NAMANGAN DAVLAT UNIVERSITETI
ILMIY AXBOROTNOMASI, [2026-10]
ISSN:2181-1458
ISSN:2181-0427

01.00.00-FIZIKA-MATEMATIKA
journal.namdu.uz
PHYSICS AND MATHEMATICS

UO‘K 621.383.4, 537.311.322

TERMIZ SHAROITIDA MONOKRISTALL KREMNIYLI FOTOELEMENTLARNING FOTOELEKTRIK XUSUSIYATLARI

Tursunov Mamasobir
Termiz davlat universiteti, f.-m.f.PhD, dots.
Kamolov Ma’mur
Termiz davlat universiteti Yarimo‘tkazgichlar fizikasi yo‘nalishi 1-kurs magistranti
Email: kamolovmamur202@gmail.com

Annotatsiya: *Ushbu ishda monokristall kremniy fotoelementlari Termizning ekstremal iqlim sharoitida (yuqori harorat va changlanish) ishlash barqarorligi tadqiq qilingan. Tadqiqot davomida fotoelementlarning volt-amper, Volt-Farad va impedans xarakteristikalari 298 K dan 348 K gacha bo‘lgan haroratlarda o‘rganildi. Natijalar shuni ko‘rsatadiki, harorat ortishi va teskari siljish kuchlanishi parallel qarshilikning ga pasayishiga olib keladi. Arrenius va Nikvist grafiklari yordamida zaryad tashishning aktivlanish energiyasi va Tayer balandligi ekanligi aniqlandi.* $(Mono - Si)45\%0.060\ eV0.326\ eV$

Kalit so‘zlar: *Monokristall kremniy, fotoelement, Termiz iqlimi, degradatsiya, impedans spektroskopiyasi, aktivlanish energiyasi, issiq nuqtalar.*

ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МОНОКРИСТАЛЛ КРЕМНИЕВЫХ ФОТОЭЛЕМЕНТОВ В УСЛОВИЯХ ТЕРМЕЗА

Аннотация: *В данной работе исследована стабильность фотоэлектрических элементов из монокристаллического кремния* $(Mono - Si)$ *в экстремальных климатических условиях Термеза (высокая температура и пыль). В ходе исследования изучались вольт-амперные, Вольт-Фарадные и импедансные характеристики фотоэлектрических элементов при температурах от 298 K до 348 K. Результаты показывают, что повышение температуры и обратного напряжения смещения приводит к уменьшению параллельного сопротивления на 45%. С помощью диаграмм Аррениуса и Найквиста было определено, что энергия активации переноса заряда составляет 0,060 эВ, а высота Тайера — 0,326 эВ.*

Ключевые слова: *Монокристаллический кремний, фотоэлектрический элемент, климат Термеза, деградация, импедансная спектроскопия, энергия активации, горячие точки.*

PHOTOELECTRIC PROPERTIES OF MONOCRYSTAL SILICON PHOTOCELLS UNDER TERMEZ CONDITIONS

Abstract: *In this work, the stability of monocrystalline silicon* $(Mono - Si)$ *photovoltaic cells under extreme climatic conditions of Termez (high temperature and dust) was studied. During the study, the volt-ampere, Volt-Farad and impedance characteristics of photovoltaic cells were studied at temperatures from 298 K to 348 K. The results show that an increase in temperature and reverse bias voltage leads to a decrease in parallel resistance by 45%. Using Arrhenius and Nyquist plots, it was determined that the activation energy of charge transport is 0.060 eV and the Tayer height is 0.326 eV.*

Keywords: *Monocrystalline silicon, photovoltaic cell, Termez climate, degradation, impedance spectroscopy, activation energy, hot spots.*

Kirish. Qayta tiklanuvchi energiya manbalaridan foydalanish bugungi kunda global miqyosda dolzarb masalalardan biri hisoblanadi. Ayniqsa, quyosh energiyasidan samarali foydalanish texnologiyalari energetika tizimining barqarorligini ta’minlashda muhim o‘rin egallaydi. Shu nuqtai nazardan, fotoelektrik o‘zgartirgichlar, xususan monokristall kremniy asosidagi fotoelementlar yuqori samaradorligi va nisbatan barqaror ishlash ko‘rsatkichlari bilan ajralib turadi. Ushbu turdagi fotoelementlar yuqori darajada tartiblangan kristall panjara tuzilishiga ega bo‘lib, bu ularning elektronlarning erkin harakatlanishini ta’minlash orqali yuqori fotoelektrik samaradorlikka erishishiga imkon beradi.

