

У. Р.МАХМУДОВ

**а-Si:H АСОСИДАГИ ҚУЁШ ЭЛЕМЕНТЛАРИНИНГ
ФОТОГАЛЬВАНИК ХАРАКТЕРИСТИКАЛАРИНИ
ҲИСОБЛАШ
МОНОГРАФИЯ**



У. Р.МАХМУДОВ

**α -SI:H АСОСИДАГИ ҚУЁШ ЭЛЕМЕНТЛАРИНИНГ
ФОТОГАЛЬВАНИК ХАРАКТЕРИСТИКАЛАРИНИ
ҲИСОБЛАШ**

МОНОГРАФИЯ

Фазилат орг текс сервис наширёти

Фарғона- 2023

УДК 621.315.592

Аморф гидрогенизацияланган кремний асосли қуёш элементларининг фотогальваник характе-ристикаларини ҳароратга боғлиқлигини назарий тадқиқ қилиш асосида:

гидрогенизацияланган аморф кремний асосли қуёш элементларининг фотогальваник характеристикаларига ҳарорат таъсирини назарий ҳисоб натижалари орқали турли ҳароратларда ишлатиладигин қуёш элементларини шароитга мослаштириш;

қуёш элементлари ёруғлик тушгандаги вольт-ампер характеристикасининг тўлдириш коэффициентига ҳароратнинг таъсирини аниқлашдан, уларни фотогальваник характеристикаларини ҳарорат бўйича мувофиқлаштириш имконини берган.

Ушбу монография яримўтказгичлар физикаси соҳаси мутахассислари, ўқитувчи ва талабалар учун мўлжалланган.

Тақризчилар:

ф.-м.ф.н. доцент

Х. Қўчқоров

ф.-м.ф.н.

А. Халмирзаев

М У Н Д А Р И Ж А

КИРИШ.....	4
I БОБ. ҚУЁШ ЭЛЕМЕНТЛАРИ ВА УЛАРНИ ФОТОГАЛЬВАНИК ХАРАКТЕРИСТИКАЛАРИ.....	6
§1.1. Қуёшдан келадиган нурланиш оқимлари ва уларни турлари.....	6
§1.2. Қуёш элементларига қўйиладиган асосий талаблар	11
§1.3. Яримўтказгич асосли қуёш элементларининг турлари ва уларни ишлаш принципи.....	16
§1.4. Қуёш элементларининг вольт-ампер характеристикалари	18
§1.5. Қуёш элементларининг асосий фотогальваник характеристикалари.....	22
II БОБ. ҚУЁШ ЭЛЕМЕНТЛАРИНИНГ ФОТОГАЛЬВАНИК ХАРАКТЕРИСТИКАЛАРИНИ ХАРОРАТГА БОҒЛАНИШИ	39
§2.1. Қуёш элементларини тўйиниш ва қисқа туташув токи	39
§2.2. Қуёш элементлари қисқа туташув токи зичлигининг ҳароратга боғланиши.....	39
§2.3. Қуёш элементларининг фотоВАХ га ҳароратни таъсири	47
§2.4. Қуёш элементларининг эффектив фотогальваник характеристикаларини ҳисоблашни янги усули	55
§2.5. Қуёш элементларининг эффектив фотогальваник характеристикаларини ҳароратга боғланиши.....	58
III БОБ. ҚУЁШ ЭЛЕМЕНТЛАРИНИНГ ФОТОВАХ НИНГ НОИДЕАЛЛИК КОЭФФИЦИЕНТИ	62
§3.1. Қуёш элементларининг фотоВАХ нинг ноидеаллик коэффиценти	63
§3.2. Қуёш элементларининг ноидеаллик коэффицентиға ҳароратни таъсири	65
§3.3. Қуёш элементларининг эффектив кучланиши, токи зичлиги ва қуввати зичлиги ҳамда фотоВАХ нинг ноидеаллик коэффиценти.....	71

IV БОБ. ҚУЁШ ЭЛЕМЕНТЛАРИНИНГ ФОЙДАЛИ ИШ	
КОЭФФИЦИЕНТИ.....	77
§4.1. Қуёш элементларини ёруғлик тушгандаги вольт-ампер	
характеристикасини тўлдириш коэффициентини ҳисоблаш.....	77
§4.2. Қуёш элементлари фото вольт-ампер характеристиканинг	
тўлдириш коэффициентига ҳарорат ва ноидеаллик коэффициентини	
таъсири.....	81
§4.3. Қуёш энергиясини айлантиришнинг ФИК ва уни ҳарорат ва	
ноидеаллик коэффициентига боғланиши.....	86
ФОЙДАЛАНИЛГАН АДАБИЁТЛАР.....	94

АСОСИЙ БЕЛГИЛАШЛАР ВА ҚИСҚАРТИРИШЛАР

a -Si:H-гидрогенизацияланган аморф кремний;
ҚЭ-куёш элементи;
Фото ВАХ-ёруғлик тушгандаги вольт-ампер характеристика;
ФИК-фойдали иш коэффиценти;
МДЯ- метал- диэлектрик- яримўтказгич
 $j(\lambda)$ -тўла фототок зичлиги
 $j_p(\lambda)$ - $j_n(\lambda)$ - p ва n қатламдаги асосий бўлмаган заряд ташувчиларнинг диффузия ток зичлиги;
 $j_{dr}(\lambda)$ - дрейф ток зичлиги;
 j_ϕ -элемент занжиридаги фототок зичлиги;
 j_0 -диоднинг қоронғуликдаги тўйиниш токи зичлиги;
 q -электрон заряди;
 k -Больцман доимийси;
 n' - ҚЭ фотоВАХ ининг сифат коэффиценти;
 T - абсолют ҳарорат;
 j_{kt} - қисқа туташув токи зичлиги;
 U_{cu} -сальт ишлаш кучланиши;
 $P_{эф}$ -юза бирлигидан чикувчи максимал қувват зичлиги;
 ff -ФотоВАХ нинг тўлдириш коэффиценти;
 η – фойдали иш коэффиценти;
 P_0 - тушаётган оптик нурланишни қуввати зичлиги;
 E_g -таъқиқ зона кенглиги;
 $\hbar$ - Больцман доимийси;
 R_k -кетма-кет қаршилик;
 $R_{ш}$ - Шунт қаршилик;
 η_Q -заряд ташувчиларнинг тўпланиш коэффиценти;
 Γ -фотонлар оқими спектрал зичлиги;
 E -фотонлар энергияси;
 λ -фотонлар тўлқин узунлиги;
 T_c –ҚЭ и ҳарорати;
 T_r - ёруғлик нури тушаётган қора жисм ҳарорати
 L -асосий бўлмаган заряд ташувчиларни диффузия узунлиги;
 N_A -Авагадро сони;
 τ -заряд ташувчиларни яшаш вақти;
 μ_C - ўтказувчанлик зонасидаги электронлар ҳаракатчанлиги;
 N_C -ўтказувчанлик зонасидаги эффектив ҳолатлар зичлиги;
 E_S -яримўтказгич сиртидаги электр майдон;
 ϕ -потенциал тўсиғи баландлиги;
 μ_C - ўтказувчанлик зонасидаги заряд ташувчиларнинг ҳаракатчанлиги;
 j_{00} -хона ҳароратидаги тўйиниш токи зичлиги;

γ -потенциал тўсиғи баландлигини ҳарорат коэффициентини;
 φ_0 —қуёш элементини $T=0K$ ҳароратдаги потенциал тўсиғи баландлиги;
I БОБ. ҚУЁШ ЭЛЕМЕНТЛАРИ ВА УЛАРНИ ФОТОГАЛЬВАНИК

ХАРАКТЕРИСТИКАЛАРИ

§1.1. Қуёшдан келадиган нурланиш оқимлари ва уларни турлари

Ер юзида ва атмосферада рўй берадиган барча табиий жараёнларнинг асосий манбаи Ерга тушадиган Қуёш нурланиши энергиясидир. Қуёшдан Ерга тушадиган нурланиш оқими энергиясини *қуёш радиацияси* деб аталади.

Энергиянинг қайтадан тикланмайдиган манбалари - нефт, газ, тошкўмир ҳам ўта қадим замонларда ўсимликларнинг чиришидан пайдо бўлганлигини ёки ўсимликларнинг ўзи ҳам қуёш нурланиш энергияси ҳисобига ўсганлигини унутмаслигимиз керак. Қуёшнинг марказий қисмида ҳарорат бир неча миллион градусгача етганлигидан водороднинг гелийга айланиши юқори температурали термоядро реакцияси рўй беришига олиб келади.

Қуёш ҳар секунд давомида фазога $3,71 \cdot 10^{26}$ Ж энергия сочади, Ерга эса бу энергиянинг икки миллиарддан бир улушигина тушади. Ер Қуёшдан йилига $5,74 \cdot 10^{24}$ Ж энергия олади. Ер юзининг ҳар бир квадрат километр майдонига йилига ўртача $1,1 \cdot 10^{16}$ Ж энергия тушади. Худди шунча миқдордаги иссиқликни олиш учун эса $4 \cdot 10^8$ кг дан ортиқ тошкўмир ёқиш лозим. Кўмирни ёқишдан ҳосил бўладиган чиқинди ва зарарли газлар экологияни бузиши ҳаммага маълум [1; 5-6 б, 2; 238-241 б, 3; 70; 1-76.].

Қуёш Ерга 1,5 сутка давомида барча мамлакатлар электр станцияларининг биргаликда бир йилда ишлаб чиққан энергиясига тенг энергия беради. Атмосферанинг юқори чегарасида қуёш нурларига тик қўйилган юзага тушадиган радиацияни миқдор жиҳатидан қарайлик.

Қуёш радиацияси атмосферадан ўтишда мураккаб ўзгаришларга учрайди. Атмосфера қатламининг юқори чегарасидан Ергача бўлган масофада қуёш радиациясининг маълум қисми атмосфера газлари ва аралашмалар томонидан ютилади ва иссиқликка айланади. Қуёш радиациясининг яна бир қисми

атмосфера газлари, қаттиқ ва суюқ аралашмалар томонидан сочилади. Қуёш радиациясининг ютилишдан, сочилишдан қолган қисми эса ер юзигача етиб келади. Атмосферада сочилган радиациянинг маълум қисми яна Ерга тушади. Натижада, қуёш радиацияси атмосферадан ўтишида ютилиши сабабли миқдор жиҳатдан кучсизланади ва сочилишидан спектрал таркиби ўзгаради. Атмосферадаги радиация оқимлари бир-биридан тўлқин узунликлари (ва энергиялари) билан фарқ қилади.

Нурланиш оқимининг тўлқин узунликлари, тўлқин частотаси ёки энергияси бўйича тақсимотлари *спектр* деб юритилади. Қуёш нурланиш спектри учта: ультрабинафша ($\lambda < 0,40 \mu\text{м}$), кўринадиган ($0,40 \leq \lambda \leq 0,76 \mu\text{м}$) ва инфрақизил ($\lambda \geq 0,76 \mu\text{м}$) қисмлардан иборат. Атмосферанинг юқориги чегарасига тушадиган бутун қуёш радиациясининг 46 фоизи спектрнинг кўринадиган қисмига, 47 фоизи эса инфрақизил радиацияга ва 7 фоизи ультрабинафша радиациясига тўғри келади. Буни қуёш радиациясини интенсивлиги бўйича тақсимои дейилади [1; 7-13 б, 3; 5-10 б].

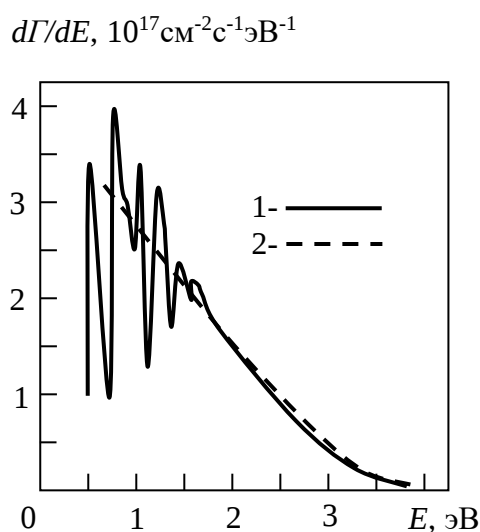
Спектрдаги асосий рангларга мос тўлқин узунликлар чегараларини куйидагича кўрсатилади: бинафшага 390-455 нм, кўкга 455-485 нм, ҳаворангга 485-505 нм, яшилга 505-550 нм, сариқ-яшилга 550-575 нм, сариқ (зарғалдоқ) қа 575-585 нм, тўқ сариққа 585-620 нм, қизилга 620-760 нм.

Қуёш нурланиш спектрида энергиянинг асосий қисми 0,20 мкм дан 24,0 мкм гача тўлқин узунликлар чегарасига тўғри келади. Атмосферанинг юқори чегарасида қуёш нурланиши спектрида энергия максимуми 0,48-0,49 мкм тўлқин узунликларга, яъни спектрнинг кўк-ҳаворанг қисмига мос келади. Ер юзидаги тўғри радиация спектрида энергия максимуми эса сариқ-яшил соҳага тўғри келади.

Одатда қуёш элементларини ФИК ини ҳисоблашда уларга тушётган нурланишни AM_0 , $AM_{1.0}$, $AM_{1.5}$, $AM_{2.0}$ “қуёш радиациясининг ҳаво массаси” (“*air mass of solar radiation*”) шароитларида амалга оширилади [3]. Бу шароитлар тушаётган нурланишнинг куйидаги қийматларига мос келади. Атмосферадан ташқарида $AM_0 \approx 1353 \text{ Вт/м}^2$, қуёш зенитда турганда,

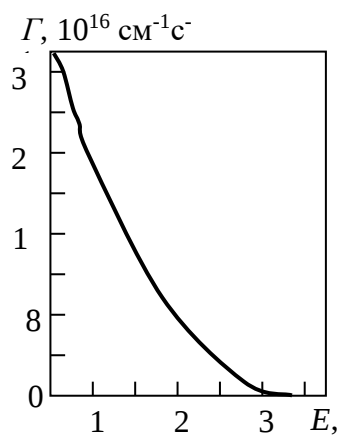
$AM1.0 \approx 925 \text{ Вт/м}^2$, қуёш зенит билан $\varphi = 45^\circ$ бурчак ҳосил қилиб турганда $AM1.5 \approx 844 \text{ Вт/м}^2$, қуёш зенит билан $\varphi = 60^\circ$ бурчак ҳосил қилиб турганда $AM2.0 \approx 691 \text{ Вт/м}^2$. Маълумки, ҚЭ лари самарали ишлаши учун улар ўрнатиладиган ерда қуёшли кунлар кўп бўлиши керак. Ўзбекистон шароитида йиллик қуёшли кунларни соатлардаги ҳисоби давомийлиги 2400-2800 соат оралиғида ётади [4]. Бу шароит ҚЭ лари учун жуда яхши ҳисобланади.

