo chegara kengligi (a) sirt sohaga nisbatan kengroq bo‘lgani uchun bu sohada  $E_{ip}$  sathli lokallashgan tuzoqlar miqdori hamda hosil bo‘lish ehtimoli yuqori bo‘ladi. Tadqiqot natijalari ko‘rsatadiki,  $T \leq 575$  K da  $\rho$  ning ortishi (a'-b' holat) poli-Si<sup>6</sup> natijalarga mos keladi. Ya'ni,  $T \sim 300 \div 600$  K da ketma-

<sup>5</sup>L.O. Olimov. Polikristall kremniy donadorliklararo chegaralari: mikrotuzilmasi, zaryad holatlari va p-n - o‘tishlari. 01.04.10 – Yarimo‘tkazgichlar fizikasi (fizika - matematika) doktorantlik disertatsiyasi. 2016 y.

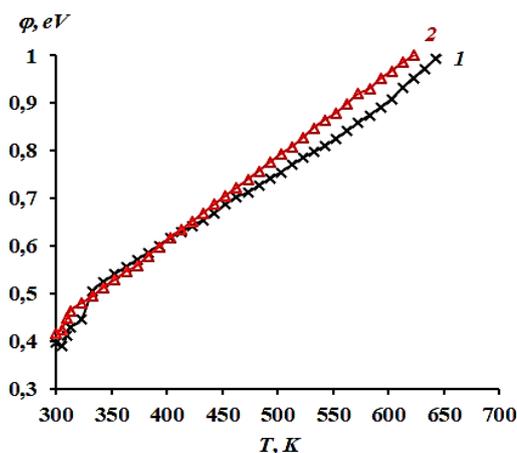
<sup>6</sup>B.M. Abdurakhmanov, M.S Saidov, L.O Olimov. Electrophysical Properties of Solar Polycrystalline Silicon and Its n<sup>+</sup>-p Structures at Elevated Temperatures. Applied Solar Energy. 2008 vol. 44. №1, p.46÷52.

ket  $E_{ip1} \sim 0,15$  eV,  $E_{ip2} \sim 0,17$  eV,  $E_{ip3} \sim 0,36$  eV,  $E_{ip3} \sim 0,3$  eV sathli rekombinatsiya markazlarida ushlangan zaryad tashuvchilar miqdori  $Q_i$  ning ortishi  $T \sim 600 \div 710$  K da  $\rho$  ning ortishiga olib keladi ( $a'-b'$  holat). Huddi shu temperatura oralig'ida  $n$  kamayishi ( $a'-b'-c'$  holat) hamda ma'lum temperaturalarda sakrab o'zgarishi mulohazalarni tasdiqlaydi. Ya'ni,  $T \sim 325 \div 400$  K dagi sakrab o'zgarishi  $E_{ip1} \sim 0,15$  eV,  $E_{ip2} \sim 0,17$  eV hamda  $E_{ip3} \sim 0,36$  eV sathlarning paydo bo'lishiga mos keladi. Temperatura ortishining keyingi bosqichlarida  $E_{ip}$  energetik sathli lokallashgan tuzoqlar ionlanishni boshlaydi. Natijada, bir vaqtning o'zida zaryad tashuvchilar A sohadan V sohaga donadorliklararo chegara sohalari orqali hamda donadorliklararo chegara sohalari bo'ylab ko'chadi (5b-rasm). Zaryad tashuvchilarning lokallashgan tuzoqlar bo'ylab ko'chishi  $J_{ss}$  ning paydo bo'lishiga olib keladi (5c-rasm).  $J_{ss}$  tok tuzoqlar to'liq o'tkazuvchanligi ( $Y_{ss}$ ) ya'ni, tuzoqlarning donadorlik sirtlari va energiyasi bo'yicha taqsimlanishiga bog'liq bo'lgan to'liq o'tkazuvchanlik hamda potensial to'siq balandligi ( $\delta\varphi$ ) ga bog'liq.

$$J_{ss} = Y_{ss} \delta\varphi \quad (3)$$

Bu holda,  $\varphi$  kamaymaydi,  $Y_{ss}$  ortadi. Bizning holda,  $\rho$  (3-rasm,  $b'-c'$  holat) kamayishi tuzoqlar o'tkazuvchanligi<sup>7</sup> natijalariga mos keladi. Lokallashgan tuzoqlar ionlanishi jarayonining ortishi esa  $n$  ning ortishiga (4-rasm, 2 chiziq,  $c'-d'$  holat) olib keladi.

Ko'rib o'tilgan mulohazalarga oydinlik kiritish uchun har ikki (a) hamda (b) sirt sohalarida  $\varphi$  ning temperaturaga bog'liqligi o'rganildi. 5-rasmda  $\varphi$  ning temperaturaga bog'liqligi keltirilgan. Tadqiqot natijalari ko'rsatadiki, har ikki sirt sohalarida  $\varphi \sim 0,39 \div 1,0$  eV oraliqlarida o'zgarishi aniqlandi.  $T \leq 400$  Kda  $\varphi$  ning o'zgarishi deyarli bir-biriga mos keladi.  $T \geq 400$  Kda esa (a) sirt sohaga nisbatan (b) sirt sohada  $\varphi \sim 0,061$  eV farq bilan o'zgaradi. Bizning fikrimizcha, temperatura ortishi bilan bir vaqtning o'zida ikki xil jarayon yuz beradi. Ya'ni, (b) sirt sohada  $E_{ip}$  energetik sathlardagi tuzoqlar ionlashadi, natijada zaryad tashuvchilar tuzoqlar bo'ylab ko'chadi. Donadorliklararo chegara sohalari orqali o'tayotgan zaryad tashuvchilar bo'shab qolgan  $E_{ip}$  energetik sathlarda ushlanadi.

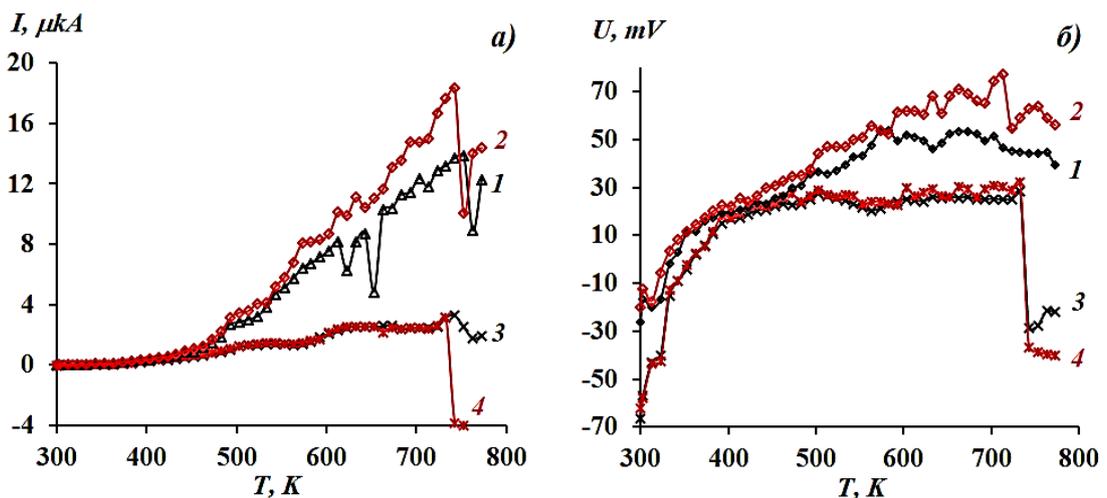


5-rasm. Potensial to'siq balandligining temperaturaga bog'liqligi: 1 va 2 mos holda (a) hamda (b) sirt sohalari.

<sup>7</sup>L.O. Olimov, B.M. Abdurakhmanov, F.L. Omonboev. Some Features of the Transport of Charge Carriers in the Grain Boundaries of Polycrystalline Silicon. International Journal of Advanced Research in Physical Science Volume 1, Issue 6, October 2014, PP 12-17.

Bu (a) nisbatan (b) sirt sohada  $\varphi \sim 0,061$  eV yuqoriroq qiymat bilan o'zgarishiga olib keladi (2 chiziq).

Dissertatsiyaning “**Kremniy zarrachalari negizida olingan poli-Si ning termoelektrik xossalari**” deb nomlangan to'rtinchi bobida namunalarning termoelektrik xossalari, ular asosida yarimo'tkazgichli termoelektrik materiallari olish usuli va uning xarakteristikalari bayon qilingan. 6-ramda qorong'ulikdagi va yoritilgandagi toki ( $I$ ) va kuchlanish ( $U$ ) larning temperaturaga bog'liqligi keltirilgan. Ta'kidlash joizki, temperatura ortishi bilan qorong'ulikdagi va yoritilgandagi ( $I_q$  va  $I_f$ ) tok kuchi hamda ( $U_q$  va  $U_f$ ) kuchlanishlari yo'nalishi jihatidan bir-biriga mos kelsada, ularning hosil bo'lishi (a) va (b) sirt sohalari mikrotuzilmasiga bog'liq holda bir-biridan farq qilishi aniqlandi. Jumladan, temperatura ortishi bilan (a) sirt sohada  $I_q$  va  $I_f$  “musbat” ishora bilan,  $U_q$  va  $U_f$  kuchlanishlar esa yo'nalishini “manfiy”dan “musbat”ga o'zgartirib ortadi (1 va 2 chiziq). Aksincha,  $T \leq 330$  Kda (b) sirt sohasida har ikki parametr  $I_q$  va  $I_f$  hamda  $U_q$  va  $U_f$  “manfiy” ishora bilan kamayib, so'ngra “musbat” ishora bilan ortadi (3 va 4 chiziq).  $T \geq 745$  Kda  $I_f$  birdan, qayta yo'nalishini “manfiy” ishora bilan o'gartiradi.