Monokristall kremniy fotoelementlarining samaradorligi laboratoriya sharoitlarida juda yuqori natijalarni ko‘rsatgan bo‘lsa-da, real ekspluatatsiya sharoitlarida, ayniqsa keskin iqlimiy hududlarda ularning ishlash ko‘rsatkichlari

sezilarli darajada pasayishi mumkin. O‘zbekistonning janubiy hududlari, xususan Termiz shahri va uning atrofidagi mintaqalar keskin kontinental iqlim sharoiti bilan tavsiflanadi. Ushbu hududda yoz oylarida havo haroratining 45–50°C gacha ko‘tarilishi, quyosh nurlanishining yuqori intensivligi hamda atmosfera havosining kuchli changlanishi kuzatiladi. Bunday omillar fotoelementlarning uzoq muddatli ishlashiga va ularning fizik hamda elektr parametrlariga sezilarli ta’sir ko‘rsatadi.

Yuqori harorat sharoitida kremniy fotoelementlarning ishlash samaradorligi bir necha fizik mexanizmlar orqali pasayadi. Avvalo, harorat ortishi bilan yarimo‘tkazgich materialdagi taqiqlangan zona kengligi kamayadi, bu esa ochiq zanjir kuchlanishining (V_{oc}) pasayishiga olib keladi. Shu bilan birga, rekombinatsiya jarayonlari intensivligi ortib, foydali tok hosil bo‘lish samaradorligi kamayadi. Natijada, umumiy fotoelektrik konversiya koeffitsiyenti kamayadi. Bundan tashqari, uzoq muddat davomida yuqori harorat ta’siri ostida materialning strukturaviy xossalari ham o‘zgarishi mumkin, bu esa degradatsiya jarayonlarini tezlashtiradi.

Termiz hududiga xos bo‘lgan yana bir muhim omil – bu atmosfera changining yuqori konsentratsiyasidir. Chang zarrachalari fotoelement yuzasiga o‘tirib, quyosh nurlarining aktiv qatlamga yetib borishini qisman to‘sib qo‘yadi. Natijada, fotoelementning ayrim qismlarida nurlanish intensivligi kamayadi va tok hosil bo‘lish jarayoni notekis xarakterga ega bo‘ladi. Ayniqsa, chang qatlamining notekis taqsimlanishi fotoelement yuzasida lokal soyalanish effektlarini keltirib chiqaradi.

Qisman soyalanish hodisasi fotoelementlarning ishlashida eng xavfli omillardan biri hisoblanadi. Bunday sharoitda fotoelementning ayrim qismlari normal ishlashda davom etar ekan, soyalangan qismlar tok generatsiyasida orqada qoladi. Bu esa butun tizim bo‘ylab tokning majburiy ravishda o‘tishini ta’minlash uchun soyalangan hududlarda teskari kuchlanish hosil bo‘lishiga olib keladi. Natijada, ushbu hududlarda energiya issiqlik ko‘rinishida ajralib chiqadi va lokal qizish – ya’ni «issiq nuqtalar» (hot-spots) yuzaga keladi [1-3].

«Issiq nuqtalar» fenomeni fotoelementlar uchun jiddiy xavf tug‘diradi. Lokal qizish natijasida kremniy materialida termomekanik zo‘riqishlar paydo bo‘ladi, bu esa mikroyorilishlar va kristall panjara buzilishlariga olib kelishi mumkin. Ayniqsa, p-n o‘tish sohasida bunday jarayonlar yarimo‘tkazgichning asosiy funksional xususiyatlarini izdan chiqaradi. P-n o‘tishning degradatsiyasi natijasida rekombinatsiya markazlari soni ortadi, bu esa zaryad tashuvchilarining yashash vaqtini kamaytiradi va umumiy samaradorlikni pasaytiradi [4-7]. Bundan tashqari, «issiq nuqtalar» uzoq muddat davomida mavjud bo‘lsa, fotoelementning butunlay ishdan chiqishiga olib kelishi mumkin. Chunki yuqori harorat lokal ravishda metall kontaktlarning ajralishiga, dielektrik qatlamlarning shikastlanishiga va hatto kuyish effektlariga sabab bo‘ladi. Bu esa nafaqat alohida elementning, balki butun fotoelektrik modullarning ishonchliligini pasaytiradi [8-12].

Yuqorida qayd etilgan muammolarni chuqur tahlil qilish, ayniqsa ularning mikroskopik darajadagi mexanizmlarini o‘rganish muhim ilmiy ahamiyatga ega [13, 14]. Chang zarrachalarining o‘lchami, shakli va optik xossalari ularning yorug‘lik bilan o‘zaro ta’sirini belgilaydi. Shu bilan birga, lokal soyalanish natijasida hosil bo‘ladigan elektr maydonlar taqsimoti va tok zichligi notekisligi ham mikroskopik darajada o‘rganilishi zarur. Bu jarayonlarni chuqur tushunish orqali fotoelementlarning degradatsiya mexanizmlarini aniqlash va ularni kamaytirish yo‘llarini ishlab chiqish mumkin bo‘ladi [15].