Қуёшдан тушаётган фотонлар оқими спектрал зичлигининг энергиялар бўйича тақсимоти $AM1.5$ шартларда 1.1- расмда келтирилган [5].



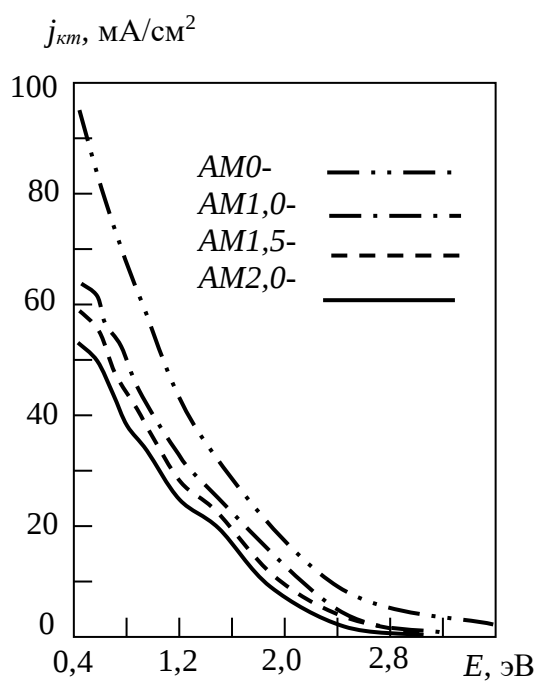
1.1-расм. $AM1,5$ шароитида фотонлар оқими спектрал зичлигининг энергиялар бўйича тақсимоти [5].

Фотонлар оқими зичлигининг интеграл қийматлари эса 1.2-расмда келтирилган бўлиб, улардан фототок зичлигини аниқлаш учун ҳисоблашларини бажаришда фойдаланилади.



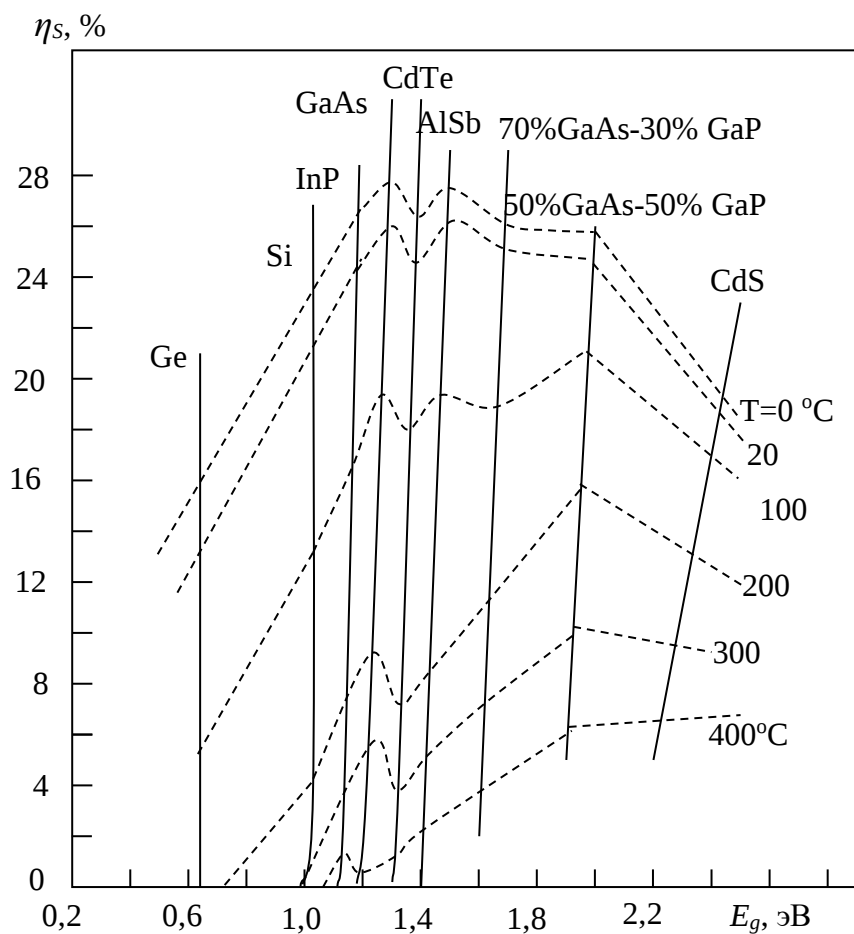
1.2-расм. *AM1,5* шароитида фотонлар оқими зичлигининг интеграл қийматлари [5].

Бу тақсимотлардан фойдаланиб аниқланган қисқа туташув токи зичлигини ҚЭ тушаётган фотонларни интенсивлигига боғланиши эса 1.3-расм да келтирилган [6].



1.3-расм. Қисқа туташув токи зичлигини ҚЭ тушаётган фотонларни интенсивлигига боғланиши [5].

Маълумки, яримўтказгичларда ютиладиган фотонларни энергияси бу материални таъқиқ зонасига (E_g) боғлиқ бўлади. Шунинг учун яримўтказгичлардан тайёрланадиган қуёш элементларининг фойдали иш коэффициенти улар тайёрланадиган яримўтказгич материалининг таъқиқ зонасининг кенглигига боғлиқ бўлади. Бу боғланиш 1.4-расмда келтирилган. Расмдан кўринадик, яримўтказгичлар асосида тайёрланадиган қуёш элементларининг фойдали иш коэффициентининг максимал қиймати $E_g = 1,2-1,45$ эВ га тўғри келади [7].



1.4-расм. Идеал ҚЭ нинг фойдали иш коэффициентига таъқиқ зонанинг энергетик кенглиги ва температурани таъсири [5].

§1.2. Қуёш элементларига қўйиладиган асосий талаблар

Қуёш нурланишини электр энергиясига фотоэлектрик айлантиргичларни яратишга қўйиладиган бош талаблар: ишончли ишлаши, айлантириш самарадорлигининг (ФИК) юқори кўрсаткичлари, фотогальваник характеристикаларни стабиллиги (барқарорлиги), таннархнинг пастлиги ва энергиянинг бошқа манбаларига рақобатбардошлиги ҳисобланади.

ҚЭ лари ва энергетик модулар бўйича олиб борилаётган ишлар асосан, айлантиришнинг ФИК ни 10 % дан кичик бўлмаган даражада сақлаш билан бирга уларнинг таннархини имкон қадар максимал камайтиришга қаратилган. Нурланишни ютилишида пайдо бўладиган электрон-ковак жуфтлари ҚЭ да

фототокни таъминлайди. Бунда яримўтказгич таъқиқ зонасининг кенглиги ҚЭ да қисқа туташувда ҳосил бўлиши мумкин бўлган максимал фототокни, яхлит ҳолда ҚЭ ни ФИК ни ҳам белгилайди [8; 9; 10.].

Одатда қуёш энергиясини батареяларининг ФИК ни ҳисоблаш қуйи-даги босқичларни ўз ичига олади.

1. Тушаётган фотонлар зичлигини спектрал тақсимланишидан келиб чиққан ҳолда фототокнинг интеграл зичлигини ҳисоблаш, яримўтказгичнинг ҳажмий характеристикаларини ёруғликнинг ютилиш коэффициенти $\alpha(\lambda)$, асосий бўлмаган заряд ташувчиларнинг диффузия узунлигини L_d ва сиртий рекомбинация тезлигини R ҳамда ҚЭ и шаклини ҳисоблаш.

2. Максимал солиштирма қувватни (қувватни эффектив қиймати) $P_{эф}$ диоднинг ВАХ сидан $j_{эф}$ (ток зичлигининг эффектив қиймати) фойдаланиб ҳисоблаш.

3. ФИК ни ҳисоблаш, P_0 тушаётган қуёш нурланишини тўла солиштирма қуввати (элемент сиртининг нурланганлиги), бундан ташқари яна иккита қўшимча параметр муҳим аҳамиятга эга бўлиб улар салт ишлаш кучланиши ва ВАХ нинг тўлдириш коэффициентиدير. ҚЭ ининг самарадорлиги боғлиқ бўлган асосий параметрлар $j_{кт}$, j_0 ва n' ҳисоблансада, кўпинча $U_{си}$, $j_{кт}$ ва ff ларнинг қийматлари келтирилади. Булар ҚЭ ининг асосий хоссалари тўғрисида кўриниб турадиган тасаввурлар берганликлари ва осон ўлчанганликлари учун қулай. Идеалга яқин бўлган ҚЭ ларининг $U_{си}$, $j_{кт}$ ва ff параметрлари илмий адабиётларда қабул қилинганидек амалда бир-бирига боғлиқ эмас деб ҳисобланади. Бу ҳолат ноидеал харак-теристикали ҚЭ ини қаралаётганда фарз сифатида қабул қилинади. Ноидеал характеристикалар кучли ёритилганда ёки ажралиш чегарасида заряд ташув-чиларнинг рекомбинацияси туфайли содир бўладиган ток асосий бўлган ҳолда кузатилади [11/20; 76-79 б., 12/21; 349 б., 13/22; 299-302 б.]. Қатъий қилиб айтганда ноидеал элементларнинг параметрларини бир-бирига боғланган деб қараш лозим.

Қуёш энергиясини айлантиришнинг ФИК ни аниқлаш ҳақидаги масалани ҳал қилишда учта ёндашув маълум:

- ёруғлик ва қоронғуликдаги тоқлар чизикли қўшилиши мумкин деган фаразга асосланган суперпозиция принципини қўллаш идеал элемент учун ФИК нинг аниқ қийматини топишга имкон беради. Бундаги идеал элементда кетма-кет ва шунт қаршилиқлар мавжуд бўлади деб ҳисобланади [14/23; 133-138 б., 15/24; 821-832 б.].

- Идеал элементларни таҳлил этишда уларнинг параметрларидан келиб чиқиш мумкин. Бунда идеал элементларнинг параметрлари қандайдир ғалаёнланишга учрайди деб олинади.

Қўп ўтишли ҚЭ ларини олинганлиги ҳақидаги биринчи хабар, маълумот 1979 йилда бўлган [16/33; 492 б., 17/34; 470-475 б., 18/35; 44-49 б.]. Бу соҳа-да кейинги йилларда тадқиқодлар уч ўтишли ҚЭ ларининг лаборатория намуналарини яратишга олиб келди. Ҳозирги кундаги уларнинг энг катта ФИК дастлаб 14,6 %, барқарорлашгани 13 %, юзаси 0,27 см². Уч ўтишли ҚЭ лари асосидаги катта юзали қуёш модуллари соҳасида ФИК нинг максимал қиймати 905 см² юзага 10,4 % ни ташкил этади [19/36; 251-254 б., 20/85; 1689-1698 б., 21/86; 730-746 б.].

ҚЭ ни электр энергиясига самарали айлантириш учун қуёш элементи бир қатор талабларга жавоб бериши керак [22/3; 2-5 б., 23/37; 67-70 б., 24/38; 1096-1101 б., 25/39; 469-473 б., 26/40; 163-169 б.].

а) ҚЭ нинг актив қатлами материалининг қуёш ёруғлиги энергиясининг катта қисмини ютилишини таъминлаши учун α -оптик ютилиш коэффициенти етарлича катта бўлиши.

б) ҚЭ и яримўтказгичли ўтишда потенциал тўсиқнинг баландлиги катта бўлиши билан характерланиши.

в) Ёритилганда ҳосил бўлган электронлар ва ковақлар актив қатламнинг икки томонидаги контакт электродларга самарали тўпланишлари.

г) ҚЭ и билан кетма-кет уланган тўла қаршилиқ (юкланиш қаршилигидан ташқари) Жоуль иссиқлигига қувватни йўқотишларини камайтириш учун кичик бўлиши [27/42; 6.1-12, 28/43; 6.1424-1427].

д) ҚЭ нинг актив қатламининг структураси ҚЭ ини актив соҳаси бўйича бир жинсли бўлиши.

е) Барқарор фотогальваник характеристикаларга эга бўлиши керак яъни, ишлатиш муддати (эксплуатация) давомида барқарор ва ишончли бўлиши, ташқи таъсирлар-ёруғлик, ҳарорат, намлик ва ҳоказолар таъсирида деградацияланмаслиги.

ж) Механик мустаҳкам бўлиши.

з) Баҳоси ҳаммабоп ва ишлаб чиқарилишда тежамли бўлиши.

и) Атроф муҳитни ифлослантормаслиги.

ҚЭ и актив қатламининг материалига яна қўшимча қуйидаги талаблар ҳам қўйилади: таъқиқ зона кенглиги 1,1-1,7 эВ лар оралиғида бўлиши, тўғри зонали структурага эга бўлиши ва материални катта юзаларга юқори тезликларида ($>5 \text{ Å}^\circ/\text{с}$) ўстиришни технологиясини оммавий ишлаб чиқаришда фойдаланишнинг мумкин бўлиши [29/17; 6.39-47, 30/44; 6.243-250].

Фотоэлектрик асбоб шундай тузилган бўлиши керакки, унинг фаол яримўтказгич қатламида ёруғликни самарали ютиши ва электр қувватини ташқи юкламага энг кичик энергия йўқолиши билан узата олиши керак. Бундай фотоэлектрик ўзгартиргич катта ички потенциалли $p-n$ ўтишга эга бўлиши керак. Бундан ташқари фронтал контактли электрод фотонлар учун энг катта шаффофликка эга бўлиши ва иккала электродни контакт қарши-ликлари кичик бўлиши керак.

Яримўтказгичлар асосида тайёрланган ҚЭ ларида ишлатиладиган асосий конструкцияларни кўриб чиқамиз.

Энг содда фотоэлектрик қурилмалардан бири- бу Шоттки тўсиқли элементдир. Бу қурилмаларни n - тип ўтказувчанликка эга яримўтказгичларни, чиқиш иши юқори бўлган Pt , Rh , Pd ва бошқа металлларни ўстириш йўли билан шакллантирилади. Юқори чиқиш ишили металл яримўтказгич материалининг ичида мусбат соҳали фазовий ҳажмий зарядни ёки камбағаллашган қатламни ҳосил қилади [31/3; 6.256-264, 32/45; 6.407-424].