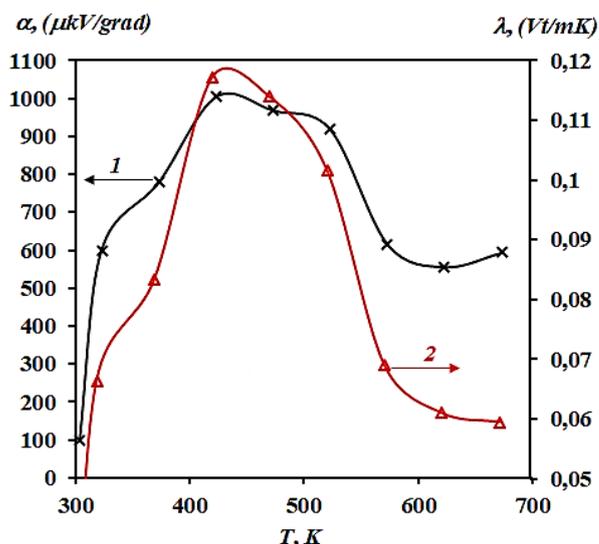
**6-rasm. Kuchlanish (a) va tok kuchining (b) temperaturaga bog'liqligi: 1 va 3 qorong'ulik, 2 va 4 yorug'likka tegishli.**

$T \sim 300$  Kda (a) sirt soha  $I_f$  toki  $I_q$  dan 10 marta ortiq,  $U_f$  toki  $U_q$  dan 0,77 marta kichik, (b) sirt soha  $I_f$  toki  $I_q$  dan 0,8 marta,  $U_f$  toki  $U_q$  dan 0,94 marta, (a) sirt soha  $I_q$  toki esa (b) sirt soha  $I_q$  tokidan 0,02 marta,  $U_f$  kuchlanishi (b) sirt soha  $U_f$  kuchlanishidan 0,32 marta,  $U_q$  kuchlanishi esa  $U_q$  kuchlanishidan 0,39 marta kichik qiymatlarni qabul qiladi. Fotouyg'otish hisobiga elektron-kovak juftliklari hosil bo'lishi (a) sirt sohada (b) sirt sohaga nisbatan kuchliroq yuz beradi. Bu (a) sirt soha  $I_f$  toki (b) sirt soha  $I_f$  tokidan 0,25 marta katta qiymatlarni qabul qilishiga olib keladi. Xuddi shunday holat  $T \sim 745$  Kda ham kuzatiladi. Ya'ni (a) sirt soha  $I_f$  toki (b) sirt soha  $I_f$  tokidan 4,73 marta,  $I_q$  toki esa (b) sirt soha  $I_q$  tokidan 4,2 marta,  $U_f$  kuchlanishi (b) sirt soha  $U_f$  kuchlanishidan 1,7 marta,  $U_q$  kuchlanishi esa  $U_q$  kuchlanishidan 1,54 marta katta qiymatlarni qabul qiladi. Xuddi shu temperaturada (a) sirt soha  $I_f$  toki  $I_q$  dan 1,34 marta,  $U_f$  toki  $U_q$  dan 1,42 marta, (b) sirt soha  $I_f$  toki  $I_q$  dan 0,19 marta,  $U_f$

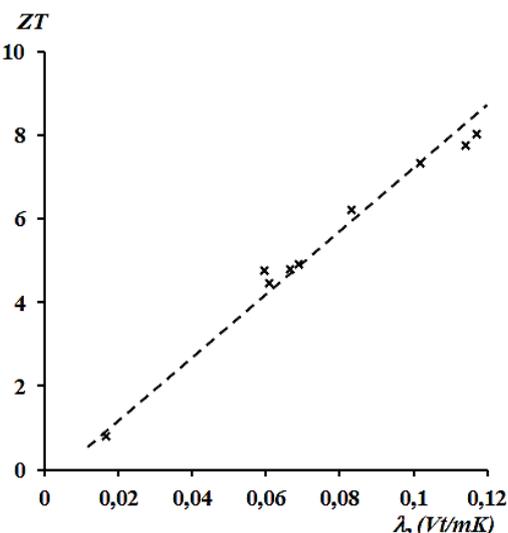
toki  $U_q$  dan 1,3 marta katta qiymatlarni qabul qilishi fotouyg'otish hisobiga elektron-kovak juftliklarining hosil bo'lishiga bog'liq bo'lishi mumkin.

7-rasmda termoelektr yurituvchi kuch ( $\alpha$ ) va issiqlik o'tkazuvchanlikning ( $\lambda$ ) temperaturaga bog'liqligi keltirilgan. Natijalardan ko'rinadiki,  $T \leq 425$  K da  $\alpha \sim 1000 \mu\text{K}/\text{grad}$ ,  $\lambda \sim 0,118 \text{ Vt}/\text{mK}$  gacha ortib borib, so'ngra har ikki parametr kamayib boradi. Bu parametrlarning ortishi temperatura farqiga mos holda paydo bo'lgan zaryad tashuvchilar yoki fononlar oqimiga bog'liq bo'lsa,  $T \geq 425$  Kdagi holati donadorliklararo chegara sohalardagi turli energetik sathlardagi tuzoqlarning ionlanishiga bog'liq.

Materiallarning termoelektrik parametrlaridan yana biri termoelektrik o'zgartirgich (ZT) samaradorligi hisoblanadi. Bugungi kunda,  $ZT \sim 2 \div 4$  bo'lgan materiallar olingan<sup>8</sup>. 8-rasmda  $\lambda$ ni boshqarish orqali ZT ortirish imkoniyatlari keltirilgan. Rasmdan ko'rinadiki,  $\lambda$ ni boshqarilishi ya'ni, muayyan sharoitlarda donadorliklararo chegara sohasida turli energetik sathli kirishmali holatlarda elektron-kovak juftliklarining hosil qilish materiallarning termoelektrik o'zgartirgich (ZT) samaradorligini oshirish imkonini beradi.



**7-rasm. Termoelektr yurituvchi kuch va issiqlik o'tkazuvchanlikning temperaturaga bog'liqligi.**

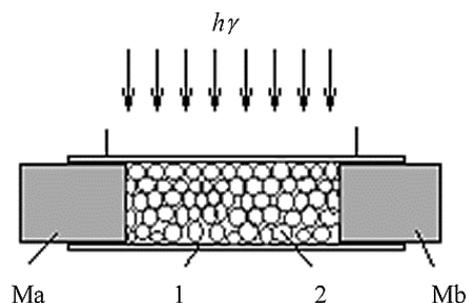


**8-rasm. ZT ning issiqlik o'tkazuvchanlikka bog'liqligi.**

Ushbu ishda kremniy zarrachalarini quyosh nurlarida qizdirib biriktirish orqali termoelektrik material tayyorlash usuli ishlab chiqildi. Ushbu usulda taglik sifatida issiqqa bardosh (1) dielektrik materialdan foydalaniladi (9-rasm). Uning ikki qismiga metal kontaktlar ( $M_a$  va  $M_b$ ) qo'yiladi va ular o'rtasiga etilspirti yordamida tayyorlangan kremniy zarrachalari (2) aralashmasi uncha katta bo'lmagan kuch bilan bosiladi, natijada aralashma taglik shaklini oladi. Bunda, aralashma qalinligi  $2,5 \div 3$  mm.dan oshmasligi zarur. Aralashma qalinligi  $2,5 \div 3$  m.dan kam bo'lganda granular birikishi o'rniga suyuqlanish darajasi ortadi, aksincha, undan yuqori bo'lganda hajm bo'ylab temperatura bir me'yorda taqsimlanmaydi. Temperaturalar

<sup>8</sup>A.A. Снарский, А.К. Сарычев, И.В. Безсуднов, А.Н. Лагарьков. Термоэлектрическая добротность объемных наноструктурированных композитов с распределенными параметрами. /Физика и техника полупроводников, 2012, том 46 вып. 5, с. 677 - 682.

farqi xisobiga sirt sohalarida birikish yuqori aksincha, ostki qismida birikish sust bo‘ladi. Kremniy zarrachalarini qizdirib biriktirish jarayonida quyosh nurlari ( $h\gamma$ ) dastasi perpendikulyar ravishda to‘g‘ridan-to‘g‘ri kremniy zarrachalariga tushadi. Taglikka solingan kremniy zarrachalari quyosh sandoni qurilmasining fokusi bo‘ylab harakatlantiriladi. Ya’ni, quyosh nurlari dastasidagi temperatura  $600^{\circ}\text{C}$  dan sekin astalik bilan  $1200^{\circ}\text{C}$  bo‘lgan masofaga siljitib boriladi, bu jarayon  $5\div 7$  minutda bajariladi.



**9-rasm. Kremniy zarrachalarini quyosh nurlari bilan qizdiribbiriktirish sxemasi.**

Ta’kidlash joizki, agar kremniy granularlar birdan  $1200^{\circ}\text{C}$  bo‘lgan temperaturada qizdirilsa, kremniy granularining sochilishi kuzatiladi. Shuning uchun taglikka solingan kremniy granulari quyosh sandoni fokusi bo‘ylab past temperaturadan yuqori temperatura holatiga harakatlantiriladi. Myetal kontaktlarga tushayotgan quyosh nurlari dastasi  $1\div 1,5$  mm.dan ortmasligi kerak. Bu metal kontaktlar bilan kremniy granulari o‘rtasida mustahkam kontak bo‘lishini ta’minlaydi. Ushbu usulda maxsus qurilmalar bilan preslash hamda katta energiyalarga mo‘ljallangan maxsus qurilmalar yordamida termik ishlov (spekaniya) berish jarayonlari umuman bajarilmaydi. Tyermoelektrik materiallar tayyorlash usuli etilspirt bilan o‘lchami 1 mikrondan kichik kremniy zarrachalarining aralashmasini tayyorlash, quyosh nurlari dastasi yordamida qizdirish yo‘li bilan kremniy zarrachalarining o‘zaro bir-biri bilan hamda ularni metal kontaktlar bilan mustahkam biriktirish, ikkitutashgan kremniy granulari o‘rtasida tunnelli kontaktlar hamda lokal energetik sathlar hosil qilish, energetik sathlar elektronlarning rezonansli tunnellashtirilishini ta’minlash, shuningdek, istalgan shakldagi termoelektrik materiallar tayyorlash imkonini beradi. Nanoqatlam taqiqlangan zonasida quyidagi munosabatni qanoatlantiruvchi lokal energetik sathlar hosil qilinadi hamda elektronlarning rezonansli tunnellashtirilishini ta’minlanadi.

$$E_c^{Si} \leq E_N < E_c^{SiO_2} \quad (1)$$

bu yerda  $E_c^{Si}$  – kremniy o‘tkazuvchanlik zonasidagi elektronlar energiyasi;  $E_N$  – kremniyoksidi o‘tkazuvchanlik zonasi pastidagi lokal energetik sathlar;  $E_c^{SiO_2}$  – kremniyoksidi o‘tkazuvchanlik zonasi pastidagi elektronlar energiyasi.

Taklif etilgan termoelektrik materialdan foydalanish va uni ishlab chiqarish usuli issiqlik elektr qurilmalari va ularni ishlab chiqarish xarajatlarini sezilarli darajada qisqartirish imkonini beradi. Xom ashyo va asosiy xarakteristikalari mavjud analog va prototiplardan tubdan farq qilishi bilan talablarga javob beradi. Ushbu konstruktsiya № FAR 01593 patenti bilan ximoyalangan.

## DISSERTATSIYA ISHIDA OLINGAN ASOSIY NATIJALAR VA XULOSALAR

Kremniy zarrachalarini quyosh nurlari bilan qizdirib biriktirish orqali olingan polikristal kremniy elektrofizik va termoelektrik xarakteristikalarining hajmiy nuqson va lokallashgan kirishmali holatlariga bog'liqlik qonuniyatlarini hamda ular asosida termoelektrik materiallar olishning fizik mexanizmlarini tadqiq qilish asosida quyidagi hulosalar qilindi:

1. Kremniy zarrachalarini quyosh nurlari bilan qizdirib polikristal kremniy olish texnologiyasi ishlab chiqilgan. U etil spirti yordamida kremniy zarrachalari qorishmasini tayyorlash, so'ngra quyosh nurlari bilan qizdirib biriktirishdan iborat.

2. Quyosh nurlari bilan qizdirib olingan kremniy ikki strukturali polikristal tuzilishga ega bo'lib, u quyosh nurlari tushgan (*a*) va tushmagan (*b*) sirt sohalari bir-biridan farq qiluvchi ikki strukturali bo'lishi aniqlandi. Rentgen spektral taxlil natijalari ko'rsatadiki, namuna har ikki sirti donadorlik o'lchami  $10\div 20$  mkm bo'lgan kremniy atomlaridan iborat bo'lib, quyosh nurlari tushgan sirt sohada temperatura yuqoriroq bo'lgani uchun kremniy zarrachalari bir me'yorda birikishi va nisbatan temperaturasi past bo'lgan sirt sohada kremniy zarrachalari birikishi to'plamlardan iborat bo'lishi asosida tushuntirildi.