Mazkur tadqiqotning asosiy maqsadi aynan shu jarayonlarning mikroskopik tabiatini o‘rganishdan iboratdir. Bunda asosiy e’tibor yuqori harorat va changlanish sharoitida monokristall kremniy fotoelementlarida yuzaga keladigan fizik hodisalarni aniqlashga qaratiladi. Xususan, qisman soyalanish natijasida yuzaga keladigan tok va kuchlanish taqsimotlari, lokal qizish zonalarining shakllanishi hamda p-n o‘tishning strukturaviy o‘zgarishlari kompleks ravishda tahlil qilinadi.

Tadqiqot metodolari. Tadqiqot ishida zamonaviy quyosh energetikasi texnologiyalarida keng qo‘llanilayotgan tijorat darajasidagi monokristall kremniy (Mono-Si) fotoelementlaridan foydalanildi. Termik zo‘riqishlarni o‘rganish maqsadida tajriba namunalarini nazorat qilinadigan muhitda sinovdan o‘tkazish zarurati yuzaga keladi. Shu bois, barcha namunalar raqamli boshqaruv tizimiga ega bo‘lgan yuqori aniqlikdagi termostatik kameraga joylashtirildi. Mazkur qurilma yordamida haroratni aniq diapazonda boshqarish, uni barqaror ushlab turish hamda turli harorat rejimlarida fotoelementlarning xatti-harakatini kuzatish imkoniyati yaratildi. Termostatik kamerada harorat parametrlarining yuqori aniqlikda nazorat qilinishi termik zo‘riqishlarning fotoelement strukturasiga ta’sirini izchil va takrorlanuvchan tarzda o‘rganishga imkon berdi. Bu esa tajriba natijalarining ishonchliligini oshiruvchi muhim omillardan biri hisoblanadi.

Fotoelementlarning elektr xususiyatlarini aniqlashda asosiy e’tibor ularning Volt-Amper xarakteristikalarini (VAX) o‘lchashga qaratildi. VAX parametrlarini aniqlash uchun yuqori aniqlik va keng funksional imkoniyatlarga ega bo‘lgan zamonaviy o‘lchov asbobi – Keithley-2450 manba-o‘lchagich qurilmasidan foydalanildi. Ushbu asbob yordamida tok va kuchlanish qiymatlari yuqori aniqlik bilan qayd etilib, fotoelementlarning ishlash rejimlari batafsil tahlil qilindi. VAX egri chiziqlari orqali qisqa tutashuv toki, ochiq zanjir kuchlanishi, maksimal quvvat nuqtasi kabi asosiy parametrlar aniqlanib, ularning termik ta’sir ostida qanday o‘zgarishi o‘rganildi.

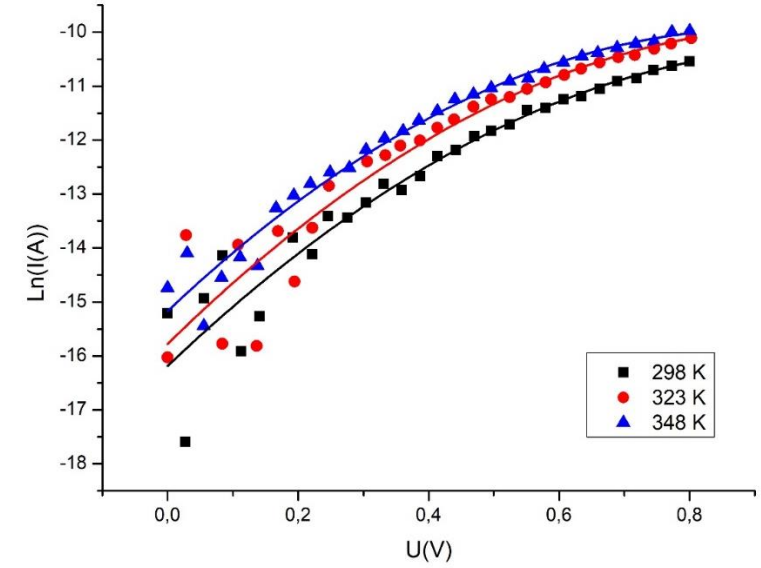
Tadqiqot jarayonida yana bir muhim parametr sifatida teskari siljish kuchlanishining ta’siri ham o‘rganildi. Xususan, tajribalarda 5 mA dan 40 mA gacha bo‘lgan tok diapazoniga mos keluvchi teskari siljish sharoitlari qo‘llanildi. Teskari

siljish rejimida ishlash fotoelement ichida lokal qizish jarayonlari va potensial «issiq nuqtalar» hosil bo‘lish mexanizmlarini aniqlash uchun muhim eksperimental sharoit hisoblanadi.