Шоттки тўсиқли элементни тартиблашган потенциали ва U_{cu} кучланиши юқоридаги метал пардани чиқиш иши ортиши билан катталашади, платинали контактдан фойдаланилганда $U_{cu} \sim 600$ мВ дан ортмайди. U_{cu} кучланишни орттириш усулларида бири шунга асос-ланадики, бунда Шоттки тўсиқли структура, юқоридаги металл контакт ва яримўтказгич орасига юпка ҳимояловчи қатлам ишлатиш билан ўзгартирилади. Бундай структура МДЯ (металл диэлектрик яримўтказгич) структура деб аталади. Бундай МДЯ структуралар учун бир неча меҳа-низмлар характерли бўлиб, юпка ҳимоя қатлами ҚЭ ларида фотожавобни орттиришга олиб келади [33/46; 6.641-2445, 34/47; 6.737-739]:

- фотогенерацияланган заряд ташувчиларни сиртий ҳолатларда ушланиши, тўсиқни самарали баландлигига таъсир қилиши;

- асосий заряд ташувчилар учун тўсиқ аммо, асосий бўлмаган заряд ташувчилар учун шаффоф қатлам сифатида таъсир қилувчи ҳимоя қатлам-нинг мавжудлиги;

- тўсиқни самарали баландлигини орттирувчи ички заряднинг мавжудлиги;

Шоттки тўсиқли ва МДЯ структурали ҚЭ и содда тузилишга эга бўлсада, бир неча камчиликларга эга:

- 0,6-0,65 В дан ортмайдиган нисбатан паст сальт ишлаш кучланиши;

- металл электродни ҳосил қилишдаги технологик қийинчиликлар: яъни, металл электрод 5 нм қалинликда, шаффоф, бир текис юпка ва сиртий эффектлар вақт бўйича стабил бўлиши керак.

p - n ўтишли ҚЭ ларига берилган тўлқин узунликларидаги ёруғлик ютилганида ҳосил бўладиган тўла фототокнинг зичлигини қуйидагича кўришишда ёзиш мумкин [35/10; 376 б., 36/17; 456 б., 37/18; 307 б.]:

$$j(\lambda) = j_p(\lambda) + j_n(\lambda) + j_{dr}(\lambda) \quad (1.1)$$

Бу ерда λ -тушаётган ёруғликнинг тўлқин узунлиги, $j_p(\lambda)$ ва $j_n(\lambda)$ -мос ҳолда p ва n қатламларда асосий бўлмаган заряд ташувчиларнинг диффузия тоқларининг

зичликлари, $j_{dr}(\lambda)$ - n - p ўтиш соҳасида ёруғлик томонидан гене-рацияланган заряд ташувчиларнинг электр майдонидаги дрейфи ҳисобига содир бўладиган ток зичлиги. p - n ўтиш асосидаги кристалл ҚЭ ларида заряд ташувчиларнинг диффузия узунлиги (100-200 мкм) катта бўлгани учун электр майдони бўлмаганида ҳам электродларга етиб бора олади. Айтилганларни эътиборга олиб (1.1) формулани қуйидагича ёзиш мумкин.

Моно-кристалл қурилмаларда

$$j_p(\lambda) + j_n(\lambda) \gg j_{dr}(\lambda), \quad (1.2)$$

Аморф ва кристалл бўлмаган p - i - n ўтишли қурилмаларда

$$j_p(\lambda) + j_n(\lambda) \ll j_{dr}(\lambda). \quad (1.3)$$

ҚЭ ўзига тушаётган нурланиш энергиясини фақат бир қисмини электр энергиясига айлантиради. Нурланишнинг қолган қисми энергияни айлантириш вақтида содир бўладиган бир қатор ходисалар туфайли йўқотилади. ҚЭ ини электр энергиясига айлантиришларда ҳамма йўқотишларини асосан икки қисмга ажратиш мумкин: Ёруғлик ва электр йўқотишлар [38/48; 68-73 б. 39/96; 111-112 б., 40/97; 208-212 б.]. Ёруғликли йўқотишларга ёруғликнинг қайтишидаги, нофаол ютилишидаги ва нурланишни ҚЭ ининг пастги электродига ўтиб кетишидаги йўқотишлар киради.

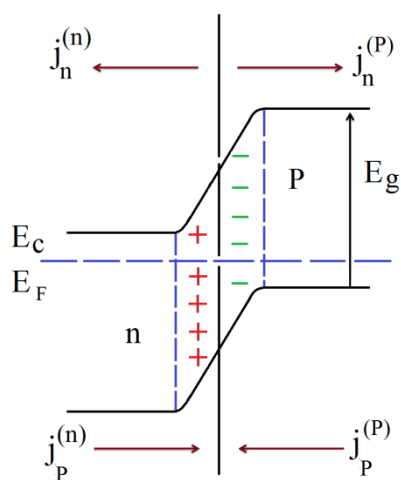
Электр йўқотишларга:

- генерациядаги йўқотишлар,
- ток бўйича йўқотишлар; рекомбинацияли (сиртдаги, ҳажмдаги ва ўтишлардаги) ва R_{sh} шунт қаршиликда,
- кучланиш бўйича йўқотишлар; таъқиқ зона ичидаги ўтишлар ва R_k кетма-кет қаршиликдаги йўқотишлар киради [41/49; б.91-96].

§1.3. Яримўтказгич асосли қуёш элементларининг турлари ва уларни ишлаш принципи

$p - n -$ ўтишларда фотоэффект. Маълумки, бир яримўтказгич намунасида электрон (n) ўтказувчанликли ва ковак (p) ўтказувчанликли икки соҳа

ҳосил қилиш мумкин. Электронлар n-соҳа ҳосил қилиш мумкин. Электрон-лар n-соҳадан p-соҳага диффузияланиб ўтиб, асосан унинг ҳажмида рекомбинацияланиб кетади, чегаранинг n-соҳа тарафидаги тор қатламда эса донор ионлардан иборат мусбат қўзғалмас ҳажмий заряд қолади. Коваклар эса p-соҳадан n-соҳага диффузияланиб ўтиб, асосан унинг ҳажмида рекомбинацияланиб кетади. Чегаранинг p-соҳа тарафидаги тор қатламда эса акцептор ионлардан иборат манфий қўзғалмас ҳажмий заряд қолади. Ҳажмий зарядлар пайдо бўлиши билан бирга чегаравий қатламда n-соҳадан p-соҳага йўналган электр майдон ва унинг таъсирида электронлар ва ковакларнинг дрейф оқимлари вужудга келади. Ҳажмий зарядли чегаравий қатламнинг шаклланиши то дрейф оқимлари диффузион оқимларга тенглашгунча давом этади. p- ва n-соҳалар чегарасида вужудга келадиган қатламни p-n- ўтиш дейилади (2.2 а-расм). [72; 9835-9446 б., 83; 112-124 б.]



Юқорида айтилганларга кўра, p-n -ўтиш соҳаси қуйидаги асосий хоссаларга эгадир:

1. Термодинамик мувозанат шароитида p-n - ўтиш соҳаси ҳажмий зарядига боғлиқ бўлган қатламдир. Бу ҳажмий зарядни асосан донор акцептор ионлар ташкил қилади.

2. p-n - ўтишнинг ҳажмий зарядига боғлиқ бўлган ва n-соҳадан p-соҳага томон йўналган электр майдон мавжуд, у эса бу соҳада потенциал

ўзгаришини тақозо қилади, бинобарин, р-п - ўтишнинг чегаралари орасида потенциаллар айирмаси вужудга келади.

3. р-п - ўтишнинг электр майдони электронларнинг п-соҳадан р-соҳа томон ва ковакларнинг р-соҳа томон ва ковакларнинг р-соҳадан п-соҳа томонга ўтишига тўсқинлик қилади. Шунинг учун ҳозир айтилган маънода р-п - ўтиш потенциал тўсиқ бўлиб, унинг баландлиги р-п - соҳадаги потенциаллар айирмасига тенг.

4. Юпқагина р-п - ўтиш қатламидаги ички электр майдон жуда кичик бўлганлиги учун у ҳосил қилган электр юрутувчи куч ҳам жуда кичик бўлади.

5. р-п -соҳасида ҳаракатчан зарядлар – электронлар ва коваклар жуда кам миқдорда бўлади, бинобарин, бу соҳанинг солиширма қаршилиги жуда ҳам катта (солиштирма ўтказувчанлиги жуда кичикдир).

р-п - ўтиш орқали п соҳадан р-соҳага ўтувчи электронлар ва коваклар токлари зичлигини $j_n^{(n)}$ ва $j_p^{(n)}$ билан, р-соҳадан п-соҳага ўтаётган коваклар ва электронлар токлари зичлигини эса $j_p^{(p)}$ ва $j_n^{(p)}$ билан белгиласак, у ҳолда мувозанат шарти қуйидаги кўринишда бўлади:

$$-j_n^{(n)} + j_p^{(n)} - j_p^{(p)} + j_n^{(p)} = 0, \quad (2.1)$$

бундан:

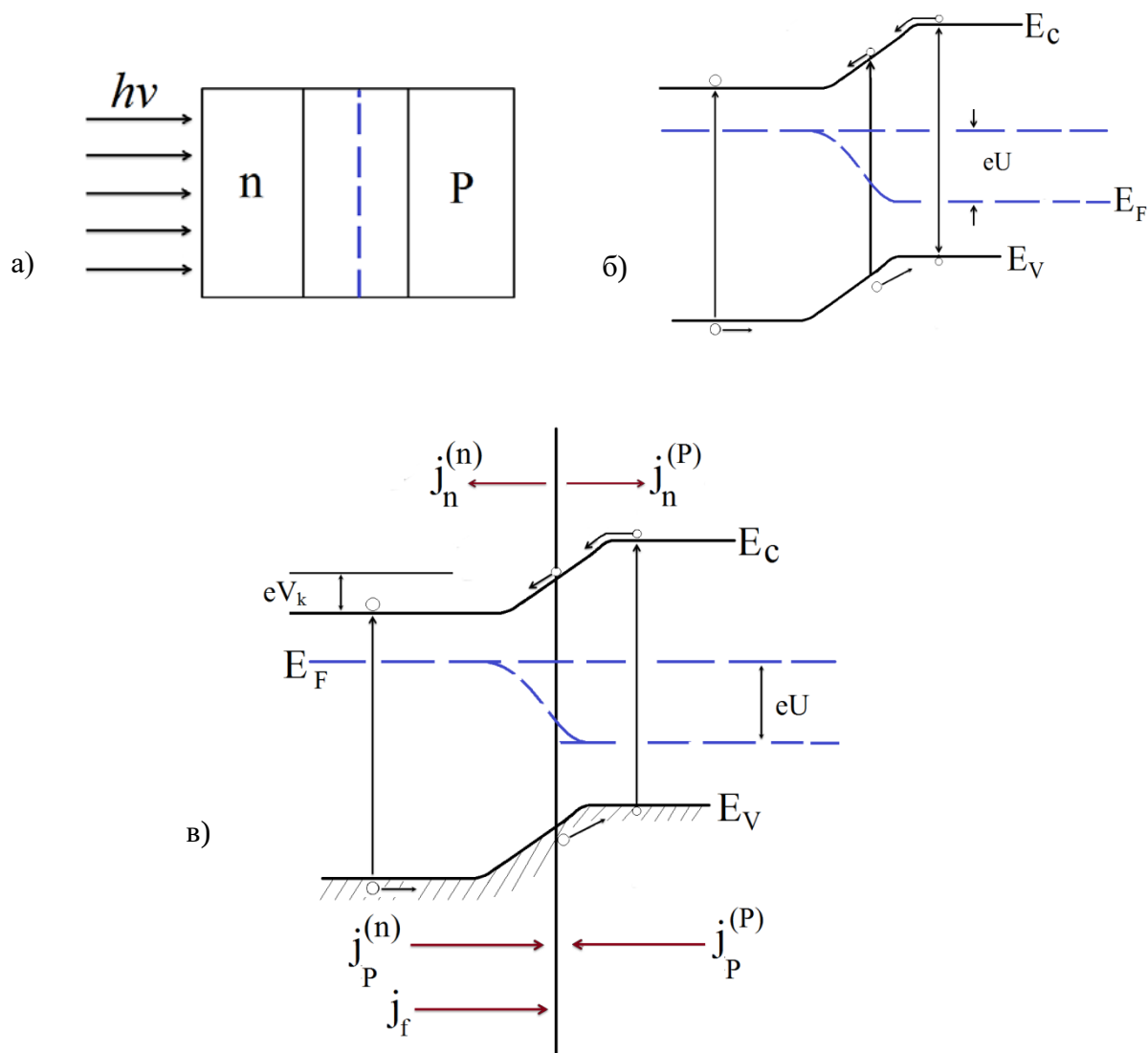
$$j_n^{(n)} + j_p^{(p)} = 0; \quad -j_p^{(p)} + j_p^{(n)} = 0.$$

(2.1) дан кўринишича, электронлар токлари йиғиндиси ҳамда ковакларнинг токлари йиғиндиси нолга тенг.

р-соҳадан (ундаги асосий бўлмаган заряд ташувчилар) электронларнинг п-соҳага оқим зичлиги ва п-соҳадан (унда асосий бўлмаган заряд ташувчилар) ковакларнинг р-соҳага оқими зичлиги тўйиниш токи зичлигининг ташкил этади:

$$j_s = j_n^{(p)} + j_p^{(n)} = j_{ns} + j_{ps} = eD_n \frac{n_p}{L_n} + eD_p \frac{p_n}{L_p}. \quad (2.2)$$

Агар р-п- ўтишли ярим ўтказгичларга тушувчи фотоннинг энергияси $\hbar\omega \geq E_g$ бўлганда интенсивлиги кучсиз ёруғлик билан ёритилса, унда электрон-ковак жуфтлари вужудга келади. Биринчи тартибда асосий заряд ташувчилар концентрациясининг ўзгариши ҳисобга олинмаса ҳам, ёритиш-нинг таъсири асосий бўлмаган заряд ташувчиларининг концентрациясини оширишдан иборат бўлади.



2.2-расм. р-п – ўтишнинг энергетик схемаси: а-ёритилмаган (мувозанатдаги) ҳол; б, в – ёритилган (номувозанат) ҳол.

Агар р-п - ўтишни унинг чегараси бўйлаб ёритилса (2.2 б-расм), у ҳолда намунада мувозанат ҳолатдаги заряд ташувчилар вужудга келади. р-п - ўтиш соҳасидан диффузион узунлик чамасидаги масофада вужудга келган электрон-

ковак жуфтлар p-n - ўтиш чегараси томонга диффузияланади, унинг майдони эса жуфтларни ажратади, яъни электронларни p-соҳадан n-соҳага ўткази, ковакларни эса n-соҳадан p-соҳага ўткази. p-n -ўтишда диффузион узунликдан узоқроқда вужудга келган мувозанатсиз электронлар ва коваклар p-n -ўтишга етиб келмай, рекомбинацияланиб кетади.