3. Temperatura o'zgarishi jarayonida ikki strukturali polikristal kremniyning elektrofizik xossalari quyosh nurlari tushgan (*a*) va tushmagan (*b*) sirt sohalari tuzilishga bog'liqligi ko'rsatilgan bo'lib, (*a*) sirt soha elektro'tkazuvchanligi hamda zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi 575 K gacha ortishi so'ngra kamayishi, aksincha, (*b*) sirt soha elektro'tkazuvchanligi hamda zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi temperatura ortishi bilan sakrab o'zgarishi, shuningdek, har ikki sirtida ham zaryad tashuvchilar harakatchanligi temperatura bilan kamayishi aniqlangan.

4. Quyosh nurlari bilan qizdirib olingan polikristal kremniyning donadorlik va donadorliklararo chegara sohalariidan iborat ikki strukturali tuzilish modeli va ularda zaryad ko'chish jarayonlarini tushuntirish mexanizmi ishlab chiqilgan.

5.  $T=300\div 775$  K da ikki strukturali polikristal kremniy donadorliklararo chegarada potensial to'siq balandligi  $\varphi\sim 0,39\div 1,0$  eV oraliqlarida o'zgarishi, shuningdek, (*a*) sirt sohaga nisbatan (*b*) sirt sohada  $\varphi\sim 0,061$  eV farq qilishi aniqlangan bo'lib, bu (*b*) sirt sohada temperatura o'zgarishi jarayonida lokallashgan tuzoqlarning ionlanishi kuchli yuz berishi asosida tushuntirilgan.

6.  $T\sim 300\div 800$  K da  $U_q$  va  $I_q$  hamda  $U_f$  va  $I_f$  hosil bo'lishi namunaning quyosh nurlari tushgan (*a*) va tushmagan (*b*) sirt sohalari tuzilishga bog'liqligi aniqlangan. Jumladan, temperatura ortishi bilan (*a*) sirt sohada  $I_q$  va  $I_f$  "musbat" ishora bilan,  $U_q$  va  $U_f$  kuchlanishlar esa yo'nalishini "manfiy" dan "musbat"ga o'zgartirib ortadi. Aksincha,  $T\leq 330$  K da (*b*) sirt sohasida har ikki parametr  $I_q$  va  $I_f$  hamda  $U_q$  va  $U_f$  "manfiy" ishora bilan kamayib, so'ngra "musbat" ishora bilan ortadi.  $T\geq 745$  K da  $I_f$  birdan, qayta yo'nalishini "manfiy" ishora bilan o'garadi. Bu temperatura va yorug'lik nurlari ta'sirida taqiqlangan zonasidagi turli energetik sathlarni hosil

qilgan kirishmali holatlarda elektron-kovak juftliklarining hosil bo'lishi ko'rsatib berilgan.

7. Temperatura ortishi bilan paydo bo'lgan zaryad tashuvchilar yoki fononlar oqimiga hisobiga  $T \leq 425$  Kda termoelektr yurituvchi kuch ( $\alpha$ ) va issiqlik o'tkazuvchanlik ( $\lambda$ ) ortishi hamda  $T \geq 425$  Kda donadorliklararo chegara sohalarda turli energetik sathlardagi tuzoqlarning ionlanishi  $\alpha$  va  $\lambda$  larning kamayishiga olib kelishi aniqlangan.

8. Tyermoelektrik o'zgartirgich (ZT) samaradorligi aniqlangan bo'lib,  $\lambda$  ni boshqarish orqali ZT ortirish imkoniyatlari taklif etilgan.

9. Ilk bor, quyosh nurlari bilan qizdirib kremniy zarrachalarini biriktirish orqali issiqlik energiyasini elektr energiyasiga o'zgartirgich tayyorlash usuli taklif etilgan bo'lib, uning asosiy xarakteristikalarini  $T \leq 425$  Kda  $\alpha \sim 1000 \mu\text{V/grad}$ ,  $\lambda \sim 0,118 \text{ Vt/mK}$  ni tashkil qilishi aniqlangan.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ PhD.03/30.12.2019.Т.66.01 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ  
УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ НАМАНГАНСКОМ ИНЖЕНЕРНО-  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ**

---

**АНДИЖАНСКИЙ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ**

**АНАРБОЕВ ИКБОЛЖОН ИБРОРХИМОВИЧ**

**ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ И ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА  
КРЕМНИЯ ПОЛУЧЕННОГО НАГРЕВАНИЕМ СОЛНЕЧНЫМИ  
ИЗЛУЧЕНИЯМИ**

**01.04.10 – Физика полупроводников**

**АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ ДОКТОРА ФИЛОСОФИИ (PhD)  
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК**

**Namangan – 2025**

**Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за V2017.2.PhD/FM100**

Диссертация выполнена в Андижанском машиностроительном институте  
Автореферат диссертации на трёх языках (узбекском, русском, английском)  
размещён на веб-странице ([www.anmiedu.uz](http://www.anmiedu.uz)) Научного совета института и на  
Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» ([www.ziynet.uz](http://www.ziynet.uz)).

**Научный руководитель:** **Олимов Лутфиддин Оманович,**  
доктор физико-математических наук,  
**Официальные аппоненты:** Онаркулов Каримберди Эгамбердиевич  
доктор физико-математических наук, профессор  
Абдулазизов Бахром Тошмирза ўгли  
доктор физико-математических наук, профессор  
**Ведущая организация:** **Урганч государственный университет**

Защита диссертации состоится \_\_\_\_ \_\_\_\_ 2025 года в \_\_\_\_ часов на заседании  
Научного совета PhD.03/30.11.2022.FM/T.66.04 при Наманганском инженерно –  
технологическом институте по адресу: 160115, г. Наманган, ул. Касансайская -7,  
Административное здание Наманганского инженерно – технологического института, 1-  
этаж, малый зал совещаний, Тел./факс: (99869) 225-10-07; (99869) 225-76-75, e-mail:  
[niei\\_info@edu.uz](mailto:niei_info@edu.uz).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре  
Наманганского инженерно – технологического института (зарегистрирована за № 292) по  
адресу: 160115, г. Наманган, ул. Касансайская -7, Тел. (99869) 228-76-70.

Автореферат диссертации разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 г.  
(реестр протокола рассылки № \_\_\_\_ от \_\_\_\_\_ 2025 г.)

**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. Шарибаев**  
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 настоящее время в мире интенсивному развитию физики полупроводников способствует изучение технологии получения и характеристик поликристаллического кремния. Особое внимание в мире уделяется развитию и изучению электрофизических, фотоэлектрических и термоэлектрических характеристик солнечных элементов на основе микро и нано частиц поликристаллического кремния, полупроводниковых термоэлектрических материалов и полупроводниковых приборов. Исследование физических свойств таких материалов, проявляющихся в определённых условиях и зависящих от их физических параметров, а также изучение протекающих в них физических процессов являются важнейшими задачами.

На сегодняшний день в мире в престижных научно-исследовательских институтах проводятся масштабные научные исследования, в частности, проводится множество научно-исследовательских работ, направленных на изучение свойств микро- и гранулированного кремния. В связи с этим изучаются специфика и физические свойства различных модификаций кремния, особое внимание уделяется установлению возможностей получения поликристаллов и новых типов полупроводников, а также различных типов термоэлектрических материалов на их основе.

В годы независимости особое внимание отводилось развитию физики полупроводников, в частности созданию новых видов материалов преобразующих энергию, обладающих качественными показателями, а также изучению их физических свойств, отвечающим требованиям мировых стандартов. В Стратегии развития нового Узбекистана на 2022-2026 годы поставлен ряд задач. Указ Президента Республики Узбекистан от 28 января 2022 года № УП-60 «О стратегии развития нового Узбекистана на 2022 - 2026 годы» (с изменениями и дополнениями по состоянию на 24.02.2025 г<sup>9</sup>). В этом плане ощутимых результатов добились в области создания технологии получения поликристаллических полупроводниковых материалов на основе частиц кремния, изучения электрофизических и термоэлектрических свойств, получения энергопреобразующих материалов путём управления их физическими свойствами, проявляющимися в определённых условиях.

Практическое значение находят создание высоко эффективных солнечных элементов, полупроводниковых приборов, термохолодильников, термоэлектрических генераторов и термоэлектрических материалов на основе фотоэффекта, снижение себестоимости материалов созданных с помощью микро и нано размерных Si поликристаллов, разработки по созданию

---

<sup>9</sup> Указ Президента Республики Узбекистан от 28 января 2022 года № УП-60 «О стратегии развития нового Узбекистана на 2022 - 2026 годы» (с изменениями и дополнениями по состоянию на 24.02.2025 г

качественных, дешёвых, энергоэффективных полупроводниковых преобразователей энергии, обладающих высококачественными показателями, отвечающим требованиям мировых стандартов. В этой связи злободневными задачами являются следующие научные исследования и разработки: приготовление частиц кремния; разработка технологии получения образцов кремния, путём нагревания его частиц солнечными излучениями; исследование микроструктуры и морфологии образцов; освещение механизма образования проникающих зон и примесей на приграничных областях воссоединения; влияние изменения температуры на свойства проникающих зон и на перемещения зарядов; определение термоэлектрических характеристик; разработка технологии получения термоэлектрических материалов на основе частиц кремния. Выше перечисленные научные исследования определяют актуальность темы настоящей диссертации.

Данная диссертация в определённой степени послужит решению задач поставленных Постановлениями Президента Республики Узбекистана ПП-5032 от 19 марта 2021 года «Повышение качества образования в области физики и мероприятия по развитию научных исследований», ПП-5063 от 9 апреля 2021 года «Мероприятия по развитию возобновляемой и водородной энергетики», ПП-5063 от 9 апреля 2021 года «Мероприятия по введению государственного учёта за установками и производимой на них энергии», Постановление Кабинета министров Республики Узбекистана за № 639 от 12 октября 2021 года «...» и другими нормативно-правовыми документами.

**Связь исследования с значимыми направлениями развития науки и технологий республики.** Данное исследование проводилось на основе приоритетных направлений «Развития энергетики, экономии энергоресурсов, транспорта, машин и приборостроения, современной электроники, микроэлектроники и электронного приборостроения».

**Степень изучения проблемы.** Многими ведущими зарубежными учёными в научных центрах ведутся исследования по созданию и изучению электрофизических, фотоэлектрических и термоэлектрических характеристик солнечных элементов на основе микро и нано частиц поликристаллического кремния, полупроводниковых термоэлектрических материалов и полупроводниковых приборов. Особого внимания заслуживают работы американских (Е.Ж. Тимм, Т.П. Хоган, Д. Кендиг, А. Шакури, А.И. Хочбаум . Devid Maykl Rou., Н. Julian. Goldsmid<sup>10</sup>), германских (М. Асен-Палмер, Э. Гмелин, М. Кардона, Ж. Дебур, С. Стиве, Ш. Фолькер, Е. Муллер, К. Забреки), греческих (А.Валалаки, А.Г. Нассиопоулоу), японских (Л.Ян, Н.Ян, Б.Ли, П.Жууд, М.Охта, Чонгпу Заи, С. Сано, Ш. Ямамото), российских (Ю. М .Смирнов, И.А.Каплунов, В.И.Смирнов А. П. Жернов, А. В. Инюшкин, А. Талденков, В. И. Ожогин, Дмитриев, И.П. Звягин, Я.Б. Магомедов, М.И.