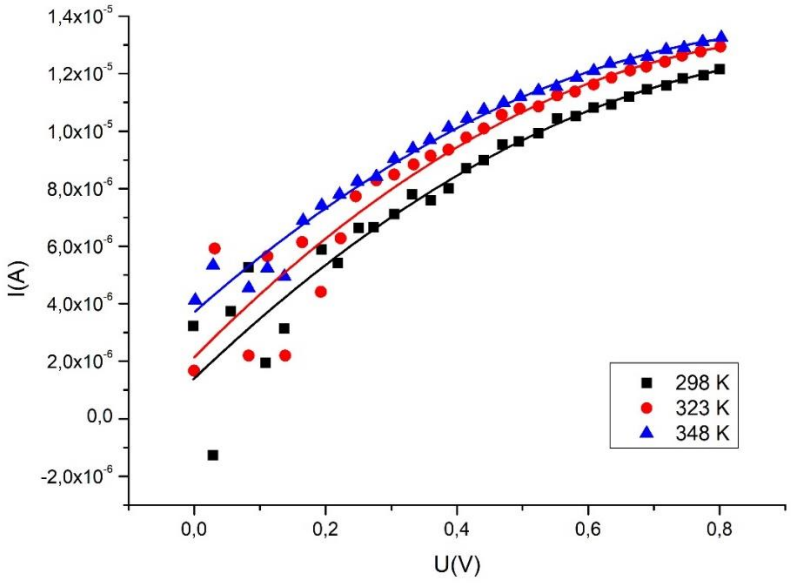
Qo‘llanilgan eksperimental usullar majmuasi – ya’ni termostatik muhitda sinovdan o‘tkazish, VAX o‘lchovlari va EIS tahlili – birgalikda fotoelementlarda sodir bo‘ladigan jarayonlarni kompleks tarzda o‘rganish imkonini berdi. Har bir metod o‘ziga xos axborot beradi: VAX umumiy elektr xususiyatlarni aniqlasa, EIS ichki fizik mexanizmlarni chuqurroq tahlil qilish imkonini beradi. Termostatik kamera esa tashqi muhit omillarining nazorat qilinadigan ta’sirini ta’minlaydi.

Natijalar va ularning muhokamasi. Olingan volt-amper xarakteristikalari (VAX) natijalari batafsil tahlili shuni ko‘rsatadiki, haroratning ortib borishi bilan teskari to‘yinish toki I_0 ning qiymati tizimli va izchil ravishda oshib boradi (1-rasm). Ushbu hodisa yarimo‘tkazgich materialdagi issiqlik uyg‘otilgan zaryad tashuvchilar konsentratsiyasining ortishi bilan izohlanadi. Harorat ko‘tarilishi natijasida intrinsik tashuvchilar soni eksponensial qonuniyat asosida oshadi, bu esa p-n o‘tish orqali o‘tuvchi teskari tok komponentining sezilarli darajada ortishiga olib keladi. Natijada, fotoelementning teskari rejimdagi elektr xususiyatlari sezilarli darajada o‘zgaradi va bu uning umumiy ishlash samaradorligiga ham ta’sir ko‘rsatadi.

VAX egri chizig‘ining eksponensial qismidan foydalanib, qurilmaning muhim parametrlaridan biri bo‘lgan ideallik faktori A aniqlandi. Bu maqsadda kuchlanish bo‘yicha logarifmik tokning xususiy hosilasi hisoblab chiqildi. Mazkur yondashuv p-n o‘tish orqali zaryad tashish mexanizmlarini baholash imkonini beradi. $\frac{\partial ln(I)}{\partial V}$