Ёруғлик p-n - ўтиш тексилигига тик тушаётган ҳолда (2.2, в-расм) агар p-n – ўтиш ёритилган сиртдан унча ичкари бўлмаса, унинг иккала тарафида ҳам электрон ковак жуфтлар вужудга келади. Ўтишнинг электр майдони p-n - ўтишнинг ёритилаётган тарафида вужудга келади ва p-n - ўтиш яқинидаги асосий бўлмаган заряд ташувчиларни бошқа соҳага ўткази. [73; 83]

Агар p-n ўтиш занжири узук бўлса, бу ҳолда ёритиш n-соҳада электронларнинг (манфий зарядларнинг) ва p-соҳада ковакларнинг (мусбат зарядларнинг) тўпланишига сабаб бўлади, потенциал тўсиқ eV қадар пасаяди, p-n ўтишнинг мувозанат ҳолати бузилади. Ёритиш оқибатида p-n ўтишнинг икки тарафи орасида пайдо бўлган қўшимча U потенциаллар айирмаси *сальт ишлаш кучланиши* ва j_ϕ фототок ҳосил бўлади, у мувозанат ҳолатдаги заряд ташувчилар токига мос келади. Шунинг учун унда ҳосил бўладиган натижавий токни қуйидагича ёзиб оламиз:

$$j = j_\phi - j_{n,\phi}^{(n)} + j_{n,\phi}^{(p)} - j_{p,\phi}^{(p)} + j_{p,\phi}^{(n)} \quad (2.3)$$

Мувозанат ҳолатдаги асосий бўлмаган заряд ташувчилар токлари ўзининг қийматини сақлаб қолади:

$$j_{n,\phi}^{(p)} = j_n^{(n)} = j_n^{(p)} = j_{ns}; \quad j_{p,\phi}^{(n)} = j_p^{(p)} = j_n^{(p)} = j_{ps} \quad (2.4)$$

Бироқ, потенциал тўсиқ пасайиши туфайли p-n -ўтишдан ўтувчи асосий заряд ташувчиларнинг токлари ортади:

$$j_{n,\phi}^{(p)} = j_{ns} \exp\left(\frac{eV}{k_0T}\right); \quad j_{n,\phi}^{(p)} = j_{ps} \exp\left(\frac{eV}{k_0T}\right). \quad (2.5)$$

Тўла тўйиниш ток зичлиги $j_s = j_{ns} + j_{ps}$ бўлишини эътиборга олсак ва (2.5) ни (2.3) га қўйсак:

$$j = j_s \left(e^{\frac{eV}{k_0T}} - 1 \right) - j_\phi. \quad (2.6)$$

Тўла фототок қуйидагига тенг бўлади:

$$I = jS_{p-n} = I_s \left(e^{\frac{eV}{k_0T}} - 1 \right) - I_\phi, \quad (2.7)$$

бундан:

$$V = \frac{k_0T}{e} \ln \left(1 + \frac{I_\phi + I}{I_s} \right). \quad (2.8)$$

(2.8) тенглама ҳар қандай режим учун фото элемент тенгламасидир (2.3, б-расм).

а) б)
 2.3-расм. Юпқа p-n – ўтишли фотоэлемент (а) ва
 фотодиоднинг вольт-ампер характеристикаси (б)

Занжир узук бўлган ҳолда ($I = 0, R = \infty$) да $V = V_{\phi, \text{ЭЮК}}$ бўлади:

$$V_{\phi, \text{ЭЮК}} = \frac{k_0T}{e} \ln \left(1 + \frac{I_\phi}{I_s} \right)$$

Қандайдир R қаршилиқ уланган ҳолда (2.8) ифода $V_R = \frac{k_0T}{e} \ln \left(1 + \frac{I_\phi - I_R}{I_s} \right)$ кўринишни олади, бунда $I_R = \frac{V_R}{R}$.

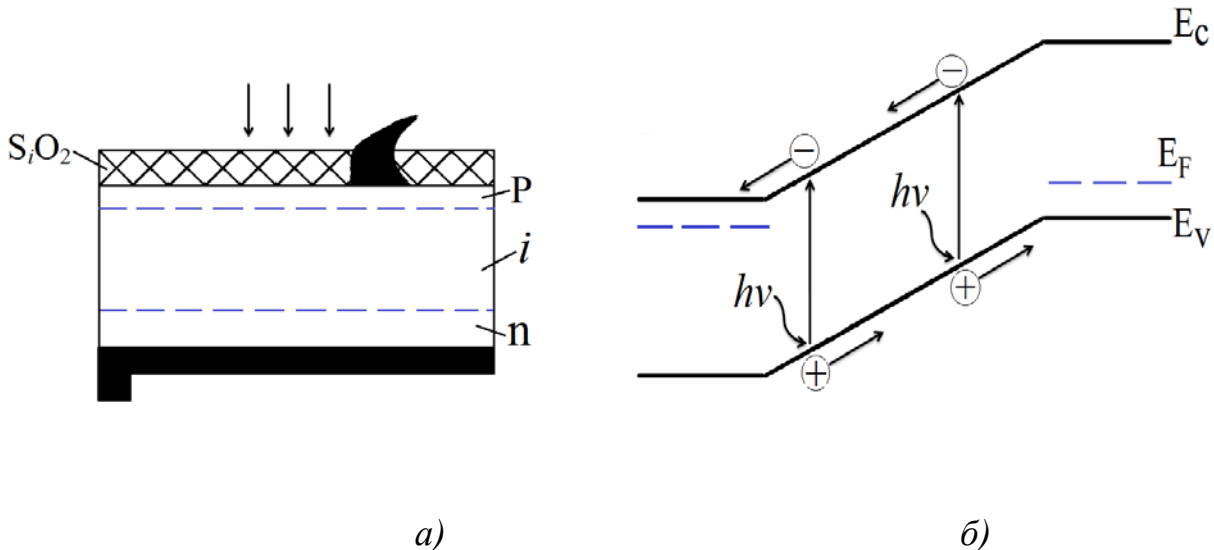
Қисқа туташув ҳолида $R = 0, V = 0, I = I_{\text{к.т.}} = I_\phi$. p-n- ўтишнинг бу иш режимини вентиль фотоэлемент режими дейилади. Вентиль режимида ёруғлик энергиясини электр энергиясига айлантиришда ва кичик энергетикада фойдаланилади.

$p - i - n$ - структураларда фотоэффект. Кичик солиштира қаршиликли p - ва n - типли соҳалар орасида қаршилиги хусусий солиштира қаршиликка яқин бўлган i -типли қатлам ҳосил қилинса, у ҳолда p - i - n диод ҳосил

бўлади. 2.4, а-расмда $p-i-n$ фотодиод тузилиши тасвирланган. p^+-i-n структурали фотодиод n^+ -тагликдан, кучсиз лигерланган i -қатламдан ва юпка (қалинлиги 0,3 мкм гача) p^+ -қатламдан иборат. Бу структурага тескари кучланиш берилганда бутун i -қатлам заряд ташувчилардан қамбағаллашади. Бунда структуранинг электр сиғими камаяди, ёруғлик ютадиган соҳа кенгая-ди ва сезгирлик ортади. Тушаётган ёруғликда фотоннинг энергияси $h\nu \geq E_g$ бўлганда ёруғлик Бугер-Ламберт қонуни бўйича ютилади ва электрон ковак жуфтларини вужудга келтиради. Бу заряд ташувчилар қамбағаллашган қатламнинг электр майдонида тезлашади.

i -қатлам қалинлиги ёруғлик ютилиш чуқурлигидан каттароқ қилинади. Тўлқин узунлиги 0,8 мкм бўлган ёруғликни кремнийда ютилиш чуқурлиги 10-20 мкм, етарлича кенг қамбағаллашган қатлам ҳосил қилиш учун эса 10-20 В чамасида ишчи кучланиш зарур бўлади. [74 ; 261 б., 83; 219-229 б.]

Энди p^+-i-n^+ диоддан ўтадиган фототокни ҳисобланса, юқорида айтилганлар асосида p^+ -қатламда пайдо қилинган номувозанат ҳолатдаги заряд



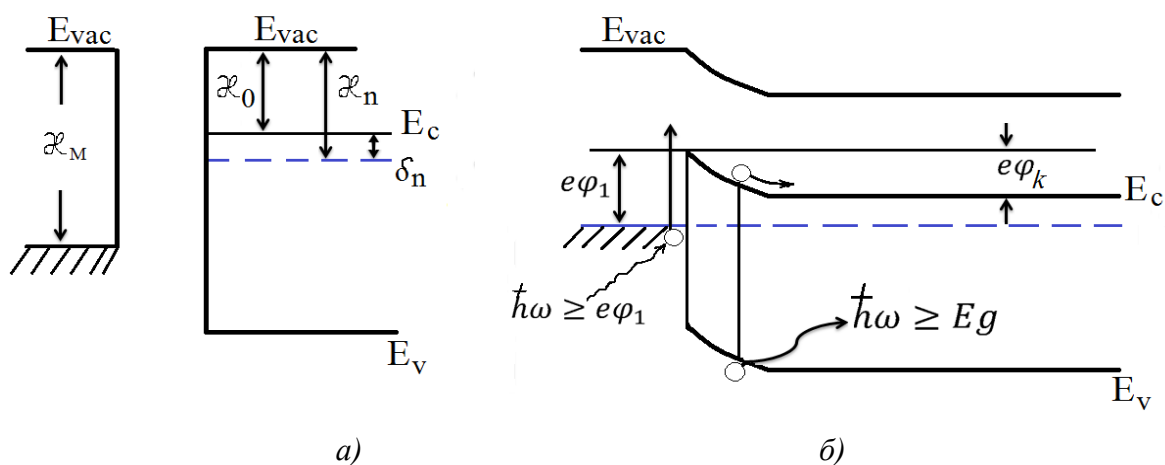
2.4-расм. Рўпарасидан ёритилган кремний $p-i-n$ фотодиод (а) ҳамда тескари кучланиш берилган $p-i-n$ диоднинг (б) энергетик зоналар диаграммаси.

ташувчиларни фототокка қўшадиган ҳиссасини эътиборга олмаймиз. Бунда ёруғлик p^+ -қатламда кучсизланмасдан ўтиб, ҳажмий зарядли i - соҳага тушади, бу ерда вужудга келган электрон ковак жуфтларни электр майдон тўла ажратиб

юборади, оқибатда турли ишорали заряд ташувчилар бир-биридан мустақил равишда ҳаракат қиладилар (2.4 б-расм).

Ҳажмий заряд соҳаси (i -соҳа) калинлигини d_i билан белгилаймиз. У ҳолда ажратилган ташувчилар ҳосил қиладиган фототок зичлигига юқорида келтирилган фор-мулалардан деярли фарқ қилмайди ва демак $p^+ - i - n^+$ диоднинг бирлик сиртга тўғри келган фототоки дрейф ва диффузион тоқларни йиғиндисиغا тенг бўлар экан.

Шоттки диодларда фотоэффект. Метални сиртига вакуумда яримўт-



2.5-расм. Металл ва яримўтказгичнинг контаклашишдан олдинги энергетик зоналар диаграммалари (а) металл ва яримўтказгич контаклашганда ҳамда кучланиш бўлмаганда Шоттки потенциал тўсиғининг пайдо бўлиши (б)

казгич ўстирилганда (улар орасида оксид қатлам йўқ бўлганда) яримўтказгич ва металл оралиғи 10^{-7} см чамасида бўлади. Агар n -типли яримўтазгичдаги электроннинг чиқиш иши металлникидан кичик бўлса (2.5 а расм), бу ҳолда контакт орқали электронлар яримўтказгичдан металлга ўтади ва унинг сиртини манфий зарядлайди. Яримўтказгичнинг контакт яқинидаги қатламдан электронлар кетиб қолиши оқибатида бу қатламда донор ионларидан иборат мусбат ҳажмий заряд пайдо бўлади, яримўтказгичнинг контактлашган сирти мусбат зарядланиб қолади. Яримўтказгичлардаги ҳажмий заряд қатлами анча катта бўлиши мумкин. Контакт қатламида электр майдон вужудга келади ва электронларни жойидан кетказади. Оқибатда яримўтказгич контактлашган сиртидан ҳажми томонга энергия сатҳлари пасаяди (2.5.б-расм).

Бу жараён то металл-яримўтказгич системасида умумий Ферми сатҳи ўрнашиб олгунча давом этади. Бу ҳолда контакт орқали ўтувчи ток нолга тенг бўлади, яъни динамик мувозанат ўрнашади. Контакт қатламдаги ҳажмий заряднинг электр майдони яримўтказгичдан металл томонга ҳаракатланаётган электронлар учун потенциал тўсиқ ҳосил қилади, унинг баландлиги

$$e\varphi_k = \chi_M - \chi_n \quad (2.9)$$

Электронларнинг металлдан яримўтказгич томонга йўналган оқими учун потенциал тўсиқ баландлиги

$$e\varphi_1 = \chi_M - \chi_{n0} \quad (2.10)$$

бўлади, бу ерда χ_{n0} - яримўтказгич электрон яқинлик (сродство) энергияси (электронни E_C - сатҳдан вакуумга чиқариш учун лозим бўлган энергия).

Контактга U_T ташқи тўғри кучланиш берилганда потенциал тўсиқ пасаяди, аксинча, тескари кучланиш берилганда кўтарилади; умуман:

$$e\varphi(U_T) = e(\varphi_k \pm U_T) \quad (2.11)$$

Тўғри ва тескари кучланиш берилган ҳолларда, тақрибан, металлдан яримўтказгич томонга ҳаракатланаётган электронлар учун потенциал тўсиқ баландлиги $e\varphi_1$ ўзгармайди деб ҳисобласа бўлади. Бинобарин, бу металлдан яримўтказгичга электронлар оқими илгаригидай (мувозанат ҳолатдагидай) қолади. Аммо, яримўтказгичда металл томонга йўналган электронлар оқими эса потенциал тўсиқ баландлиги $e\varphi(U_T)$ га муҳим даражада боғлиқ. Тўғри кучланиш берилганда (манбанинг мусбат кутби металлга, манфий кутби яримўтказгичга уланганда) ташқи манба ҳосил қилган майдон контактнинг ички контакт майдонига қарши йўналган бўлади ва натижавий майдон кичраяди, бинобарин потенциал тўсиқ пасаяди, контакт яқинида

электронлар концентрацияси ошади, электронларнинг металл томонга оқими ортади, натижада металлдан яримўтказгич томонга тўғри ток ўта бошлайди.