---

<sup>10</sup> Международный научный обзор исследований по теме диссертации был выполнен на основе: Kanatzidis, Mercouri G. n. Mahanti, S.D. Hogan, Timothy P. Thermoelectric materials-Congresses. Название. Серия Книга 2021. David Michael Rowe. Materials, Preparation, and Characterization in Thermoelectrics: Thermoelectrics and Its Energy Harvesting. Книга .25 апреля 2012 г. Н. Julian. Goldsmid. Introduction to Thermoelectricity Книга © 2016

Федоров, М.М. Гаджиалиев, В.В. Каминский) учённых, которые проводили научно-исследовательские опыты по получению поликристаллического кремния, по повышению их технологических свойств, применения их в высоко технологичных устройствах и интегральных микросхемах. Так например, Д.Кэхил исследовал термоэлектрические свойства поликристаллического кремния под воздействием тепла. Л.Вебер, Э.Гмелин исследовали процесс выход заряда из нагретого поликристаллического кремния и выявили, что в пределах  $30 < T > 300\text{K}$  понижение удельного сопротивления приводит к повышению подвижности зарядов и наоборот повышение удельного сопротивления оказывает воздействие на электрическую проводимость. П.Жууд, М.Охта, Чонгпу при получении из различных размеров поликристаллического кремния термоэлектрического материала использовали метод понижения теплопроводности полупроводников. Л.Ян., Н.Ян., Б.Ли. на основании физических свойств нано структуры кремния и решения проблем при воссоединения его частиц, определили возможность получения поликристаллического кремния. Учённые А.П. Жернов, А.В. Инюшкин разработали метод получения поликристаллического кремния на основе порошковой технологии. Узбекские учённые М.С. Саидов, А.Мамадолимов, М.Бахадирхонов, С.З. Зайнобиддинов внесли свой вклад в развитие физики нано частиц и нано техноогий. А.М. Қосимохунова А.Ю. Лейдерман ва А.С.Саидов, Б.М. Абдурахманов, Л.О. Олимов впервые определили образование тепло и фото вольтажного эффектов в соединениях микро и нано частиц поликристаллического кремния, а также ими были освещены электрофизические и фотоэлектрические свойства на границах воссоединения моно и поликристаллов Si.

**Связь исследования с планом научных исследований высшего учебного заведения, где выполнена настоящая диссертация.** Данная диссертация выполнена в рамках научных исследований Андижанского машиностроительного института, предусмотренных планом научно-исследовательских мероприятий, в частности «Создание нетрадиционных и альтернативных источников энергии на основе микро и нано полупроводников с проникающим вольтажным эффектом» (2017-2020гг.) за №БФЗ – 303 и «Производство и внедрение микро и нано размерных (гранулированных) полупроводниковых термоэлектрических материалов» (2021-2023) за №UZB-Ind-2021-92).

**Целью исследования является** определение физических механизмов и технических решений для получения термоэлектрических материалов на основе поликристаллического кремния, получаемого путем нагревания частиц кремния с помощью солнечного света.

**Задачи исследования:**

подготовка частиц кремния на основе порошковой технологии, разработка технологии получения образцов поликристаллического кремния путём соединения частиц нагреванием солнечными лучами;

изучение морфологии и микроструктуры поликристаллического кремния полученного путём нагревания солнечными лучами, выяснение причин появления примесей и состояния соединений;

определение действия на перемещения зарядов в области межзернистых границах и объёмных дефектов поликристаллического кремния, полученного нагреванием солнечными лучами в пределах температур  $T \sim 300 \div 800$  К;

определения механизма возникновения тока и напряжения в поликристаллическом кремнии, полученного нагреванием солнечными лучами в пределах температур  $T \sim 300 \div 800$  К;

изучение термоэлектрических свойств поликристаллического кремния, полученного нагреванием солнечными лучами в пределах температур  $T \sim 300 \div 800$  К;

разработка технологии получения образцов поликристаллического кремния путём соединения частиц нагреванием солнечными лучами.

**Объект исследования:** Образцы поликристаллического кремния с двумя различными поверхностями были получены на основе порошков Si путем нагревания их солнечным светом.

**Предмет исследования:** изучение микроструктуры, электрофизических и термоэлектрических свойств и механизма перемещения заряда в области воссоединения поликристаллического кремния полученного способом соединения частиц нагреванием солнечными лучами.

**Способы исследования:** в процессе исследования использованы комплексные информационные способы экспериментальной физики: подготовка частиц кремния на основе порошковой технологии, получение образцов поликристаллического кремния путём соединения частиц нагреванием солнечными лучами, определение морфологии и микроструктуры, а также оптических электрофизических и термоэлектрических свойств.

**Научная новизна исследования:**

- определены оптимальные условия получения чистого поликристаллического кремния без чужеродных примесей, путём соединения частиц нагреванием солнечными лучами;

- образование примесных состояний и дефектов в процессе прикрепления кремниевых частиц зависит от солнечного света и его температуры, а управление процессом основано на том, что можно получить поликристаллический кремний с двумя различными структурами;

- при  $T \leq 575$  К электропроводность и концентрация носителей заряда на передней поверхности поликристаллического кремния увеличиваются, а затем уменьшаются, напротив, электропроводность и концентрация носителей заряда на задней поверхности уменьшаются, а затем увеличиваются;

- установлено, что при  $T \sim 300 \div 800$  К подвижность носителей заряда как на лицевой, так и на тыльной сторонах поликристаллического кремния уменьшается с температурой от 0,0245 до 0,015 см<sup>2</sup>/Вс;

- установлено, что образование  $U_q$  и  $I_q$  и  $U_f$  и  $I_f$  при  $T \sim 300 \div 800$  К зависит от образования электронно-дырочных пар в доступных состояниях и дефектов на межзеренных границах двух структурного поликристаллического кремния;

- было обосновано, что на межзернистых границах двух структурного кремния высота потенциального барьера изменяется в пределах  $\varphi \sim 0,39 \div 1,0$  эВ, в пределах изменения температуры  $T = 300 \div 775$  К на поверхности (б) изменение потенциала различается на  $\varphi \sim 0,061$  эВ по сравнению с поверхностью (а);

- обосновано возможность получения термоэлектрического материала с термоЕУК 800-1000 микровольт/градус и теплопроводностью 0,12 Вт/м\*К при 400К.

#### **Практическая значимость исследования:**

представленная технология получения поликристаллического кремния, путём нагревания солнечными лучами измельчённых частиц кремния, имеет важное значение при производстве полупроводниковых материалов;

- управляя режимом нагрева частиц кремния солнечным излучением, можно получать двухструктурные поликристаллические полупроводники с различной микроструктурой поверхности и электрофизическими свойствами;

- получен термоэлектрический материал с термоЕУК 800-1000 микровольт/градус и теплопроводностью 0,12 Вт/м\*К при нагревании частиц кремния солнечными лучами до температуры 400К.

**Надёжность результатов исследования:** При проверке параметров, микроструктуры и морфологии, электрофизических и термоэлектрических характеристик поликристаллического кремния, полученного по технологии нагревания частиц кремния солнечными лучами, были применены стандартные и современные научные и технологические методы. Результаты и выводы обоснованы с теоретическими и экспериментальными, основанных на физических представлениях, данными.

**Научное и практическое значение результатов исследования:** Научное значение результатов исследования заключается в том, что появилось представление о технологии получения поликристаллического кремния, путём нагревания частиц кремния солнечными лучами, о микроструктуре, электрофизических и термоэлектрических свойств и механизма перемещения заряда в области воссоединения поликристаллического кремния.

Практическое значение результатов исследования в том, что разработан способ получения образцов поликристаллического кремния путём соединения частиц нагреванием солнечными лучами на основе порошковой технологии, а на их основе новых видов термоэлектрических материалов.

**Внедрение результатов исследования:** На основании научных результатов, полученных при разработке кремниевых структур путем связывания гранулированных частиц кремния, нагретых солнечным светом:

разработан и научно обоснован способ получения термоэлектрических материалов на основе частиц кремния (Уз ФАП 01593 от 25.02.2021 г. на полезную модель Агентства по интеллектуальной собственности Республики Узбекистан;

научные результаты, полученные при разработке нагретых солнечным лучом частиц гранулированного кремния и технологии их литья, были использованы при научном анализе свойств медных гранул и процессов литья электрических кабелей на их основе в АО «Андижан». кабель» Узбекистана Россия (справка № 04-3/1836 от 12.08.2022 г. акционерного общества «O'zeltexsanoat»). Использование научных результатов позволило контролировать степень окисления медных электрических кабелей от 50% до 80% и анализировать протекающие в них физические процессы;

научные результаты, полученные при получении структур кремния путем нагрева гранулированных частиц кремния солнечным лучом, были использованы учеными Ошского государственного университета в фундаментальных и практических проектах (справка №150 ОшГУ от 25 января 2022 года). Использование научных результатов позволило получить термоэлектрические материалы путем нагрева частиц кремния солнечным излучением с теплопроводностью 800-1000 мкВ/градус и теплопроводностью 0,12 Вт/м\*К при 400 К;

научные результаты получения термоэлектрического материала путем нагревания частиц кремния солнечным лучом использовались в научной лаборатории и научных работах кафедры «Физика и энергомашиностроение» Ошского технологического университета (Справка № 04-02/22 ОшГТУ КР от 10 февраля 2022 г.). Использование научных результатов позволило определить оптимальный режим получения поликристаллического кремния и термоэлектрических материалов путем нагревания частиц кремния солнечным лучом, изучить процессы переноса заряда в межкристаллитных граничных областях поликристаллических структур при изменении температуры, определить термоэлектрические характеристики.

**Результаты диссертационной работы:** Диссертационная работа была представлена и обсуждена на 2-х международных и 8-и республиканских конференциях.

**Объявление результатов исследования:** По теме диссертации издано 8 научных работ, из них 4 на местных и 4 на зарубежных научных изданиях, получен патент полезной модели от Агенства интеллектуальной собственности Республики Узбекистана.

Объем и содержание диссертации. В содержание диссертации входят введение, четыре главы, список использованной литературы и приложения. Текст диссертации составлен на 118 страницах.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**В введении** обоснована актуальность и значимость темы диссертации, проведение исследований согласно приоритетных направлений развития науки и технологий Республики Узбекистана, приведено обозрение зарубежных научных разработок по данной теме, определена степень изучения проблемы, цель исследования, задачи, определены объект и предмет исследования, пояснены научная новизна и практическая ценность

исследования, применение практических результатов, дана информация об изданиях работ по теме диссертации и о содержании исследований.

В первой главе под названием «Состояние проблемы и тенденции улучшения функциональных характеристик поли-Si и на меж зернистых границах в его объёме» освещены суть проблемы, технология получения поли-Si из частиц кремния, механизм образования в его объёме межзернистых границ, состояние электронов, дан обзор литературы по электрофизическим и оптическим свойствам поли-Si. Приведены способы получения микро-, фото-энергетических и термоэлектрических материалов, результаты исследования относительно анализ проблемы и на их основе освещены вопросы постановки проблемы. В результате анализа теоретических и экспериментальных сведений определены задачи исследований.

Во второй главе именуемой «Теоретические и практические методы исследования» раскрыты характеристики и суть использованных методов.