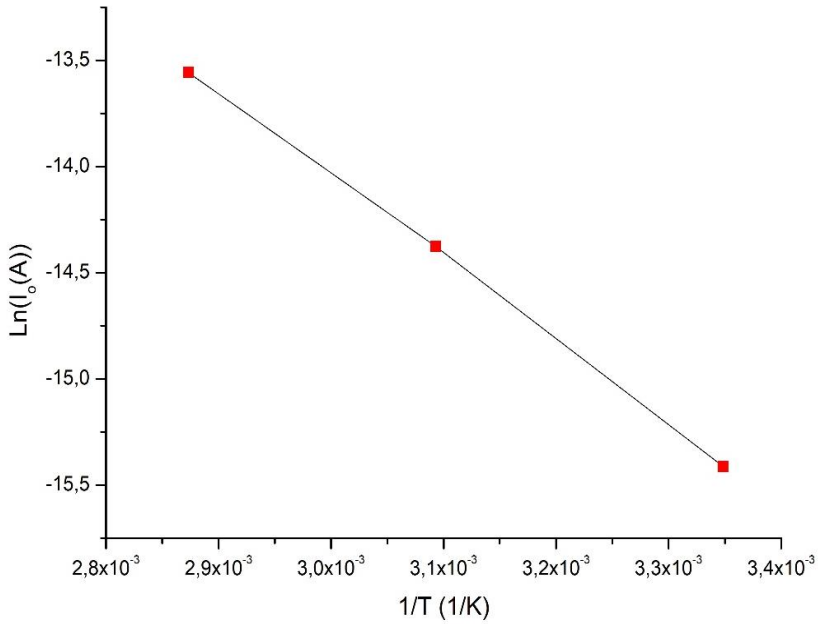
a)



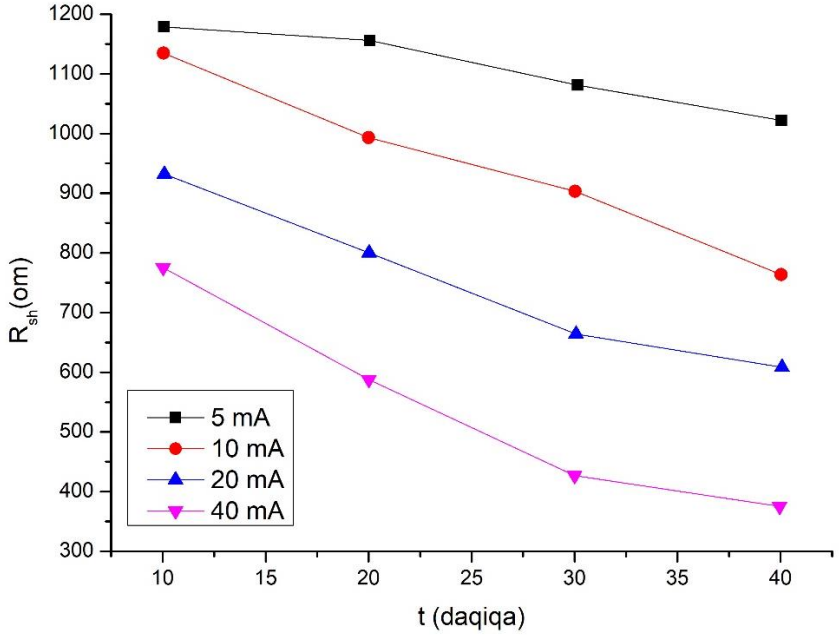
b)

1-rasm. Monokristall kremniy fotoelementining turli haroratlarda qorong‘ulikdagi VAX xarakteristikalari bog‘liqligi).$(1.a-rasm: Ln(I)\ va\ U\ bog'liqligi, 1.b-rasm: I\ va\ U\ ning\ o'zarobo)$

Ideallik faktorining qiymati ideal diod uchun birlikka teng bo‘lishi kerak bo‘lsa-da, real qurilmalarda u 1 dan katta qiymatlarni qabul qiladi. Bu esa rekombinatsiya jarayonlari, sirt nuqsonlari hamda hajmiy defektlarning mavjudligi bilan bog‘liq. Tadqiqot natijalari ideallik faktorining haroratga bog‘liq holda o‘zgarishini ko‘rsatib, yuqori haroratlarda rekombinatsiya mexanizmlarining kuchayishini tasdiqlaydi. Barer (to‘siq) balandligi ni aniqlash maqsadida teskari to‘yinish tokining haroratga bog‘liqligi chuqur tahlil qilindi (1-rasm). Ushbu bog‘liqlik Arrenius koordinatalarida (ya’ni ning 1/T ga bog‘liqligi) tasvirlandi. Olingan grafikning chiziqli xarakterga ega bo‘lishi zaryad tashish jarayonida termal emissiya mexanizmi ustun ekanligini ko‘rsatadi. Bu esa shuni anglatadiki, zaryad tashuvchilar energiya to‘sig‘ini issiqlik energiyasi hisobiga yengib o‘tadi. Grafikning og‘ish burchagi orqali ning qiymati aniqlanib, u fotoelement materialining energetik xossalari haqida muhim ma’lumot beradi.$\phi_b lnI_0 \phi_b$



2-rasm.Teskari to‘yinish tokining haroratga bog‘liqligi.