Шоттки тўсиқли структураларда фототок икки ҳодиса (эффектга) боғлиқ: булар-яримўтказгичда хусусий ютилиш ва металлда яримўтказгич томонга фотоэмиссиясидир. Хусусий фотоэффектнинг узун тўлқинли чегарасини яримўтказгичнинг кенглиги белгилайди, металлдан фотоэмиссия учун узун тўлқинли чегарани эса тақиқланган зонадан кичик бўлган, металл томондаги яримўтказгич чегарасининг потенциал тўсиғи баландлиги аниқ-лайди (2.6-расм). [75 ; 296-297 б., 83; 224-229 б.]

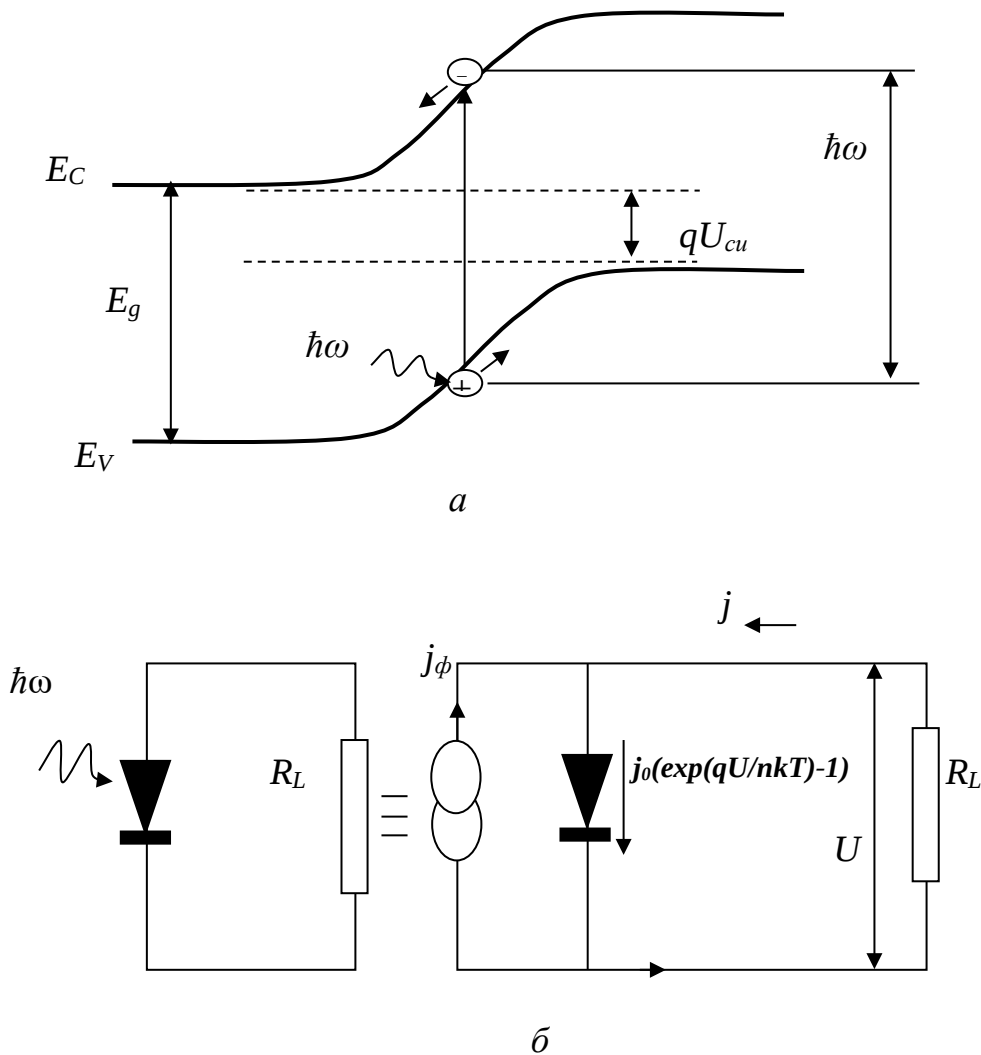
Шоттки тўсиқли структуралардан қуёш энергиясини электр энергиясига айлантиришда ва ёруғлик оқими датчиклари сифатида фойда-ланиш мумкин. Бу структуралардаги фототокни аниқловчи тенгламаларни умумий кўриниши ҳам юқорида келтирилган тенгламалардан деярли фарқ қилмайди.

1.5. Қуёш элементларининг асосий фотогальваник характеристикалари

Нурланишни электр энергиясига фотоэлектрик айлантиришнинг асосий принципи яримўтказгич томонидан фотонлар ютилганида электрон-ковак жуфтларини генерациялаш, уларни ажратиш ва фотогенерацияланган заряд ташувчиларни тўплашдан иборат. Бундай ҳодисаларнинг кетма-кетлиги ток ва кучланиш пайдо бўлишига олиб келади ва натижада электр энергияси ҳосил бўлади.

ҚЭ сифатини белгиловчи энг муҳим фотогальваник характеристика айлантиришнинг ФИК (самарадорлиги) ҳисобланади. Бу параметр ҚЭ идан чиқаётган электр қувватини тушаётган оптик нурланишнинг қувватига нисбати билан аниқланади. Чикиш қуввати юкланишга боғлиқ бўлади аммо, ҚЭ нинг ФИК ни аниқлаш учун эффектив чикиш қувватининг қийматидан (оптималлашган юкламада) фойдаланилади.

Кристалл яримўтказгичлар асосида тайёрланадиган ҚЭ лари (масалан гомо ($p-n$) ўтиш) фақат битта характерли энергия E_g таъқиқ зонанинг кенглигига эга. Энергияси E_g дан кичик бўлган фотонлар элементнинг чиқиш қувватига улуш бермайди. Энергияси E_g дан катта бўлган, ҳар бир фотон чиқиш қувватига E_g га тенг бўлган улуш беради. Фотонлар энергиясининг



1.2-расм. $p-n$ ўтишли ҚЭ нинг энергетик зона диаграммаси (а) ва эквивалент схемаси (б). j_ϕ -фототок зичлиги, j_0 -диоднинг қоронғуликдаги тўйиниш токи зичлиги, R_L - юкланиш қаршилиги.

бошқа қисми эса иссиқликка айланади ёки ҚЭ дан чиқиб кетади. Айлантиришнинг самарадорлигини (ёки идеал ФИК ни) аниқлаш учун ёритилаётган $p-n$ ўтишнинг энергетик зона диаграммасини қараб чиқамиз (1.2- а расм). Идеал ВАХ ни ҚЭ нинг эквивалент схемаси (1.2- б расмда) кўрсатилган, бу расмда $p-n$ ўтишга паралел қилиб ўзгармас ток манбаи киритилган бўлиб у қуёш

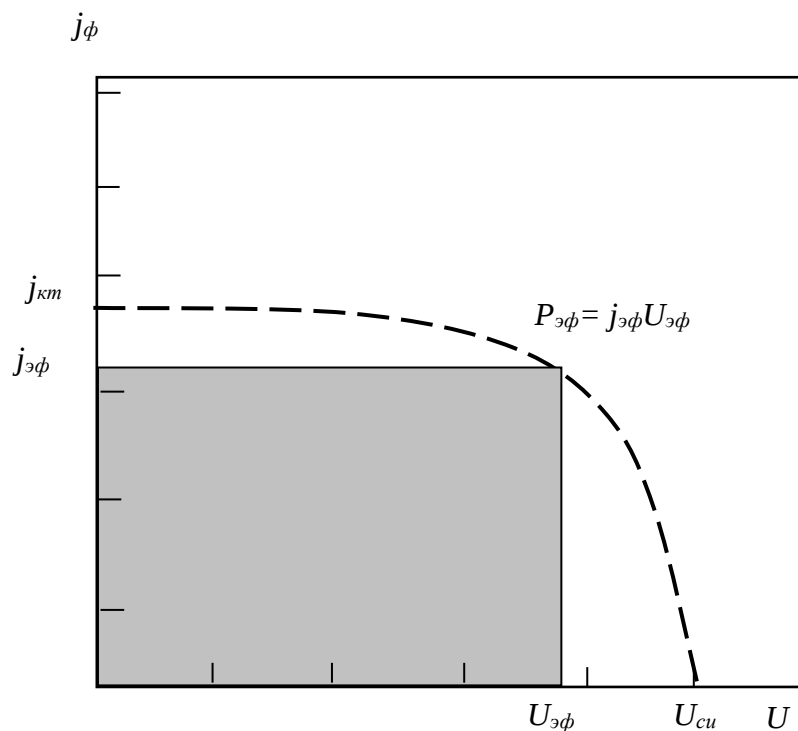
нурланиши томондан мувозанатсиз заряд ташувчиларни қўзғалишини таъминлайди.

Бундан элементни занжиридаги фототок зичлиги ушбу ифода билан аниқланади [15; 395-409 б., 98; 8-10 б.]

$$j_{\phi} = j_0 \left(\exp \left(\frac{qU}{n'kT} \right) - 1 \right) - j_{\kappa m}. \quad (1.4)$$

Бу ерда q -электрон заряди, k -Больцман доимийси, j_0 -диоднинг қоронғуликдаги тўйиниш токи зичлиги, n' - ҚЭ фотоВАХ ининг сифат коэффициент, U - кучланиш, T - абсолют ҳарорат, $j_{\kappa m}$ - қисқа туташув токи зичлиги.

Одатда ҚЭ нинг тўртинчи чоракдан ўтаётган фотоВАХ ни 1.3-расмда кўрсатилгандай тасвирланади.



1.3-расм. ҚЭ нинг тўртинчи чорак қисмидаги фотовольт-ампер характеристикаси.

Бу характеристикадан ҚЭ нинг қуйидаги асо-сий фотогальваник характеристикаларини аниқлаш мумкин.

- Қисқа туташув токи зичлиги $j_{\kappa m} = \left| j_{\phi(U=0)} \right|.$

- Салт ишлаш кучланиши $U_{cu} = \left| U_{(j_{\phi}=0)} \right|.$
- Юза бирлигидан чикувчи максимал кувват $P_{\varepsilon\phi} = j_{\varepsilon\phi} \cdot U_{\varepsilon\phi}.$
- ФотоВАХ нинг тўлдириш коэффициенти $ff = \frac{P_{\varepsilon\phi}}{j_{\kappa m} \cdot U_{cu}}$

Айлантиришнинг ФИК и самарадорлиги ҚЭ нинг эффектив чиқиш куввати зичлигини тушаётган оптик нурланишни куввати зичлигига нисбатига тенг бўлади.

$$\eta = \frac{P_m}{P_0} = \frac{j_{\varepsilon\phi} U_{\varepsilon\phi}}{P_0} = ff \frac{j_{\kappa m} U_{cu}}{P_0} \quad (1.5)$$

Бу ерда P_0 –ҚЭ нинг бирлик юзасига 1 сек да тушётган куёш радиацияси энергияси. (1.4) да $j_{\kappa m} \gg j_0$ шарт бажарилганда

$$U_{cu} = \frac{n'kT}{q} \ln \left(\frac{j_{\kappa m}}{j_0} + 1 \right) \approx \frac{n'kT}{q} \ln \left(\frac{j_{\kappa m}}{j_0} \right). \quad (1.6)$$

[15; 315-317 б.] ишда ҚЭ ларининг асосий фотогальваник характеристикалари учун қуйидаги ифодаalar олинган: қисқа туташув токи зичлиги учун

$$j_{\kappa m} = j_{\kappa m}(E_g) = q \int_{\hbar\omega=E_g}^{\infty} \left(\frac{dn_{ph}}{d\hbar\omega} \right) d(\hbar\omega), \quad (1.7)$$

кучланишнинг эффектив қиймати учун

$$U_{\varepsilon\phi} = \frac{1}{\beta} \ln \left(\frac{\frac{j_{\kappa m}}{j_0} + 1}{1 + \beta U_{\varepsilon\phi}} \right) \approx U_{cu} - \frac{1}{\beta} \ln(1 + \beta U_{\varepsilon\phi}), \quad (1.8)$$

бу ерда $\beta = \frac{q}{n'kT}$. Эффектив ток зичлиги учун эса

$$j_{\varepsilon\phi} = j_0 \beta U_{\varepsilon\phi} \exp(\beta U_{\varepsilon\phi}) \approx \left(1 - \frac{1}{\beta U_{\varepsilon\phi}} \right), \quad (1.9)$$

(1.8) ва (1.9) дан эффектив кувват зичлиги учун

$$P_{\text{эф}} = j_{\text{эф}} U_{\text{эф}} \approx j_{\text{кт}} \left[U_{\text{си}} - \frac{1}{\beta} \ln(1 + \beta U_{\text{эф}}) - \frac{1}{\beta} \right]. \quad (1.10)$$

(1.6-1.10) ифодаларнинг тахлилининг кўрсатишича берилган $j_{\text{кт}}$ да салт ишлаш кучланиши $U_{\text{си}}$, j_0 тўйиниш токи зичлиги камайганида экспоненциал катталашади. $j_{\text{кт}}$ фототок ортиқча, қўшимча заряд ташувчилар томонидан ҳосил қилингани сабабли, уни катталаштириш учун биринчидан актив қатламда ёруғликнинг ютилишини оптик йўқотишларни камайитириш орқали эришилади. Иккинчидан ёруғлик томонидан ҳосил қилинган электрон-ковак жуфтларини p - n ўтиш томонидан тўпланишини самарадорлигини (квант эффективлиги $\eta_{\text{кэ}}$) катталаштириш лозим бўлишини кўрсатади [50; 505-508 б.]. Маълумки, қуёш нурланиши спектрининг параметрлари ҚЭ нинг асосий фотогальваник характеристикаларига кучли таъсир кўрсатади. Қуёш спектри ер сиртининг маълум жойларида жуда кўп факторларга боғлиқ: аниқ географик нуқтага, фаслга, вақтга, об ҳавога ва ҳоказо. Шунинг учун (1.7) дан қисқа туташув токи зичлигини ҳисоблаш мураккаб масала ҳисобланади. Бундан ташқари (1.8)-(1.10) даги кучланиш, ток зичлиги ва қувват зичлик-ларининг эффектив қийматларини фақат тақрибий ҳисоблаш усуллардан фойдаланиб ҳисоблаш мумкин [51; 6879-6889 б., 98; 8-10 б., 99; 984 б.]. Бу эса бу параметрлардан фойдаланиб бажариладиган кейинги ҳисоблашларни қийинлаштиради.

ҚЭ фотогальваник характеристикалари орасидаги боғланишларни ҳисоблашда идеал элемент ва унинг ФИК учун суперпозиция принципи бажарилади деб ҳисобланади. Бу модель қуйидаги шартларда қўлланилиши мумкин.