В частности, приведены методы изготовления частиц кремния на основе порошковой технологии, разработка технологии получения поликристаллического кремния путём нагревания частиц солнечными лучами, методы определения микроструктуры и морфологии образцов поликристаллического кремния, а также электрофизических и термоэлектрических свойств образцов. В отличие от традиционной порошковой технологии при изготовлении измельчённых частиц кремния применены детали не содержащие металл, а именно керамические материалы, обладающие высокой термостойкостью.

По этому методу возможно изготовить частицы размером до 0,5 микрон.

Разработана конструкция «Солнечный очаг», температура в фокусе которого составляет  $1500^{\circ}\text{C}$  и на его основе создан метод соединения частиц кремния нагреванием солнечными лучами. В этом способе возможно использование диэлектрического корпуса любой формы (рис.1). Сначала готовится смесь (2) частиц кремния на 70% этиловом спирте, которая помещается на диэлектрическую подставку (1) и небольшими усилиями руки продавливается до принятия формы диэлектрического корпуса. Толщина смеси частиц кремния не должна превышать 2,5...3 мм. При меньшей толщине смесь начинает плавиться, а при большей толщине температура по всему объёму распределяется неравномерно. При разности температур на верхних слоях соединение будет выше, а в нижних слоях меньше. Процесс соединения солнечными лучами ( $h\nu$ ) является своеобразным явлением. Столб солнечных лучей ( $h\nu$ ) перпендикулярно направляется в солнечный очаг и напрямую попадают на измельчённые частицы кремния и перемещается по фокусе очага.

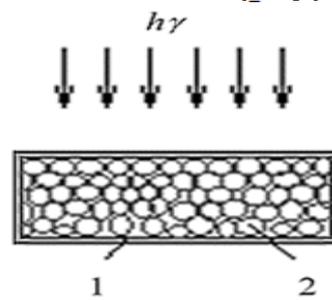
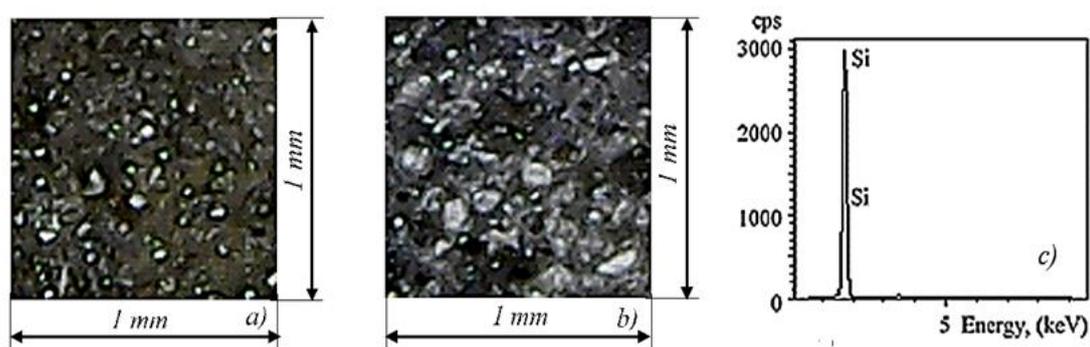


Рис.1. Схема соединения частиц кремния, нагреванием солнечными лучами.

При этом солнечные лучи, попадающие на частицы кремния, перемещаются по мере повышения температуры с  $600^{\circ}\text{C}$  до  $1200^{\circ}\text{C}$ , этот процесс длится 5...7 минут. В этом способе, по сравнению с традиционными методами, отсутствуют процессы прессования и термической обработки на специальных, требующих больших энергозатрат, установках. При изучении микроструктуры полученных образцов из частиц кремния был использован электронный микроскоп. При исследовании электрофизических свойств образцов при изменении температуры использован метод Вандер-Пау и модернизированное двух и трёхзондовое опытное устройство. Изучены зависимости удельного сопротивления ( $\rho$ ), подвижности носителей зарядов ( $\mu$ ) и концентрации ( $n$ ) от температуры при увеличении и уменьшении его в пределах  $\sim 300 \div 800$  К. Термоэлектрические свойства образцов, возникновении тока и напряжения при изменении температуры, были изучены на основе эффекта Зеебека.

В третьей главе диссертации под названием «**Микроструктура и электрофизические свойства поли-Si, полученного на основе частиц кремния**» приведены микроструктура и морфология поли-Si, полученного на основе частиц кремния, механизм образования меж зернистых граничных областей и их действие на процесс перехода зарядов. Результаты исследований показали, что кремний полученный путём нагревания солнечными лучами имеет поликристаллическую структуру, обладающей двойной структурой, различающимися освещённой солнечными лучами (а) и затемнённой (б) сторонами (рис.2). В результате рентгено-спектрального анализа (с) было определено, что обе стороны образца с зернистостью в  $10 \dots 20$  мкм имеют атомы кремния, а также выявлено, что в процессе получения поли-Si из частиц кремния, не происходит проникновения чужеродных атомов извне. Различие в микроструктуре освещённой (а) и затемнённой (б) поверхностей сторон объясняется порошковой технологией.



**Рис.2. Микрофотографии рентгено-спектральная характеристика образца**

Из порошковой технологии известно, что измельчение при термической обработке производится, например для кремния, при температуре ниже на  $10 \dots 20\%$  температуры плавления кремния. Температура плавления кремния  $\sim 1420^{\circ}\text{C}$ , значит термическая обработка пластин должно проводится при температуре  $\sim 1250^{\circ}\text{C}$ .<sup>1</sup> Причина этому в том, что в процессе измельчения для нагревания частиц необходимо снабжение достаточной энергией. Это имеет

место и для затемнённой стороны (б) поверхности образца. В этой стороне, из за пониженной температуры, поверхность будет более шероховатой. Это приводит к различию в микроструктуре освещённой (а) и затемнённой (б) поверхностей сторон. Это состояние наблюдается и при анализе электрофизических свойств.

На рис.3 показана зависимость  $\rho$ ,  $n$  и  $\mu$  от температуры. Следует отметить то, что при температуре  $T \sim 300$  К поверхности обладают значениями: поверхность (а) -  $\rho \sim 191,9 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ ,  $n \sim 3,11 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ,  $\mu \sim 0,025 \text{ см}^2/\text{Vs}$ ; поверхность (б) -  $\rho \sim 452 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ ,  $n \sim 5,52 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ,  $\mu \sim 0,025 \text{ см}^2/\text{Vs}$ . Результаты исследований показали, что на поверхностях (а) и (б)  $\mu$  уменьшается (линия 3). Однако на поверхностях (а) и (б) зависимость  $\rho$  и  $n$  от температуры различна. Например, на поверхности (а) при  $T \sim 300 \div 350$  К  $\rho$  увеличивается,  $n$  уменьшается (состояние а-б), а при  $T \sim 350 \div 550$  К  $\rho$  уменьшается,  $n$  увеличивается (состояние б-с). Потом при 50 К оба параметра меняются прямолинейно (линия 1).

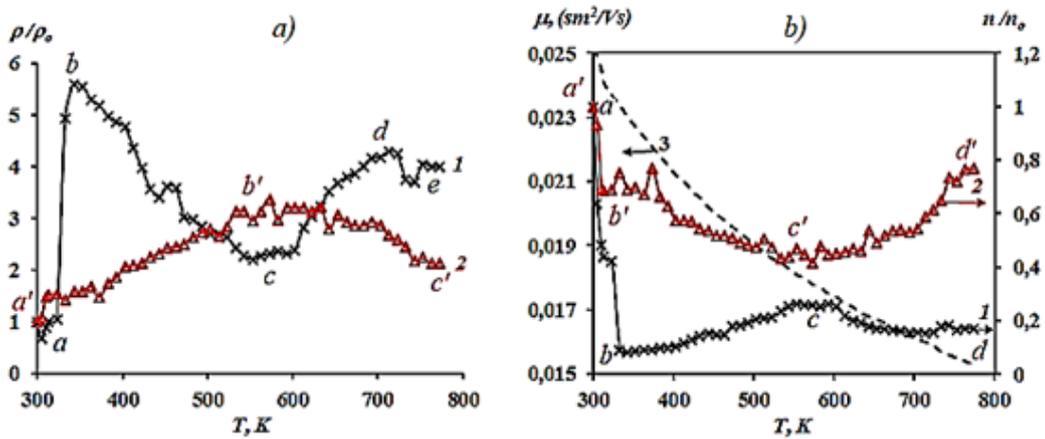


Рис.3. Завсимость удельного сопротивления (а), концентрации и подвижности носителей зарядов (б) от температуры

При  $T \sim 600 \div 710$  К  $\rho$  опять увеличивается, а  $n$  до 775 К уменьшается (участок с-д). Отмечено, что при  $T \sim 710 \div 775$  К  $\rho$  изменяется скачкообразно (участок d-e), и наоборот, если на поверхности (б)  $\rho$  при  $T \leq 575$  К повысится (отрезок а'-б') а  $n$  уменьшится (отрезок а'-б'-с'), то в следующих стадиях повышения температуры  $\rho$  понижается (б'-с'), то  $n$  повысится (с'-д', 2-линия).

На рис.4 показана модель строения микроструктуры и диаграмма (с) межзернистых граничных (а) и (б) зон образца. Строение образца условно можно разделить на зернистую (1) и межзернистую граничную (2) зоны. Процесс перехода заряда в поликристаллическом полупроводнике объясняется образованием межзернистых граничных зон. Свойства и дефекты в межзернистых граничных зонах образуют локальные ловушки, состоящие из рекомбинационных центров с  $E_{ip}$  энергетическим уровнем (рис.4,с). Они на пограничных зонах, имея локализованные свойства, создают барьерный эффект.

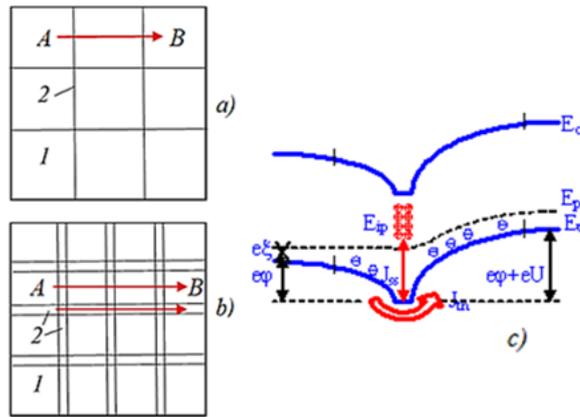


Рис.4. Модел микроструктуры образца и механизм перехода заряда

В локальных ловушках задержка и высвобождение переносчиков зарядов приводят к изменению высоты потенциального барьера( $\varphi$ ) и удельного сопротивления ( $\rho$ ). На основании модели Сетто для  $\rho$  можно записать следующее уравнение

$$\rho = \frac{k}{q\langle a \rangle A^* T} \exp(q\varphi/kT)$$

Здесь,  $q$  – заряд электрона,  $k$  – постоянная Больцмана,  $\langle a \rangle$  - единица межзернистости,  $A^*$  – эффективная постоянная Ричардсона,  $T$  – температура.

Высота потенциального барьера( $\varphi$ ) зависит от количества зарядов ( $Q_i$ ) задержанных в локальных ловушках:

$$\varphi = \frac{Q_i^2}{8\epsilon\epsilon_0 q N_G};$$

Где,  $N_G$  – концентрация активных электролизированных легированных соединений,  $\epsilon$  и  $\epsilon_0$  – соответственно, диэлектрические проницаемости среды и вакуума.