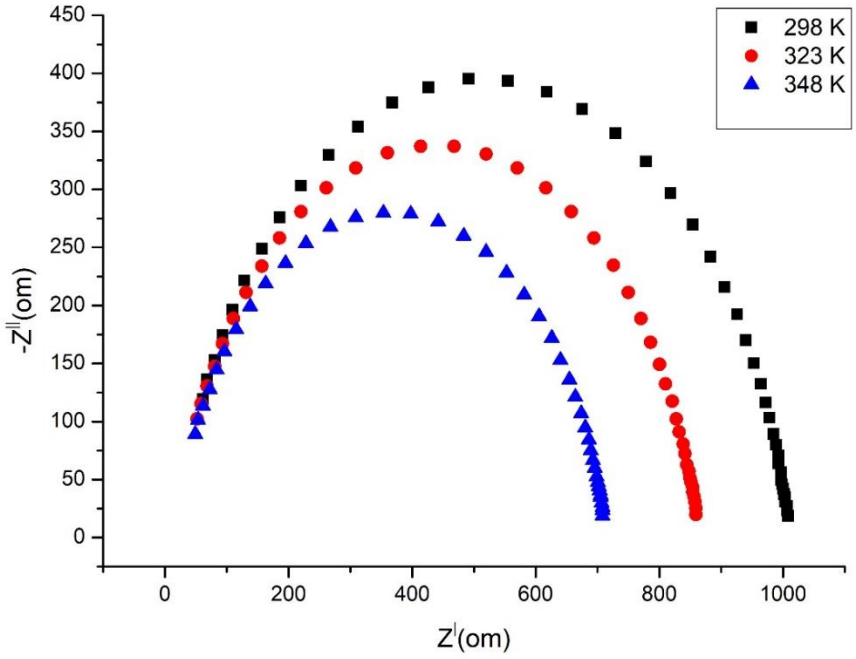


3-rasm. Teskari to‘yinish toki ta’sirida parallel qarshilik va sizib o‘tuvchi tokning vaqt bo‘yicha degradatsiyasi.$R_{sh}(I_{leak})$

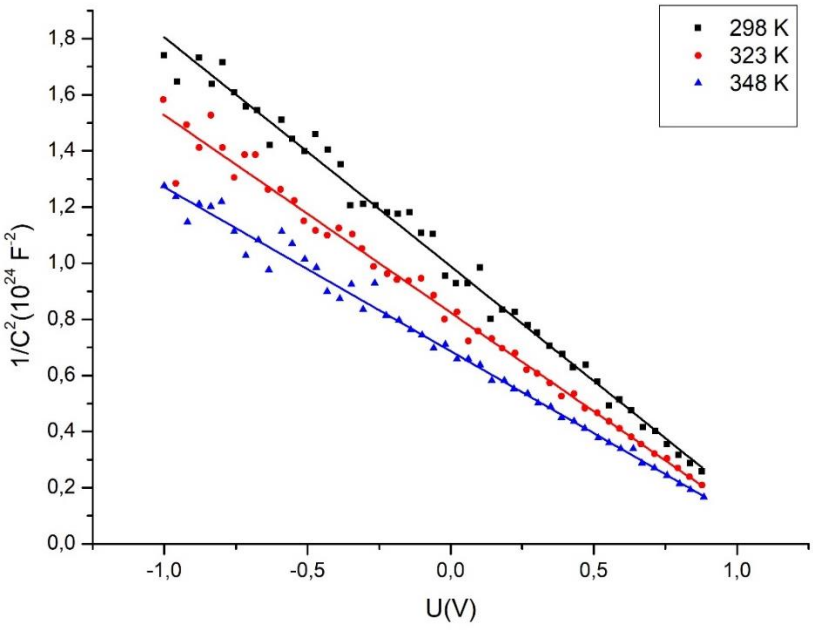
Tayer balandligini aniqlash uchun teskari to‘yinish tokining haroratga bog‘liqligi tahlil qilindi. Arrenius grafigining chiziqli tabiati zaryad tashishda termion emissiya mexanizmi ustunligini ko‘rsatdi (2-rasm).ϕ_b

3-rasmda Termiz hududiga xos bo‘lgan yuqori changlanish darajasini hisobga olib, qisman soyalanish sharoitlari modellashtirildi. Ushbu modellashtirish natijalari shuni ko‘rsatdiki, vaqt o‘tishi bilan fotoelementning parallel qarshiligi kamayib boradi. Parallel qarshilikning kamayishi p-n o‘tish sohasida qo‘shimcha o‘tkazuvchan yo‘llarning – ya’ni sizib o‘tuvchi tok kanallarining (shuntlar) paydo bo‘lishi va kengayishini anglatadi. Bunday shunt yo‘llari asosan materialdagi nuqsonlar, mikro yoriqlar va sirt ifloslanishlari natijasida yuzaga keladi. Natijada, fotoelement orqali o‘tuvchi foydali tokning bir qismi yo‘qotilib, umumiy samaradorlik pasayadi.R_{sh}