1. Нурланиш диапазонининг қиймати P_0 дан катта бўлмаганида j_0 нинг U га боғлиқлиги ва $\lg j$ нинг U га боғлиқлик графигининг қиялик бурчаги P_0 нинг ва ёруғлик тўлқини узунлигининг вариацияларида ўзгармайди, бунинг натижасида $\lg j_{\text{кт}}$ нинг $U_{\text{си}}$ га боғлиқлиги эгри чизиғи ва қоронғиликдаги $\lg j$ нинг U га боғлиқликлари устма-уст тушади.

2. Қисқа туташув токи зичлиги ($j_{\kappa m}$) салът ишлаш кучланишининг (U_{cu}) функцияси эмас.

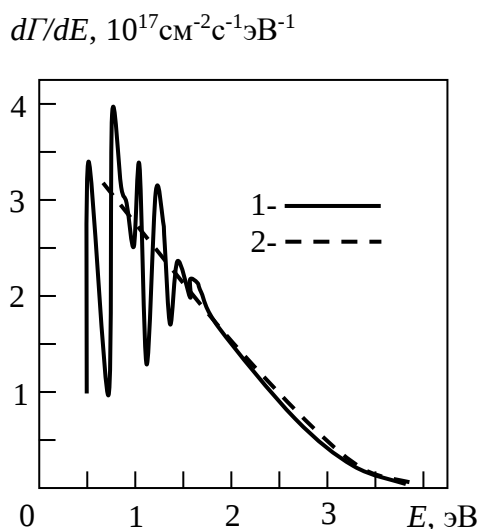
3. $R_{\kappa} \rightarrow 0$ ва $R_{cu} \rightarrow \infty$ яъни, қаршиликларда қувват йўқотилиши содир бўлмайди.

Адабиётларда ишда заряд ташувчиларнинг тўпланиш коэффициенти (η_Q) нурланишнинг функцияси бўлиши ва тўла фототок зичлигини аниқлаш учун $\eta_Q(E)$ (ёки $\eta_Q(\lambda)$) ларни қуёш нурланишидаги фотонлар оқими спектрал зичлигини $d\Gamma/dE$ (ёки $d\Gamma/d\lambda$) ларнинг қўпайтмасини интеграллаб

$$j_L = q \int_0^{\infty} \eta_Q(\lambda) (d\Gamma/d\lambda) d\lambda = q \int_0^{\infty} \eta_Q(E) (d\Gamma/dE) dE \quad (1.11)$$

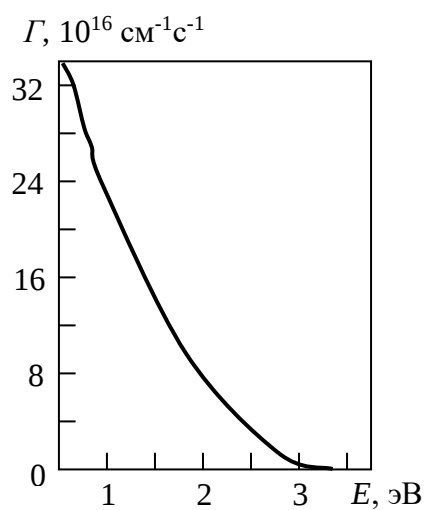
аниқланиши кўрсатилган [10; 6.].

Фотонлар оқими спектрал зичлигининг энергиялар бўйича тақсимоти $AMI,5$ шартларда 1.4- расмда келтирилган.



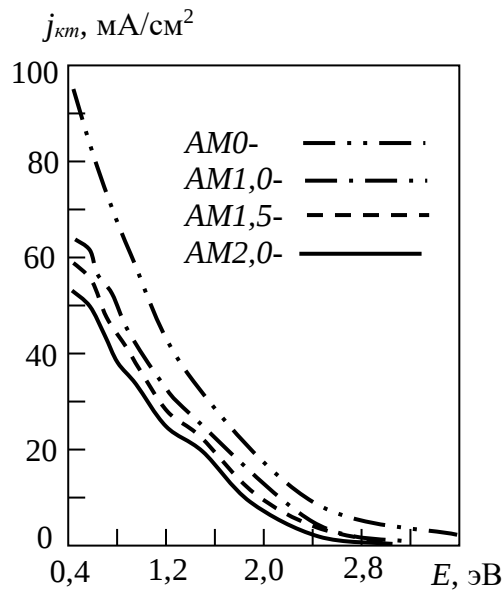
1.4-расм. $AMI,5$ шароитида фотонлар оқими спектрал зичлигининг энергиялар бўйича тақсимоти.

Фотонлар оқими зичлигининг интеграл қийматлари эса 1.5-расмда келтирилган бўлиб, улардан фототок зичлигини аниқлаш учун ҳисоблашларини бажаришда фойдаланилади.



1.5-расм. $AM1,5$ шароитида фотонлар оқими зичлигининг интеграл қийматлари.

Бу тақсимотлардан фойдаланиб аниқланган қисқа туташув токи зичлигини ҚЭ тушаётган фотонларни интенсивлигига боғланиши эса 1.6-расмда келтирилган.



1.6-расм. Қисқа туташув токи зичлигини ҚЭ тушаётган фотонларни интенсивлигига боғланиши.

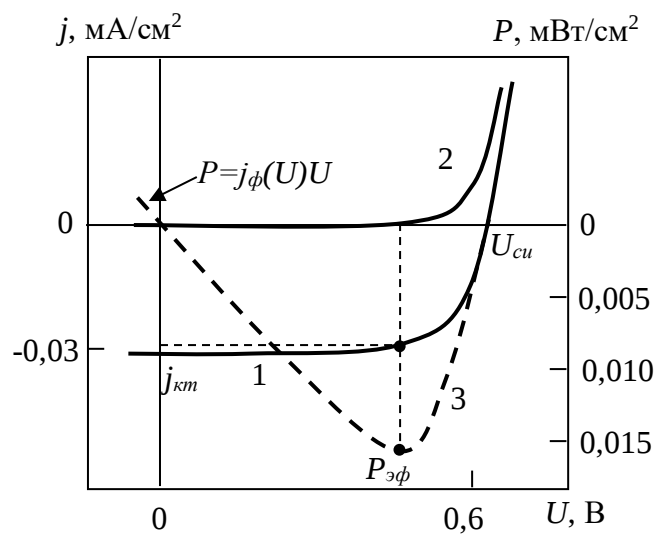
Агар $\eta_Q=1$ деб қабул қилинса

$$j_L \approx q \int_E^{\infty} (d\Gamma / dE) dE \approx -j_{km} \quad (1.12)$$

ҚЭ и ишлаб чиқарадиган солиштирма қувват

$$P=j_{\phi}(U)U \quad (1.13)$$

ифодадан аниқланади (1.7- расм).



1.7-расм. Идеал ҚЭ ларининг фото (1) ва қоронғиликдаги (2) вольт-ампер характеристикалари ҳамда уларни солиштирма қуввати $P=j_{\phi}(U)U$ (3).

Солиштирма қувватни максимал қийма-тини $P_{эф}$ (ёки ff , улар тенг кучли) аниқ топиш мумкин бўлмасада, одатда $j_{\phi}(U)U$ боғланишни оптималлаштириш усули ёрдамида аниқланади [52; 292 б. 100; 285-296 б.]. $P_{эф}$ ни итерация методи билан ихтиёрий даражадаги аниқликда ҳисоб-лаш мумкин. Бунинг учун фотоВАХнинг максимал қувватга $P_{эф} = U_{эф} j_{эф}$ мос келувчи нуқтасига тўғри келувчи ҳосила $dP/dU = 0$ олиб ушбу ифодани олиш мумкин

$$\delta = \left(\frac{j_0}{j_L} \right) \exp \left(\frac{qU_{эф}}{n'kT} \right) = \left[\left(\frac{qU_{эф}}{n'kT} \right) + 1 \right]^{-1}, \quad (1.14)$$

бу ерда $\delta = \ln \left(1 + \frac{j_0}{j_{кт}} \right)$. ҚЭ фотоВАХ сидан фойдаланиб $qU_{эф}(n'kT)$ ни йўқотиш орқали (1.14) тенгламани ўзгартирилса

$$\delta = \left[1 + \ln \left(\frac{\delta j_{кт}}{j_0} \right) \right]^{-1} \quad (1.15)$$

ифода ҳосил бўлади. Бир неча тақрибий ҳисоблашлар ёрдамида δ ни тўртта рақами аҳамиятли бўлган аниқликда топиш мумкин. Юқори сифатли элементлар учун δ нинг қийматлари 0,04 дан то 0,10 гача диапазонда ўзгариб туради. Бевосита δ орқали ифодаланган эффектив қувват зичлиги қуйидаги кўринишга эга

$$P_{эф} = j_{кт} \frac{n'kT}{q} (1-\delta) \ln \left(\delta \frac{j_{кт}}{j_0} \right) = j_{кт} \frac{n'kT}{q} \frac{(1-\delta)^2}{\delta}, \quad (1.16)$$

ВАХ нинг тўлдириш коэффициенти эса $P_{эф}$ ни $j_{кт} U_{cu}$ га бўлиш натижа-сида олинаса, қуйидаги

$$ff = \frac{P_{эф}}{j_{кт} U_{cu}} = (1-\delta) \frac{\ln \left(\frac{\delta j_{кт}}{j_0} \right)}{\ln \left(\frac{j_{кт}}{j_0} \right)} \quad (1.17)$$

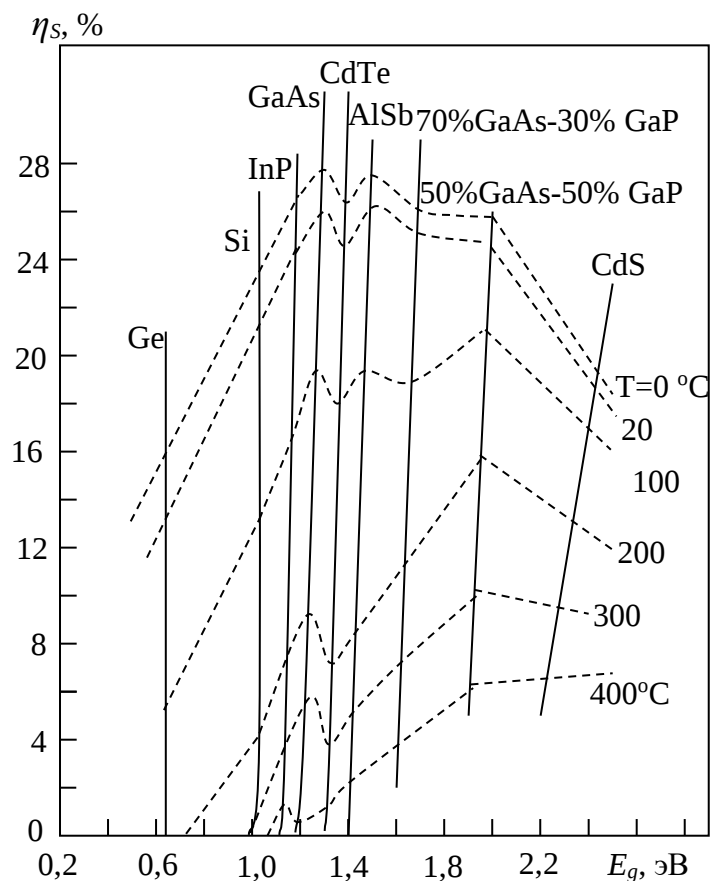
ифода ҳосил бўлади.

Бу муносабатдан идеал ҚЭ ида тўлдириш коэффициенти n' диоднинг ноидеаллик коэффициентининг функцияси эмаслиги келиб чиқади. Бу n' диод коэффициенти бу ҳолда кучланиш шкаласининг масштабини ўзгартирувчи параметр деб қараш мумкин (кетма-кет ва шунт қаршилиқ-ларни таъсири натижасида ff ни n' га кучсиз боғланиши кузатилади, бу R_k нинг нолга тенг бўлмаган қийматлари учун назарий усулда ўрганилган [53; 6.499-505, 54; 6.91-96, 55; 164-167 б.]). Бундан ташқари [4; 6.133-140, 11; 125 б., 23; 6.133-138] ишда $P_{эф}$ n' га тўғри пропорционал бўлиши ва $R_k=0$ бўлган ҳол учун ff ни бошқа параметрлардаги қуйидаги формуласи олинган:

$$ff \approx \left[1 - \frac{1}{\ln\left(\frac{j_{km}}{j_0}\right)} \right] \left\{ 1 - \frac{\ln\left[\ln\left(\frac{j_{km}}{j_0}\right)\right]}{\ln\left(\frac{j_{km}}{j_0}\right)} \right\}. \quad (1.18)$$

Фотогальваник характеристикалар орасидаги ўзаро боғланишларни таҳлил этиб $P_{эф}$ ни катталаштиришнинг энг самарали усули бу n' ни катталаштириш ёки j_0 ни камайитириш керак деган хулосага келиш мумкин. Бироқ n' катталашганида j_0 деярли экспоненциал ортиб боради (1.16) ёрдамида ҳисобланган $P_{эф}$ ни доимий қийматлари эгри чизиқлари бу ўзаро боғлиқлик-ни ҳамда, $P_{эф}$ нинг чегаравий юқори қийматларини олиш мураккаб масала эканлигини кўрсатади.

Элементларнинг фотоэлектрик хоссаларини таҳлили ФИК нинг максимал назарий қийматларига нисбатан умумий фикрлар айтилмаса тўла бўлмайди [56; 1-19 б. 101; 112-119 б., 102; 83-90 б.]. Гомоўтишли ҚЭ лари ФИК ни назарий қиймати билан яримўтказгичларнинг таъқиқ зонасининг кенглиги орасидаги муносабат бир неча тадқиқодчилар томонидан масалан [57; 63-67, 58; 115-117 б.] томонидан аниқланган. Улар бу ишларда хоссалари идеалга



1.8-расм. Идеал ҚЭ нинг фойдали иш коэффициентиға таъқиқ зонанинг энергетик кенглиги ва температурани таъсири.

яқин бўлган материалларни ва ўтишларнинг идеаллаштирилган моделларини кўриб чиққанлар. ФИК нинг тахмин этилган қийматлари ўзгарувчилар қийматида танланган параметрларга маълум меъёردа боғлиқ бўлсада эгри чизиқларнинг максимуми 1,4-1,5 эВ энергиялар яқинида жойлашган бўлиши 1.8-расмда кўрсатилган.