Из уравнения (2) видно, что на пограничных межзернистых зонах повышение количества зарядов ( $Q_i$ ) приводит к повышению  $\varphi$ , а он в свою очередь к повышению  $\rho$  (рис.4,с. 2-зона). В нашем случае повышение  $\rho$  зависит от природы образования локальных ловушек на поверхностях (a) и (b). Сначала рассмотрим модель микроструктуры и процесс перехода заряда на поверхности (a). В начальной стадии повышения температуры при  $T \sim 300 \div 350$  К образуются энергетические уровни  $E \sim 0,15$  эВ и  $E \sim 0,17$  эВ. В них повышение количества зарядов ( $Q_i$ ) приводит к понижению  $n$  и повышению  $\rho$  (рис.3, отрезок a-b). При  $T \sim 350 \div 550$  К по сравнению с концентрацией локализованных ловушек с  $E_{ip}$  уровнем высвобожденный из валентной зоны  $n$  будет увеличиваться. Это приводит к уменьшению  $\rho$  (отрезок b-c). При  $T \sim 550 \div 600$  К концентрация локализованных ловушек и  $n$  выравниваются, в этом случае  $\rho$  изменяется равномерно. При  $T \sim 600 \div 710$  К концентрация локализованных ловушек с уровнем  $E_{ip}$  по сравнению с  $n$  опять увеличится.

Здесь,  $Q_i$  и  $\rho$  увеличатся (участок  $c-d$ ). При  $T \sim 710 \div 775$  К появление рекомбинационных центров с уровнем  $E_{ip}$  приведёт скачкообразному изменению  $\rho$  (участок  $d-e$ ).

Так как, ширина межзернистой граничной зоны поверхности ( $b$ ) больше чем на поверхности ( $a$ ), то образование на этой поверхности локализованных ловушек с уровнем  $E_{ip}$  будет больше. Результаты исследований показывают, что при  $T \leq 575$  К повышение  $\rho$  (отрезок  $a'-b'$ ) соответствуют результатам поли-Si<sup>11</sup>. Его есть при  $T \sim 300 \div 600$  К количество, удержанных на рекомбинационных центрах с уровнями  $E_{ip1} \sim 0,15$  эВ,  $E_{ip2} \sim 0,17$  эВ,  $E_{ip3} \sim 0,36$  эВ,  $E_{ip3} \sim 0,3$  эВ, приведёт к повышению  $\rho$  (участок  $a'-b'$ ) при  $T \sim 600 \div 710$  К. А также при этой температуре уменьшение  $n$  (отрезок  $a'-b'-c'$ ) и затем её скачкообразное изменение при определённой температуре объясняют вышнупоказанные соображения. То есть, скачкообразное изменение соответствуют образованию энергетических уровней с  $E_{ip1} \sim 0,15$  эВ,  $E_{ip2} \sim 0,17$  эВ и  $E_{ip3} \sim 0,36$  эВ. При дальнейшем увеличении температуры начинается ионизация локализованных ловушек с уровнем  $E_{ip}$ . В результате чего, в одно и то же время из зоны А в зону В по пограничным и вдоль межзернистых границ начинается перемещение зарядов (рис. 5,  $b$ ). Перемещение зарядов вдоль локализованных ловушек вызывает появление тока  $J_{ss}$  (рис. 5.  $c$ ). Ток  $J_{ss}$  зависит от полной проводимости ( $Y_{ss}$ ) ловушек, то есть от высоты потенциального барьера ( $\delta\phi$ ):

$$J_{ss} = Y_{ss} \cdot \delta\phi$$

В этом случае  $\phi$  уменьшается, а  $Y_{ss}$  увеличится. В нашем случае уменьшение  $\rho$  (рис.3,  $b'-c'$ ) соответствует результатам проводимости ловушек.<sup>12</sup> А ускорение процесса ионизации локализованных ловушек приводит к повышению  $n$  (рис.4, линия- 2, отрезок  $c'-d'$ ). А при  $T \geq 400$  К на поверхности ( $b$ ) изменяется с разностью  $\phi \sim 0,061$  eV по сравнению с поверхностью ( $a$ ). По нашему мнению, при повышении температуры протекают два процесса, в зонах поверхности ( $b$ ) на энергетических уровнях  $E_{ip}$  ловушки ионизируются, вследствие чего переносчики зарядов перемещаются вдоль ловушек.

<sup>11</sup>Abdurakhmanov B., Saidov M. S., Olimov L.O. Electrophysical Properties of Solar Polycrystalline Silicon and Its  $n^+-p$  Structures at Elevated Temperatures. Applied Solar Energy. 2008 vol. 44. №1, p.46÷52.

<sup>12</sup>L.O. Olimov, B.M. Abdurakhmanov, F.L. Omonboev. Some Features of the Transport of Charge Carriers in the Grain Boundaries of Polycrystalline Silicon. International Journal of Advanced Research in Physical Science Volume 1, Issue 6, October 2014, PP 12-17.

Переносчики зарядов, перемещающиеся по межзернистым граничным зонам, задерживаются на свободных энергетических уровнях  $E_{ip}$ . Это приводит к изменению  $\phi$  на поверхности (b) с большей величиной  $\phi \sim 0,061$  eV по сравнению с поверхностью (a) (линия 2).

В четвёртой главе диссертации под названием «Термоэлектрические свойства поли-Si полученного на основе частиц кремния» описаны термоэлектрические свойства и характеристики образцов, методы получения полупроводниковых термоэлектрических материалов на их основе. На рис.6 показаны зависимости

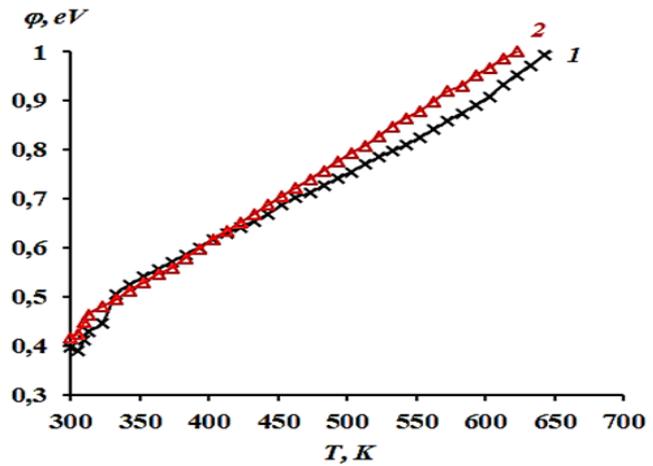


Рис.5. Зависимость высоты потенциального барьера от температуры 1 и 2 соответственно для (a) и (b) поверхностей

тока ( $I$ ) и напряжения ( $U$ ), освещённой и затемнённой сторон, от температуры. Следует отметить, если с повышением температуры токи ( $I_q$  и  $I_f$ ) и напряжения ( $U_q$  и  $U_f$ ) освещённой и затемнённой сторон совпадают по направлению, то микроструктуры поверхностей сторон (a) и (b) различаются друг от друга. В частности, с повышением температуры токи  $I_q$  и  $I_f$  поверхности (a) изменяются с «положительным» знаком, а напряжения  $U_q$  и  $U_f$  повышаются от «отрицательного» к «положительному» знаку (линии 1 и 2). И наоборот, на поверхности (b) при  $T \leq 330$  К параметры  $I_q$ ,  $I_f$  и  $U_q$ ,  $U_f$  сначала уменьшаются с «отрицательным» знаком, а потом увеличиваются с «положительным» знаком. При  $T \geq 745$  К ток  $I_f$  резко меняет направление на «отрицательный».

При  $T \sim 300$  К на поверхности (a) ток  $I_f$  в 10 раз больше тока  $I_q$ , напряжение  $U_f$  в 0,77 раз меньше  $U_q$ , на поверхности (b) ток  $I_f$  в 0,8 раз больше тока  $I_q$ , напряжение  $U_f$  в 0,94 раз меньше  $U_q$ . Ток  $I_q$  на поверхности (a) больше тока  $I_q$  на 0,02 чем на поверхности (b), напряжение  $U_f$  на поверхности (a) меньше на 0,32 чем на поверхности (b), напряжение  $U_q$  на поверхности (a) меньше на 0,39, чем на поверхности (b). За счёт фотоэффекта образование электронно-дырочных пар на поверхности (a) будет сильнее, чем на поверхности (b). Это приводит к принятию током  $I_f$  в 0,25 раз большего значения на поверхности (a), чем на поверхности (b). Это состояние наблюдается и при  $T \sim 745$  К. То есть ток  $I_f$  на поверхности (a) по сравнению с поверхностью (b) на 4,73 раза, ток  $I_q$  на поверхности (a) по сравнению с поверхностью (b) на 4,2 раза, напряжение  $U_f$  на поверхности (a) по сравнению с поверхностью (b) на 1,7 раза, напряжение  $U_q$  на поверхности (a) по сравнению с поверхностью (b) на 1,54 раза имеют большее значение. Принятие же больших значений при этой температуре: ток  $I_f$  на поверхности (a) по сравнению с током  $I_q$  поверхности (b) в 1,34 раза, напряжение  $U_f$  в поверхности (a) по сравнению с напряжением  $U_q$  поверхности (b) в 1,42 раза, ток  $I_f$  на поверхности (b) по сравнению с током  $I_q$

в 0,19 раза, напряжение  $U_f$  на поверхности (b) по сравнению с напряжением  $U_q$  в 1,42 раза может быть связано с образованием электронно-дырочных пар.

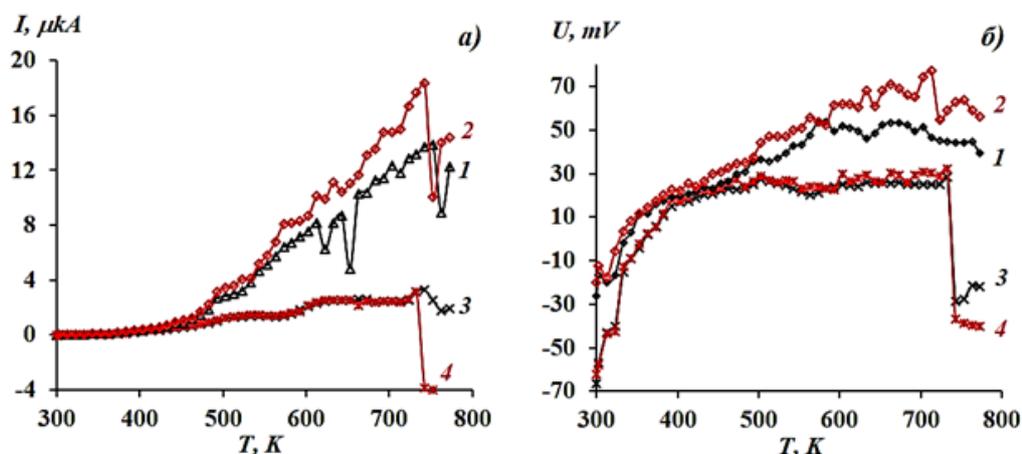


Рис.6. Зависимость напряжения (a) и тока (b) от температуры, 1 и 3 – тёмная, 2 и 4 – светлая стороны

На рис.7 приведена зависимость термоЭДС ( $\alpha$ ) и теплопроводности ( $\lambda$ ) от температуры.