Impedans spektroskopiyasi orqali olingan natijalar, xususan Nikvist diagrammalari (kompleks tekislikdagi yarim aylana ko‘rinishidagi grafiklar) fotoelement ichidagi rekombinatsiya jarayonlari haqida muhim axborot beradi. Tadqiqotlar shuni ko‘rsatdiki, harorat ortishi bilan rekombinatsiya qarshiligi R_p keskin kamayadi (4-rasm). Nikvist grafiklarida yarim aylanalar radiusining kichrayishi zaryad tashuvchilarning rekombinatsiya ehtimoli ortganini bildiradi. Bu esa zaryad tashuvchilarning sirtlararo holatlar, defektlar va energetik tuzoqlar orqali yo‘qotilishini anglatadi. Ayniqsa, yuqori haroratlarda ushbu jarayonlar yanada faollashib, fotoelementning ichki yo‘qotishlari ortadi.



4-rasm. Fotoelementning turli haroratlardagi Nikvist grafiklari.



5-rasm. Fotoelementning qiymatining kuchlanishga bog‘liqligi (Mott-Shottki grafigi).$1/C^2$

5-rasmdagi Volt-Farad (C–V) tahlili yordamida p-n o‘tish hududidagi donorlar konsentratsiyasi Nd aniqlandi. Ushbu usul yarimo‘tkazgich strukturasining legirlash darajasini baholashda keng qo‘llaniladi. ning kuchlanishga bog‘liqligi chiziqli xarakterga ega bo‘lib, uning og‘ish burchagi orqali donorlar konsentratsiyasi hisoblab chiqiladi. Tadqiqot natijalari shuni ko‘rsatdiki, harorat ortishi bilan ushbu bog‘liqlikning xarakteri ma’lum darajada o‘zgaradi. Bu esa legirlanishning bir jinsliligi buzilishi yoki zaryad tashuvchilarning qayta taqsimlanishi bilan izohlanadi. Shuningdek, harorat ta’siri ostida p-n o‘tish kengligining o‘zgarishi ham kuzatiladi, bu esa o‘z navbatida sig‘im xossalariga bevosita ta’sir ko‘rsatadi. Volt-farad tahlili orqali olingan natijalar yarimo‘tkazgich strukturasining ichki elektr maydonlari va zaryad taqsimoti haqida muhim ma’lumotlarni taqdim etadi.$1/C^2$

Aniqlangan barcha parametrlar – ya’ni, hamda qiymatlari tizimli ravishda tahlil qilinib, ular 1-jadvalda jamlangan holatda keltirilgan. Ushbu jadval turli harorat sharoitlarida fotoelementning asosiy elektr va fizik parametrlarining miqdoriy qiymatlarini aks ettiradi. Jadval ma’lumotlari orqali haroratning kremniy fotoelementining ichki xususiyatlariga ta’siri aniq va solishtirma tarzda baholanishi mumkin. $I_0, A, \varphi_b, R_{sh}, R_p N_d$

1-jadval.

Termizning turli haroratlarida monokristall kremniyli fotoelementning fotoelektrik parametrlari.

Harorat, T (K)	$R_b(\Omega)$	$R_p(\Omega)$	$C_p(nF)$	$N_d(cm^{-3})$
298	5.0	1000	100	$1.52 \cdot 10^9$
323	4.2	850	120	$1.67 \cdot 10^9$
348	3.6	700	140	$2.08 \cdot 10^9$

1-jadval fotoelement parametrlarining haroratga bog‘liqligini tizimli ravishda ifodalaydi va u tadqiqot natijalarining muhim qismini tashkil etadi. (donorlar konsentratsiyasi) ning ortishiga sabab «effektiv faollashuv». Ushbu jadval asosida fotoelementlarning optimal ishlash sharoitlarini aniqlash, shuningdek, yuqori harorat va changlanish ta’sirida yuzaga keladigan degradatsiya jarayonlarini oldindan prognoz qilish imkoniyati yuzaga keladi. Olingan natijalar Termiz kabi iqlim sharoitlariga ega hududlarda quyosh energetikasi qurilmalarini loyihalashda alohida yondashuv zarurligini ko‘rsatadi. Xususan, fotoelementlarning ish haroratini pasaytirishga qaratilgan samarali sovutish tizimlarini joriy etish muhim ahamiyat kasb etadi. Bunday tizimlarga passiv sovutish (issiqlik tarqatuvchi radiatorlar, issiqlik o‘tkazuvchan materiallar) hamda aktiv sovutish (ventilyatsiya, suyuqlik asosidagi sovutish tizimlari) kiradi.N_d

Bundan tashqari, changlanish va qisman soyalanish ta’sirini kamaytirish uchun himoya qoplamalari, o‘z-o‘zini tozalovchi sirtlar va optik yo‘qotishlarni minimallashtiruvchi texnologiyalarni qo‘llash maqsadga muvofiqdir. Bu kabi texnologik yechimlar fotoelement yuzasida chang to‘planishini kamaytirib, nurlanishning aktiv qatlamga yetib borishini yaxshilaydi va «issiq nuqtalar» hosil bo‘lish ehtimolini pasaytiradi.