Бу максимумни ўрни ҳароратга боғлиқ бўлиб, у юқори ҳароратларда таъқиқ зона кенглигининг катта қийматлари соҳасига силжий-ди. Максимумнинг мавжудлиги қуёш нурланишидан фойдали ютилган фотонлар миқдори билан (E_g камайиши билан ортувчи) диоднинг термик активлашган тўғри токи баланслашуви натижасидир яъни, термик актив-лашган диоднинг тўғри токи E_g ортганда камаяди ва U_{cu} ортишига олиб келади.

Кремнийли қуёш эламентларининг ФИК ни назарий ҳисоблаш адабиётларда тадқиқодчилар томонидан амалга оширилган. Бундан ташқари томонидан асосий бўлмаган заряд ташувчилар яшаш вақтининг ўзгариши Si асосли ҚЭ ларини η_Q , ff , U_{cu} , η_s ларга таъсирини тадқиқ этилган [10; 392-423 б. 11; 121-143 б., 59; 178-246 б.].

Гетероўтишли ҚЭ ларини (1.1-в расм.) ФИК ни назарий аниқлаш заряд ташувчиларнинг кўчиш механизмлари ҳақидаги маълумотларни камлигидан қийинчилик туғдиради. Жуда кўп турдаги гетероўтишларда рекомбинация-генерация жараёнлари (қамбағаллашган қатламда) устивор бўлади [60; 605-910 б.], аммо бу ҳолда заряд ташувчиларнинг кўчиш ажралиш чегара-сидаги, энергия зоналарининг чегараларидаги ва туннелланишлар таъсирида шунчалик ўзгариши мумкинки, бу ўзгаришлар j_0 ва n' ларнинг қийматларини аввалдан белгилаш имконияти йўқлигини кўрсатади.

ФИК нинг аввалдан айтиб бериладиган қийматлари материаллар ва асбобларнинг хоссаларига ниҳоятда боғлиқ бўлгани учун унинг назарий чегаравий қийматини энг умумий принциплардан келиб чиқиб [61; 937-948 б.] томонидан батафсил мувозанат принципи асосида абсолют қора жисм деб

$$P_{эф} = j_{км} \frac{n'kT}{q} (1 - \delta) \ln \left(\delta \frac{j_{км}}{j_0} \right) = j_{км} \frac{n'kT}{q} \frac{(1 - \delta)^2}{\delta}, \quad (1.16)$$

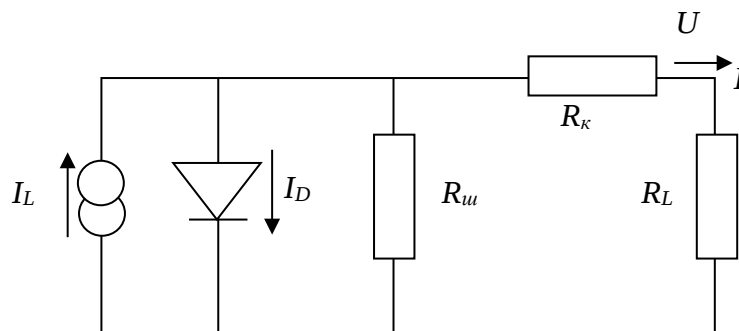
ҳисобланган қуёш ва ҚЭ дан иборат системада нурланишлар оқимини қаралаётганда ҳамда, ҳар бир $\hbar\omega > E_g$ энергияли фотон $U = E_g / q$ кучланишда q бирлик заряд ҳосил қилади деб қуёш ёруғлигининг концентрация коэффиценти бирга тенг бўлганда ФИК 30 % тенг бўлиши аниқланган [62; 93-98 б.].

Карно цикли бўйича ФИК ни олиш учун зарурий шартларни ҳисобга олган ҳолда [9; 6.273-289, 63; 1115 б.] томонидан салът ишлаш кучланишини топилган

$$U_{cu} = \frac{E_g}{q} \left(1 - \frac{T_c}{T_r}\right). \quad (1.19)$$

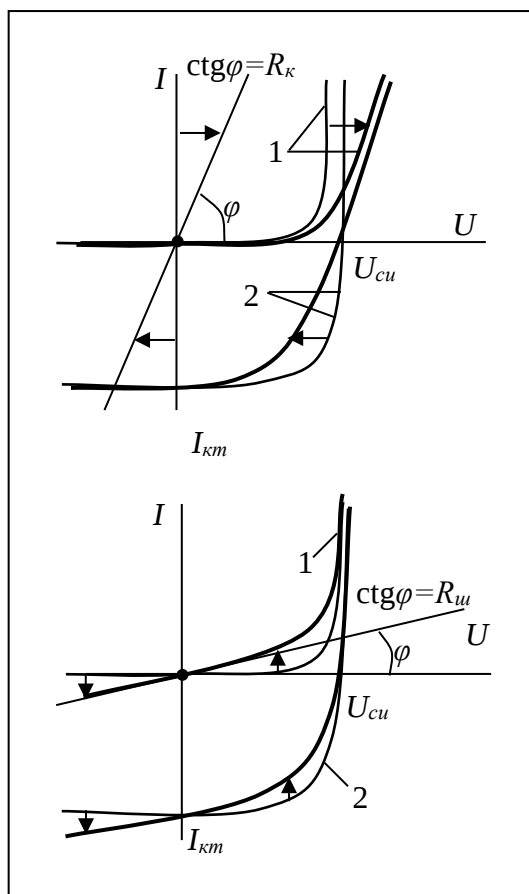
Бу ерда T_c –ҚЭ и ҳарорати T_r - ҚЭ ига тушаётган нурланишни чиқа-рувчи жисм ҳарорати (куёш). Бу муносабатга мувофиқ кремнийли ҚЭ и учун $U_{cu} = 1,07$ В га тенг.

Маълумки, исталган реал ҚЭ ида қувват йўқотишлари мавжуд, чунки $R_k > 0$ ва $R_{ш} < \infty$. Биз R_k ва $R_{ш}$ ларнинг эквивалент схемага киритиш етарли (1.9-расм).



1.9-расм. ҚЭ эквивалент схемасига кетма-кет R_k ва шунт $R_{ш}$ қаршиликларни киритилиши.

Жамланган кетма-кет R_k қаршиликларни таъсирини 1.10-расмда келтирилган.



1.10-расм. ҚЭ фотоВАХ сига кетма-кет R_k ва шунт қаршиликларни таъсири. 1-қоронғиликдаги ва 2-ёруғликдаги ВАХ лар.

Бу расмда график шаклда кучланишларни суммалаш кўрсатилган (бир хил токларда). Ундан ташқари бу расмда R_k га тенг бўлган қиялик бурчагининг котангенси ёрдамида R_k нинг қийматини топишга имкон берув-чи чизма кўрсатилган.

R_k ни ҳисобга олинганда U_{cu} ўзгармайди қисқа туташув токи эса R_k нинг жуда кичик қийматларида эътиборга олмайдиган даражада ўзгармайди. R_k катталашганда эса элементнинг характеристикаси $\text{ctg} \varphi = R_k$ тўғри чизикқа интилади ва ff 0,25 га яқинлашади. Жамланган $R_{ш}$ қаршиликнинг таъсири бир хил кучланишлардаги токни суммалаш билан аниқланади, бу токлар элементнинг ВАХ сидан шунт қаршилик ноль бўлганда $\text{ctg} \varphi = R_{ш}$ ли тўғри чизик билан аниқланади. Бу ҳолда кўринадики, қисқа туташув токи доимий қийматини сақлайди салт ишлаш кучланиши эса бир оз ўзгариши мумкин.

R_k ва $R_{ш}$ ни ҳисобга олган ҳолдаги элементнинг ВАХ си қуйидаги кўринишда бўлади

$$I = I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(U - IR_k)}{n'kT} \right] - 1 \right\} + \frac{U - IR_k}{R_{ш}} - I_L \quad (1.20)$$

$R_k > 0$ бўлганда суперпозиция принципи тўғрилиги бузилади ва ёруғликдаги ВАХ ни қоронғуликдаги эгри чизиқни оддийгина силжитиш билан олиб бўлмайди. (3.1) да киритилган β параметрдан фойдаланиб жамланган параметрли элемент моделининг η_s ва ff ларни аниқлаш учун аниқ ифодани олиш мумкин [64; 501-512 б., 65; 670 б.]. Фақат R_k ни ҳисобга олинганда

$$\beta = \left[1 + \frac{1}{2R_k j_L' \beta \frac{q}{n'kT}} \ln \left(\frac{\beta j_L'}{j_0} \right) \right]^{-1} \quad (1.21)$$

$P_{эф}$ ва ff лар эса қуйидаги кўринишларда ёзилади

$$P_{эф} = \frac{n'kT}{q} j_L' (1 - \beta) \ln \left(\frac{\beta j_L'}{j_0} \right) + R_{ш} j_L'^2 (1 - \beta)^2; \quad (1.22)$$

$$ff = \frac{P_{эф}}{j_{кт} \frac{n'kT}{q} \ln \frac{j_L'}{j_0}}. \quad (1.23)$$

$j_{кт}$ катталиқ (1.23) нинг маҳражида бўлиши керак, чунки кетма-кет қаршилик катта бўлганда j_L ва $j_{кт}$ лар бир-биридан фарқ қилиши мумкин. j_L ни ҳам фақат тақрибий ҳисоблаш усуллари ёрдамида аниқланади [66; 221-231 б., 67; 5459-5471 б., 68; 444-461 б., 69; 134-137 б.].

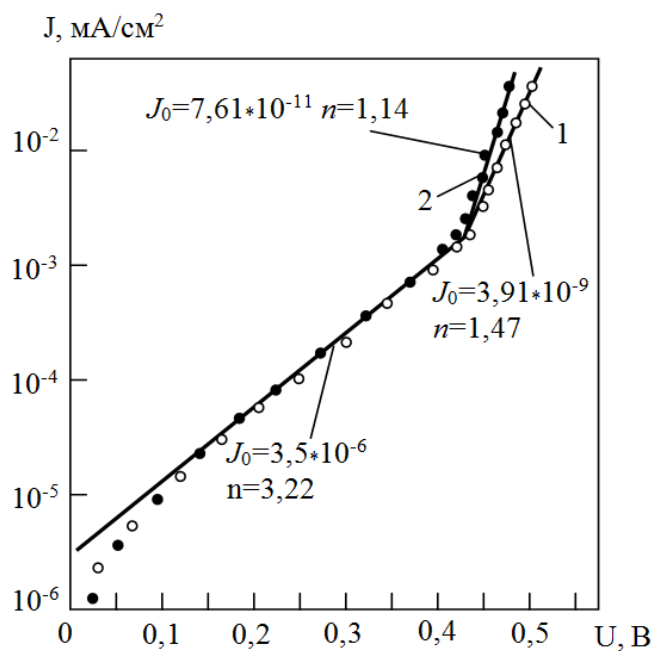
Юқоридаги ҚЭ ларининг фотогальваник характеристикалари учун келтирилган барча формулалардан кўриш мумкинки, бу параметрларни барчаси ҳароратга боғлиқ бўлар экан. Шунинг учун ушбу ишда ҚЭ ларининг асосий фотогальваник характеристикаларни ҳароратга боғланишини тадқиқ қилиш кўзда тутилган.

II БОБ. ҚУЁШ ЭЛЕМЕНТЛАРИНИНГ ФОТОГАЛЬВАНИК ХАРАКТЕРИСТИКАЛАРИНИ ХАРОРАТГА БОҒЛАНИШИ

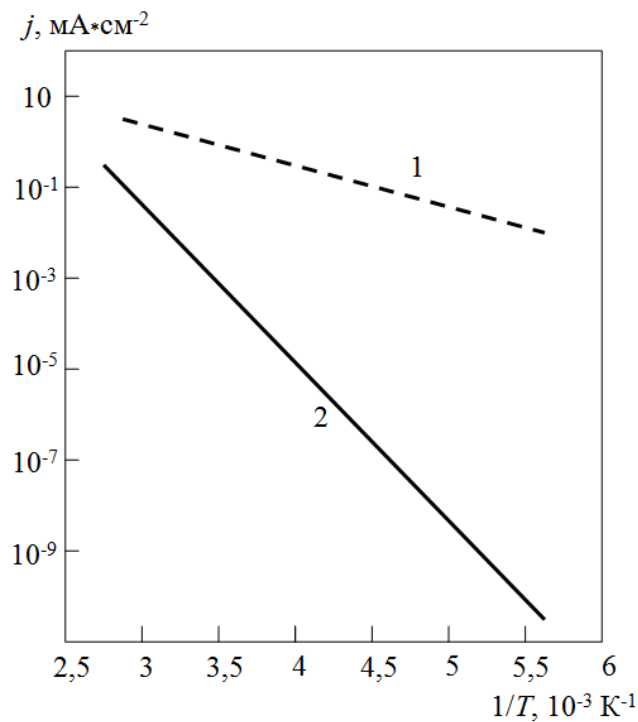
§2.1. Қуёш элементларини тўйиниш ва қисқа туташув токи

§2.2. Қуёш элементлари қисқа туташув токи зичлигининг хароратга боғланиши

Адабиётларда яримўтказгич асосли ҚЭ ларини фотогальваник ҳарактеристикаларини ҳароратга боғланишини кўрсатувчи тажриба натижалари келтирилган. [10; 256-384 б., 11; 139-143 б.] Улар ҚЭ ларининг қисқа туташув токи зичлиги $t = -100^{\circ}\text{C} \div +100^{\circ}\text{C}$ ораликда ҳароратга кучсиз боғланганлигини кўрсатади. Бундан ташқари эса аморф гидрогенизацияланган кремний ($a\text{-Si:H}$) асосли ҚЭлари учун паст ҳароратларда бу боғланиш кучли бўлишини кўрсатилган. Бу боғланишларни ифодаловчи формулаларни [74;



2.12-расм. Кремний асосли р-п ўтишли қуёш элементларининг қоронғуликдаги
ВАХ (1) ва $J_{\text{кт}}$ ни $U_{\text{си}}$ боғланиши (2). АМ1 ёритилганликда ФИК 13.6 %.



2.13-расмда Шоттки тўсиғили $a\text{-Si:H}$ структуралари учун тўғри йўналишдаги фототокни (1) ва қоронғуликдаги токни (2) температурага боғланиши.

19-22 б.] ишда келтириб чиқарилган. Аммо бу формулалар тажриба натижаларини тўла тушунтира олмаган. ҚЭ ларининг қисқа туташув токи зичлигини юқори ҳароратлардаги ўзгаришлари эса ўрганилмаган. Бу соҳадаги ўзгаришларни ўрганиш аҳамиятга эга эканлигини аморф яримўтказ-гичларда фотоўтказувчанликни ҳароратий сўниш ҳодисаси [15; 315-317 б.] содир бўлишидан ҳам кўриш мумкин.