Результаты показали, что при  $T \leq 425$  К термоЭДС ( $\alpha$ ) и теплопроводность ( $\lambda$ ) увеличиваются до  $\alpha \sim 1000 \mu\text{K}/\text{grad}$ ,  $\lambda \sim 0,118 \text{ Wt}/\text{mK}$ , потом оба параметра уменьшаются. Если повышение этих параметров связано с потоком носителей зарядов и фононов, то их состояние при  $T \leq 425$  К зависит от ионизации ловушек на различных энергетических уровнях межзернистых пограничных зон.

Ещё одним из параметров является эффективность термоэлектрического преобразователя (ZT). На сегодняшний день получены материалы с  $ZT \sim 2 \div 4$ . На рис.8 показана возможность повышения ZT с помощью управления теплопроводностью ( $\lambda$ ). Из рисунка видно, что управляя теплопроводностью ( $\lambda$ ), т.е. в определённых условиях на разных энергетических уровнях возможность образования электронно-дырочных пар, способствует повышению эффективности ZT термоэлектрического преобразователя.

В данной работе разработан метод изготовления термоэлектрического материала соединением частиц кремния путём нагревания солнечными лучами. В этом методе в качестве основания использован (1) термостойкий диэлектрический материал (рис.9).

С двух сторон основания (1) размещаются металлические контакты (Ma и Mb), между которыми размещается смесь (2) частиц кремния, приготовленная на 70% этиловом спирте, небольшими усилиями руки продавливаются до принятия формы диэлектрического основания. Толщина смеси частиц кремния не должна превышать 2,5...3 мм. При меньшей толщине смесь начинает плавиться, а при большей толщине температура по всему объёму распределяется неравномерно. При разности температур на верхних слоях соединение будет выше, а в нижних слоях меньше. Столб солнечных лучей ( $h\nu$ ) перпендикулярно направляется в солнечный очаг и напрямую

попадают на измельчённые частицы кремния и перемещается в фокусе очага. При этом солнечные лучи, попадающие на частицы кремния, перемещаются по мере повышения температуры с 600°C до 1200°C, этот процесс длится 5...7 минут. Нужно отметить, если начать нагревать при 1200°C, то зёрна кремния просто рассыпятся. Поэтому зёрна кремния, расположенные на основании, начинают нагревать с 600°C и постепенно поднимая до 1200°C. Ширина солнечного луча, падающие на металлические контакты, не должна превышать 1÷1,5 мм. Это создает прочный контакт между гранулами и клеммами (Ma и Mb). В этом способе, по сравнению с традиционными методами, отсутствуют процессы прессования и термической обработки на специальных, требующих больших энергозатрат, установках.

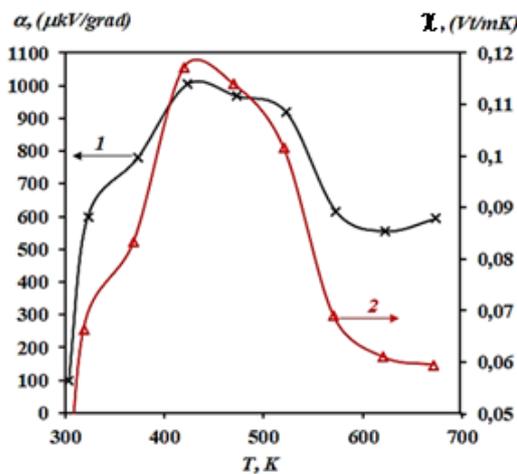


Рис.7. Зависимость термо ЭДС (а) и теплопроводности ( $\chi$ ) от температуры

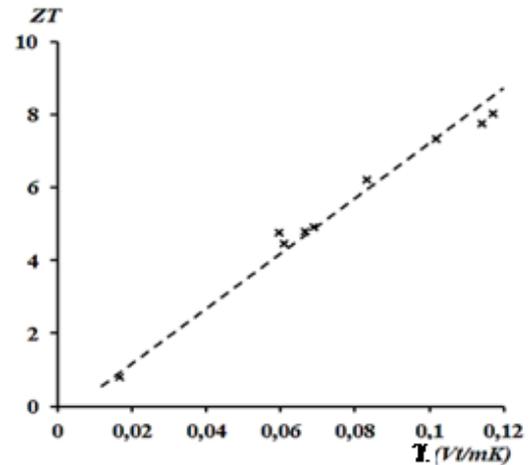


Рис.8. Зависимость ZT от теплопроводности

Метод получения термоэлектрических материалов позволяет изготавливать частицы кремния на этиловом спирте размером менее 1 микрон, соединение частиц кремния нагреванием солнечным лучом, а также создание прочного контакта с металлическими клеммами, образование между двумя гранулами туннельных контактов и энергетических уровней, обеспечение резонансных туннелообразований электронов энергетических уровней а также изготовление необходимых форм термоэлектрических материалов. В запрещённой зоне нанослоя создаются энергетические уровни, удовлетворяющие следующие условия, и обеспечивают резонансные туннелообразования электронов:

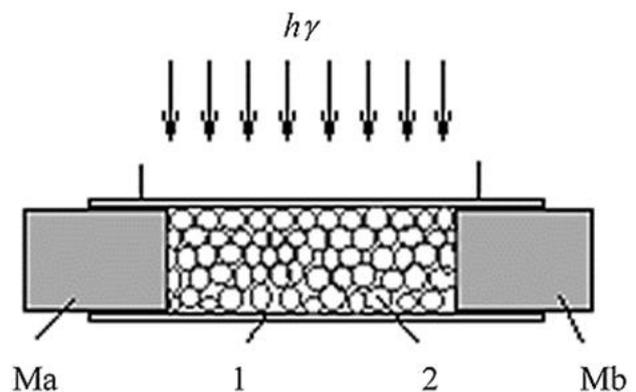


Рис.9. Соединение частиц кремния солнечными лучами.

$$E_c^{Si} \leq E_N < E_c^{SiO_2}$$

Здесь,  $E_c^{Si}$  – энергия электронов в зоне проводимости кремния;  $E_N$  – локальные энергетические уровни в нижней части зоны проводимости оксида кремния;  $E_c^{SiO_2}$  – энергия электронов в нижней части зоны проводимости оксида кремния.

Предложенный метод производства и использования термоэлектрических материалов позволяют снизить затраты на производства тепловых электроустановок. Сырьё и их основные характеристики, резко отличаясь от аналогичных прототипов, полностью отвечают соответствующим требованиям. Данная конструкция защищена патентом за № FAP 01593.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам исследований зависимости электрофизических и термоэлектрических характеристик поликристаллического кремния, полученного нагреванием частиц кремния солнечными лучами и закономерности действия на них объёмных дефектов и состояния локальных воссоединений, а также определение технических решений механизма получения термоэлектрических материалов можно сделать следующие выводы:

1. Разработана технология получения поликристаллического кремния нагреванием частиц кремния солнечными лучами. Процесс заключается в изготовлении смеси частиц кремния на этиловом спирте и затем нагревания её солнечными лучами.

2. Кремний полученный путём нагревания солнечными лучами имеет поликристаллическую структуру, обладающей двойной структурой, различающимися освещённой солнечными лучами (а) и затемнённой (б) сторонами. В результате рентгено-спектрального анализа было определено, что обе стороны образца с зернистостью в 10...20 мкм имеют атомы кремния, а также выявлено, что на освещённой стороне, из-за большей температуры, соединение будет равномерным, а на затемнённой поверхности с более низкой температуры происходит образование комочек.

3. Электрофизические свойства двух структурного кремния зависят от поверхностного состава освещённой солнечными лучами (а) и затемнённой (б) сторон, вместе с этим при изменении температуры до 575К на поверхности (а) электропроводность и концентрация переносчиков заряда сначала повышается и затем понижается и наоборот на поверхности (б) электропроводность и концентрация переносчиков заряда изменяется скачкообразно, а также было определено, что на обеих структурах подвижность переносчиков заряда с повышением температуры понижается.

4. Разработан механизм пояснения процесса перемещения заряда в двух структурном кремнии и модель двух структурного строения поликристаллического кремния, полученного путём нагревания солнечными лучами.

5. Обосновано, что на межзернистых границах двух структурного кремния высота потенциального барьера изменяется в пределах  $\varphi \sim 0,39 \div 1,0$  эВ, в пределах изменения температуры  $T = 300 \div 775$  К на поверхности (б) изменение потенциала различается на  $\varphi \sim 0,061$  эВ по сравнению с поверхностью (а).

6. Отмечено то, что если с повышением температуры токи ( $I_q$  и  $I_f$ ) и напряжения ( $U_q$  и  $U_f$ ) освещённой и затемнённой сторон совпадают по направлению, то микроструктуры поверхностей сторон (а) и (б) различаются друг от друга. В частности, с повышением температуры токи  $I_q$  и  $I_f$  поверхности (а) изменяются с «положительным» знаком, а напряжения  $U_q$  и  $U_f$  повышаются от «отрицательного» к «положительному» знаку (линии 1 и 2). И наоборот, на поверхности (б) при  $T \leq 330$  К параметры  $I_q$ ,  $I_f$  и  $U_q$ ,  $U_f$  сначала уменьшаются с «отрицательным» знаком, а потом увеличиваются с «положительным» знаком. При  $T \geq 745$  К ток  $I_f$  резко меняет направление на «отрицательный». А также при этой температуре на разных энергетических уровнях возможно образование электронно-дырочных пар.

7. Определено что при  $T \leq 425$  К термоЭДС ( $\alpha$ ) и теплопроводность ( $\lambda$ ) увеличиваются до  $\alpha \sim 1000 \mu\text{kV/grad}$ ,  $\lambda \sim 0,118 \text{ Vt/mK}$ , потом оба параметра уменьшаются. Если повышение этих параметров связано с потоком носителей зарядов и фононов, то их состояние при  $T \leq 425$  К зависит от ионизации ловушек на различных энергетических уровнях межзернистых пограничных зон.

8. Предложена возможность повышения ZT с помощью управления теплопроводностью ( $\lambda$ ).

9. Впервые был предложен способ изготовления преобразователя электрической энергии из тепловой, воссоединением частиц кремния, путём нагревания солнечными лучами. Установлено, что термоЭДС ( $\alpha$ ) и теплопроводность ( $\lambda$ ) составляют  $\alpha \sim 1000 \mu\text{kV/grad}$ ,  $\lambda \sim 0,118 \text{ Vt/mK}$ .

**SCIENTIFIC COUNCIL AWARDING SCIENTIFIC DEGREES  
PhD.03/30.11.2022.FM/T.66.04 AT NAMANGAN INSTITUTE OF  
ENGINEERING AND TECHNOLOGY**

---

**ANDIJAN MACHINE BUILDING INSTITUTE**

**ANARBOYEV IQBOLJON IBROXIMOVICH**

**ELECTROPHYSICAL AND THERMOELECTRIC PROPERTIES OF  
SILICON OBTAINED BY SOLAR RADIATION**

**01.04.10 - Physics of semiconductors**

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

**Namangan – 2025**

The topic of the dissertation Doctor of Philosophy (PhD) in physical and mathematical sciences is registered by the Higher Attestation Commission under the Ministry of Higher Education, Science and Innovation of the Republic of Uzbekistan under № B2022.3.PhD/FM491.