XULOSA

Shunday qilib, o‘tkazilgan tadqiqotlar natijalari monokristall kremniy fotoelementlarning issiq va changli muhitdagi ishlash xususiyatlarini chuqurroq tushunishga imkon berdi. Aniqlangan 45% gacha bo‘lgan parallel qarshilikning kamayishi, rekombinatsiya jarayonlarining jadallashuvi hamda 0.060 eV aktivlanish energiyasiga ega bo‘lgan sayoz energetik sathlar holatlarining roli ushbu tizimlarning samaradorligini belgilovchi asosiy omillar sifatida namoyon bo‘ldi. Mazkur ilmiy xulosalar asosida ishlab chiqiladigan texnologik yechimlar kelajakda mintaqaviy quyosh energetikasi tizimlarining ishonchliligi va samaradorligini oshirishga xizmat qiladi.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Sze S.M., Ng K.K. Physics of Semiconductor Devices. 3rd Edition. New York: Wiley-Interscience, 2006. pp. 832.

2. Morales-Vilches A. B., et al. Damp-Heat–Induced Degradation and Thermal Stress in Crystalline Silicon Solar Cells // Progress in Photovoltaics: Research and Applications. 2024. Vol. 32, No. 4. pp. 245–258. DOI: 10.1002/pip.3672.

3. Zainuddin M. A., et al. Analysis of trap-assisted recombination and donor concentration variations in silicon solar cells using Mott-Schottky plots // IEEE Transactions on Electron Devices. 2023. Vol. 70, No. 5. pp. 2412–2419. DOI: 10.1109/TED.2023.3251104.

4. Stanimirović Z., Stanimirović I. Mott-Schottky analysis of real semiconductor heterojunctions // Microelectronics Reliability. 2019. Vol. 94. pp. 12–20.

5. Tursunov M. O., Iliev Kh., Ismaylov B. The High-temperature analysis of silicon properties with manganese-oxygen binary complexes // Physical Sciences and Technology. 2024. Vol. 11, No. 1. DOI: 10.26577/phst2024v11i1a1.

6. Gundel S., et al. Degradation mechanisms in silicon p-n junctions under thermal and electrical stress // IEEE Transactions on Electron Devices. 2018. Vol. 65, No. 3. pp. 1102–1109.

7. Tursunov M. O., Zikrillaev Kh. F. Kremniyga legirlangan nikel va selen binar komplekslarning oʻzaro ta'sirlashuvini tadqiq etish // Eurasian Journal of Academic Research. 2022. Vol. 2, No. 6. DOI: 10.5281/ZENODO.6646213.

8. Tursunov M. M. O. Anomalous Photoelectric Phenomena in Silicon with Nanoclusters of Manganese Atoms // Semiconductors. 2022. Vol. 56. DOI: 10.1134/s1063782621060038.

9. Tursunov M. O., Iliev Kh., Abdiev U., Bobomuratov S. Research of properties of silicon with binary complexes involving Mn and S atoms // Norwegian Journal of Development of the International Science. 2023. No. 117. DOI: 10.5281/ZENODO.10009604.

10. Barsoukov E., Macdonald J. R. Impedance Spectroscopy: Theory, Experiment, and Applications. 3rd ed. Hoboken: Wiley, 2018.

11. Daliento S., et al. Investigation of thermal stress and deep level defects in crystalline silicon solar cells // Solar Energy Materials and Solar Cells. 2022. Vol. 238. p. 111624. DOI: 10.1016/j.solmat.2022.111624.

12. Motta H. P., et al. Hot-spot formation in shaded silicon PV modules // Journal of Renewable Energy. 2021. Vol. 15. pp. 45–58.

13. Hadjihadjigeorgiou P., et al. Interface states and trap-assisted transport in Si solar cells // Solar Energy Materials and Solar Cells. 2019. Vol. 191. pp. 154–162.

14. Vandervelde B., et al. Arrhenius analysis of leakage currents in silicon junctions // Semiconductor Science and Technology. 2017. Vol. 32. pp. 055012.

15. Schroder D. K. Semiconductor Material and Device Characterization. 3rd ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2006.