The dissertation was carried out at the Andijan Machine Building Institute

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

**Scientific supervisor:** **Olimov Lutfiddin Omonovich**  
Doctor of Physical and Mathematical Sciences

**Official opponents:** **Onarqulov Karimberdi Egamberdiyevich**  
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

**Abdulazizov Baxrom Toshmirza o‘gli**  
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Ass.  
Professor

**Leading organization:** Urgench State University

The defense of the dissertation will be held at \_\_\_\_\_ 2025 year at the scientific council meeting No. PhD. 03/30.11.2022.FM/T.66.04 at the Namangan institute of engineering and technology (at the address: 160100, Namangan city, Kasansay Str. 7, administrative building, small conference hall, tel. (+99869) 228-76-68, 225-10-07, a fax: (+99869) 228-76-75. e-mail: [niei\\_info@edu.uz](mailto:niei_info@edu.uz)

The dissertation is available at the Information-resource centre of Namangan institute of engineering and technology (registration number No. 292).

Address: 160100, Namangan city, Kasansay Str 7, tel. (+99869) 228-76-68; Fax: (+99869) 228-76-75, e-mail: [niei\\_info@edu.uz](mailto:niei_info@edu.uz)

**U.I. Erkaboev**

Vice-chairman of Scientific Council  
on awarding Scientific Degrees,

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

**A.A. Abdukarimov**

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

**N.Yu. Sharibayev**

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** determination of physical mechanisms and technical solutions for obtaining thermoelectric materials based on polycrystalline silicon obtained by heating silicon particles with sunlight.

**The object of investigation** polycrystalline silicon samples with two different surfaces were obtained on the basis of Si powders by heating them with sunlight.

**The scientific novelty of the research** • the optimal conditions for obtaining pure polycrystalline silicon without foreign impurities were determined by combining particles by heating with sunlight;

- the formation of impurities and defects in the process of attaching silicon particles depends on sunlight and its temperature, and the process control is based on the fact that it is possible to obtain polycrystalline silicon with two different structures;

- at  $T \leq 575$  K, the electrical conductivity and concentration of charge carriers on the front surface of polycrystalline silicon increase and then decrease, on the contrary, the electrical conductivity and concentration of charge carriers on the rear surface decrease and then increase;

- it was found that at  $T \sim 300 \div 800$  K the mobility of charge carriers both on the front and back sides of polycrystalline silicon decreases with temperature from 0.0245 to 0.015  $\text{cm}^2/\text{Vs}$ ;

- it was found that the formation of  $U_q$  and  $I_q$  and  $U_f$  and  $I_f$  at  $T \sim 300 \div 800$  K depends on the formation of electron-hole pairs in accessible states and defects at the grain boundaries of two structural polycrystalline silicon;

- it was substantiated that at the intergranular boundaries of two structural silicon, the height of the potential barrier varies within  $\varphi \sim 0,39 \div 1,0$  eV, within the temperature change  $T = 300 \div 775$  K on the surface (b) the potential change differs by  $\varphi \sim 0,061$  eV compared to the surface (a);

- the possibility of obtaining a thermoelectric material with a thermoAEC of 800-1000  $\mu\text{V}/\text{degree}$  and a thermal conductivity of 0.12  $\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$  at 400K has been substantiated.  $\mu$ Implementation of research results Based on scientific results obtained in the development of silicon structures by bonding granular silicon particles heated by sunlight:

### Implementation of research results.

a method for obtaining thermoelectric materials based on silicon particles was developed and scientifically substantiated (Uz FAP 01593 dated February 25, 2021 for a utility model of the Agency for Intellectual Property of the Republic of Uzbekistan;

the scientific results obtained in the development of solar-heated granular silicon particles and the technology of their casting were used in the scientific analysis of the properties of copper granules and the processes of casting electric cables based on them at Andijan JSC. cable" of Uzbekistan Russia (reference No. 04-3 / 1836 dated 12.08.2022 of the joint-stock company "O'zeltexsanoat"). The use of scientific results made it possible to control the degree of oxidation of copper

electric cables from 50% to 80% and analyze the physical processes occurring in them;

scientific results obtained when obtaining silicon structures by heating granular silicon particles with a sunbeam were used by scientists of Osh State University in fundamental and practical projects (reference No. 150 of Osh State University dated January 25, 2022). The use of scientific results made it possible to obtain thermoelectric materials by heating silicon particles with solar radiation with a thermal conductivity of 800-1000  $\mu\text{V}/\text{degree}$  and a thermal conductivity of 0.12  $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$  at 400 K;

scientific results of obtaining thermoelectric material by heating silicon particles with a sunbeam were used in the scientific laboratory and scientific work of the Department of Physics and Power Engineering of the Osh Technological University (Reference No. 04-02/22 Osh State Technical University of the Kyrgyz Republic dated February 10, 2022). The use of scientific results made it possible to determine the optimal mode for obtaining polycrystalline silicon and thermoelectric materials by heating silicon particles with a sunbeam, to study charge transfer processes in the intergranular boundary regions of polycrystalline structures with temperature changes, and to determine thermoelectric characteristics.

**The structure and volume of the dissertation.** The dissertation consists of an introduction, four chapters, a conclusion, a list of references and appendices. The text of the dissertation is expressed in 127 pages.

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

**I bo'lim(Iчасть, I part)**

1. Olimov L.O., Anarboyev I.I., Mamirov A.M., Omonov L.F., Omonboyeva M.L. Termoelektrik material tayorlash usuli // Patent.№ FAP 01593.25.02.2021y
2. Olimov L.O., Anarboyev I.I. Some electrophysical properties of polycrystalline silicon obtained in a solar oven Silicon//. Silicon. 27 january 2022 Vol.14. pp.3817-3822. Springer Nature B.V. 2022 (№11, Springer.IF:2,8 Q1;https://link.springer.com/journal/12633).
3. Olimov L.O., Anarboyev I.I. Granullangan yarimutkazgichli termoelektrik materiallar tayyorlash usuli // Uzbekistan Respubliki Fanlar akademiyasining maruzalari Uzbekistan №4, 2020 y.20 -24. (01.00.00.№5).
4. Olimov L.O., Anarboyev I.I. Исследование микроструктуры и электрических свойств кремния, полученного частичным нагревом солнечного излучения // Научный вестник Андижанский государственный университет Vol. 3 Iss. 1 2021.С.43-47. (01.00.00.№13).
5. Olimov L.O., Anarboyev I.I. Quyosh nurlari bilan qizdirib olingan polikristal kremniyning mikrotuzilmasi// Namangan davlat unversiteti ilmiy axborotnomasi – 2022-yil №10. 109-113 betlar.(01.00.00.№14)
6. Olimov L.O., Anarboyev I.I. Granulalangan Si asosida olingan poli-Si ning mikrotuzilmasi va elektrofizik xossalari // Andijon davlat unversiteti ilmiy xabarnomasi .Vol. 5 №2. 2023. 22-25 betlar.(01.00.00. №13)
7. Olimov L.O., Anarboyev I.I. Ikki strukturali polikristal kremniyning elektrofizik xossalari // Namangan davlat unversiteti ilmiy axborotnomasi – 2023. №8. 75-81 betlar.(01.00.00. №13)
8. Olimov L.O., Anarboyev I.I. Konsentrlangan quyosh nurlari bilan qizdirib polikristall kremniy olish// Namangan davlat unversiteti ilmiy axborotnomasi –2024. №1. 69-73 betlar. .(01.00.00. №13)

**II bo'lim(II часть, II part )**

9. Olimov L.O., Anarboyev I.I. Mechanism of thermoelectric material efficiency increase// AIP Conf. Proc. 3244, 060015. 27 november 2024. (№ 3 Scopus. AIP Conf).
10. Olimov L.O., Anarboyev I.I. Kremniygranulalari asosida termoelektrik material samaradorligini oshirish mexanizimi // Andijon davlat unversiteti ilmiy xabarnomasi 2023. Maxsus son. 136-139 betlar.
11. Olimov L.O., Anarboyev I.I. Yuqori samarador fotoelementlarni ishlab chiqish. Monografiya. ISBN:978-620-6-17535-3.Copyright 2024 Dodo Books Indian Ocean Ltd. And Omnisciptum S.R.L publishing group.Globe edit.
12. Mamirov A.M., Anarboyev I.I., Yusupov A.X. Yuqori haroratlarga mo'ljallangan quyosh pechi qurilmasi konstruksiyasi//Namangan muxandislik texnologiyalar institutu ilmiy texnika Tom 4. 2019. Maxsus son №2. 62-67betlar.

13. Xojimatov I.T., Anarboyev I.I., Xojimatov U.T. Quyosh pechi qurilmasi tayorlashda optik xususiyati yuqori bo'lgan qoplamalar qoplash texnologiyasi va uning texnik yechimi // Namangan muxandislik texnologiyalar institutu ilmiy texnika Tom 4. 2019. Maxsus son №2. 80-86betlar.

14. Soxibova Z.M., Anarboyev I.I., Olimov L.O. Granullashgan yarimo'tkazgichlarning muqobil energiya manbalarining samaradorligini oshirishdagi ahamiyati // Innovatsion g'oyalar, ishlanmalar va ularni ishlab chiqarish hamda ta'limda qo'llashning zamonaviy muammolari. Xalqaro ilmiy-amaliy konferensiya. 15 aprel, 2019 yil Andijon (S.288-289)

15. Soxibova Z.M., Anarboyev I.I., Olimov L.O. Radiatsiya nurlari oqimi ta'sirida kirishmali holatlarning hosil bo'lishi // Innovatsion g'oyalar, ishlanmalar va ularni ishlab chiqarish hamda ta'limda qo'llashning zamonaviy muammolari. // Xalqaro ilmiy-amaliy konferensiya. 15 aprel, 2019 yil Andijon (S.372-373)

16. Anarboyev I.I., Mamirov A.M., Yarimo'tkazgichli kristallarning elektrofizik va fotoelektrik xususiyatlarini o'rganish // Zamonaviy ilim-fanning inovatsion rivojlanishi. Andijon 2019.(S 662-664)

17. Olimov L.O., Sokhibova Z.M., Anarboev I.I., Omonboev F.L. Structure and charge carrier mechanisms of granulated semiconductors // Республиканская конференция по физической электронике и фотонике. 23 октября 2019 г. Ташкент, Узбекистан (С.104-105)

18. Olimov L.O., Sokhibova Z.M., Anarboev I.I., Omonboev F.L., Mamirov A.M. Charge carrier process of granulated semiconductors // Республиканская конференция по физической электронике и фотонике. 23 октября 2019 г. Ташкент, Узбекистан (С.106-107)

19. Olimov L.O., Sokhibova Z.M., Anarboev I.I., Omonboev F.L., Khojimatov I T. Electronic properties of granular silicon oxide // Республиканская конференция по физической электронике и фотонике. 23 октября 2019 г. Ташкент, Узбекистан (С.108-109)

20. Olimov L.O., Anarboyev I.I., Mamirov A.M. Creation of alternative energy sources based on nanostructured silicon granules // Da'vatnom a-barnom ai Onferensiyai baynalmilalii ilmy-amaly tatiunvoni» «Barrasii muammohoi muosiri ilmhoi fizikayu texnika va texnologiyam nimmokilho» (Xuchand, 18-umi mayi soli 2021) (S.22-23)

21. Olimov L.O., Anarboyev I.I. Micro structure of silicon obtained by remelting in a solar furnace // Восьмая международная конференция по физической электронике ИПЕС-8 2021 Ташкент (С.98-100).

22. Olimov L.O., Anarboyev I.I. Electrical properties of silicon obtained by remelting in a solar furnace // Восьмая международная конференция по физической электронике ИПЕС-8 2021 Ташкент (С 108-110).