Буларни ҳисобга олиб, ушбу ишда $a\text{-Si:H}$ асосли ҚЭ ни модел сифатида танлаб, аморф яримўтказгич асосли ҚЭ нинг қисқа туташув токи зичлиги ва салът ишлаш кучланишларини ҳароратга боғланишини аниқловчи тажриба натижаларидан бу боғланишларни формулалари келтириб чиқарилган. Улар ёрдамида тажриба натижалари тушунтирилган. Қисқа туташув токи зичлигининг паст ва юқори ҳароратлардаги ўзгаришлари ўрганилган. Бу параметрни ҚЭ потенциал тўсиғини баландлиги ва фотоВАХ ни ноидеаллик коэффицентига боғланишлари аниқланган.

ҚЭ ларини фотоВАХ ининг ва тўйиниш токи зичлигининг ҳароратга боғланиш формуласидан фойдаланиб [10; 418 б.] да салът ишлаш кучланиши учун

$$U_{cu} = \frac{n'kT}{q} [\ln j_{km} - \ln(q\mu_c N(E_c)E_s)] + n'\varphi \quad (2.21)$$

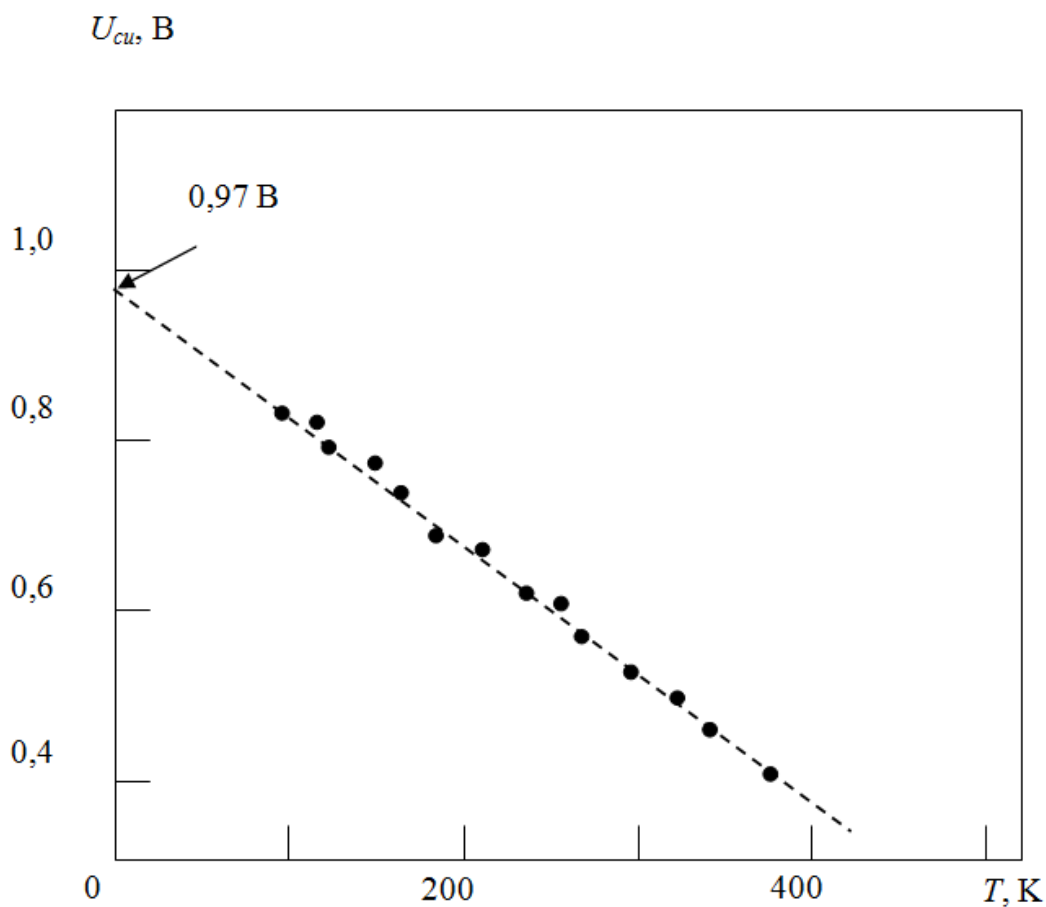
ифода олинган. Бу ердаги n' – фотоВАХ ни ноидеаллик (сифат) коэффиценти, k – Больцман доимийси, μ_c – ўтказувчанлик зонасидаги заряд ташувчиларнинг ҳаракатчанлиги, $N(E_c)$ – ўтказувчанлик зонасидаги электрон ҳолатларини эффектив зичлиги, E_s – ҚЭ сиртидаги электр майдон кучланганлиги, φ – ҚЭ даги потенциал тўсиқнинг баландлиги бўлиб, улар ҳароратга деярли боғлиқ бўлмайди [74; 19-22 б.] аммо уларни қийматларини бевосита ВАХ ўлчаш мумкин эмас, j_{km} – қисқа туташув токи зичлиги, U_{cu} – салът ишлаш кучланиши.

(2.10) формуладан қисқа туташув токи зичлиги ҳароратга кучсиз боғлиқ бўладиган соҳада салът ишлаш кучланишини ҳароратга боғланиши чизиқли бўлиши ва бу чизиқни ҳароратни 0 қийматига экстраполяциясидан $T \approx 0$ да $U_{cu} \approx n'\varphi$ га тенг бўлиши келиб чиқади. Бунини ҳисобга олиб [10; 418 б.] да келтирилган $\alpha\text{-Si:H}$ асосида тайёрланган Шоттки тўсиқли ҚЭ нинг салът ишлаш кучланишини ҳароратга боғланишини кўрсатувчи 2.14-расмда келтирилган тажриба натижаларидан фойдаланиб, $(0, n'\varphi)$ ва (T_0, U_{0cu}) нуқталардан ўтувчи тўғри чизиқ тенгламасини ёзсак

$$U_{cu} = (U_{0cu} - n'\varphi) \frac{T}{T_0} + n'\varphi \quad (2.22)$$

ифодани оламиз. Бу ерда U_{0cu} –хона ҳароратидаги ($T_0 = 300$ К) салът ишлаш кучланиши.

Тўйиниш токи зичлигининг ҳароратга боғланишини [10] келтирилган ифодасидан $T_0 = 300$ К даги тўйиниш токи зичлиги j_{00} га тенг бўлади деб ҳисобланса,



2.14-расм. *a-Si:H* асосли ҚЭ и салт ишлаш кучланишининг температурага боғланишини тажрибадан олинган натижаларидан [10; 418 б.] фойдаланиб потенциал тўсиқ баландлигини аниқлаш.

$$j_0 = j_{00} \exp \left[\frac{q\varphi}{k} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (2.23)$$

ифода ҳосил бўлади [8]. ҚЭ ларини фотоВАХ ининг формуласида

$$j_\phi = j_0 \left[\exp \left(\frac{qU}{n'kT} \right) - 1 \right] - j_{\kappa m}. \quad (2.24)$$

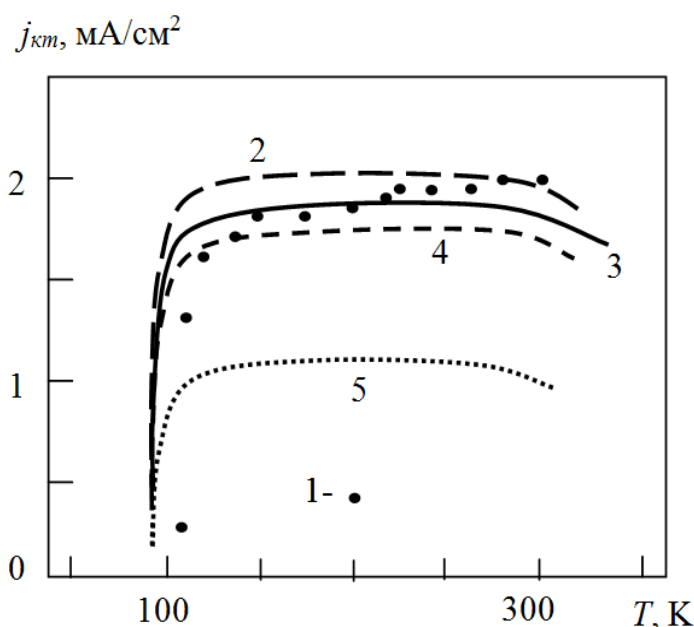
$U=U_{cu}$ бўлганда $j_\phi = 0$ бўлишидан

$$j_{\kappa m} = j_0 \left[\exp \left(\frac{qU_{cu}}{n'kT} \right) - 1 \right] \quad (2.25)$$

тенгликни олиш мумкин. Бунга (2.5) ва (2.6) ларни қўйсак, қисқа туташув токи зичлигини ҳароратга боғланиши учун

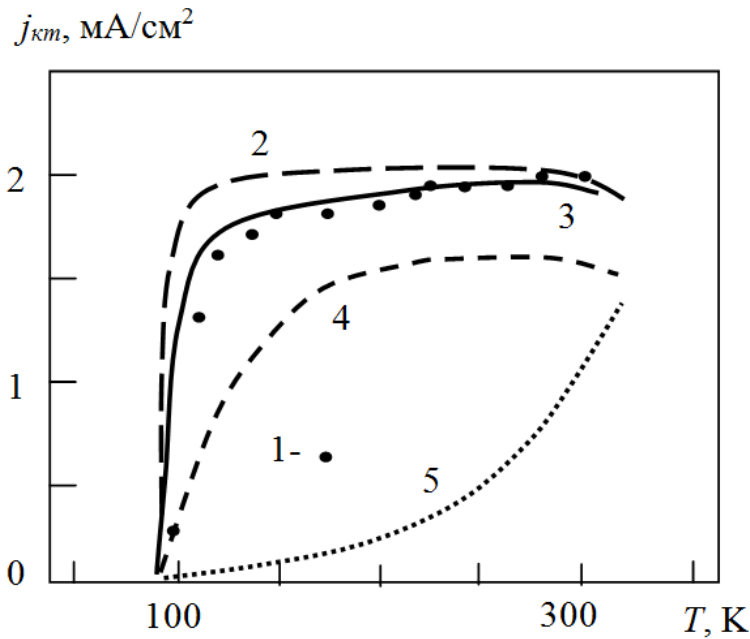
$$j_{kt} = j_{00} \exp \left[\frac{q\varphi}{k} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right] \left[\exp \left[\frac{q\varphi}{n' k T_0} \left(\frac{U_{0cu}}{\varphi} - n' \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) \right) \right] - 1 \right] \quad (2.26)$$

ифода ҳосил бўлади. 2.15-расмда α -Si:H асосида тайёрланган Шоттки тўсиқ-ли ҚЭ нинг қисқа туташув токи зичлигини ҳароратга боғланишини тажрибадан олинган натижаларни келтирилган (илова 1).



2.15-расм. α -Si:H асосли ҚЭ и қисқа туташув токи зичлигининг температурага боғланишини 1-тажрибадан [10.] ва (2.11) формуладаги фотоВАХни сифат коэффицентининг: 2- $n'=1$; 3- $n'=1,006$; 4- $n'=1,01$ ва 5- $n'=1,06$. қийматлари учун олинган ҳисоблаш натижалари.

ининг сифат (ноидеаллик) коэффицентини турли қийматларидаги ҳисоблаш натижалари 2.16- расмда келтирилган. Аморф яримўтказгичлар асосида тайёрланадиган Шоттки тўсиқли ҚЭ ларининг сифат коэффиценти $n' \approx 1,0-1,2$ ораликда ётади. Ҳисоб-лашларни $\varphi=0,97$ В, $U_{cu}=0,31$ В ва $j_{00}=1,28 \cdot 10^{-5}$ А/см² қийматлар учун бажарилган. Расмдан кўринадики, (2.20) формула тажриба натижаларини ҳамма қийматларини тушунтира олмас экан. Агар салът ишлаш кучланишининг ҳароратга боғланишидаги экстро-поляция шартида $T \approx 0$ да $U_{cu} \approx \varphi$ тенглик бажарилади деб ҳисобласак икки нуқтадан



2.16-расм. $a\text{-Si:H}$ асосли ҚЭ и қисқа туташув токи зичлигининг температурага боғланишини 1-тажрибадан [10] ва (2.13) формуладаги фотоВАХни сифат коэффицентининг: 2– $n'=1$; 3– $n'=1,006$; 4– $n'=1,01$ ва 5– $n'=1,06$ қийматлари учун олинган ҳисоблаш натижалари.

Ўтувчи чизиқ тенгламасидан

$$U_{cu} = (U_{0cu} - \varphi) \frac{T}{T_0} + \varphi \quad (2.27)$$

ифодани оламиз. Бу ифода фотоВАХни $U=U_{cu}$ га тенг бўладиган нуқтасида $n'=1$ шарт бажариладиган ҳол учун (2.22) формула билан бир хил маънога эга. (2.22) дан фойдаланиб қисқа туташув токи зичлигини ҳароратга боғланиши ҳисобласак

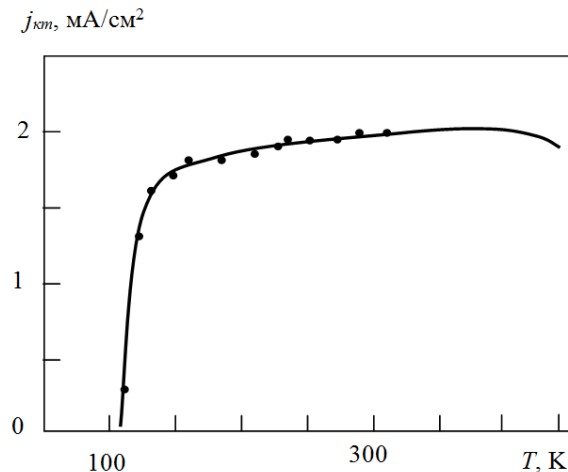
$$j_{km} = j_{00} \exp \left[\frac{q\varphi}{k} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right] \left[\exp \left[\frac{q\varphi}{n'kT_0} \left(\frac{U_{0cu}}{\varphi} - 1 + \frac{T_0}{T} \right) \right] - 1 \right] \quad (2.28)$$

кўринишдаги ифода ҳосил бўлади. 2.17-расмда (2.26) формуладан n' нинг $1 \leq n' \leq 1,1$ ораликдаги турли қийматлари учун олинган ҳисоблаш натижалари келтирилган.

Кўриниб турибдики, ҚЭ потенциал тўсиқ баландлигини салт ишлаш кучланишини экстрополяциясидан аниқланадиган $\varphi=0,97$ В қийма-тида паст ҳароратлардаги тажриба натижаларини тушунтира олмас экан.

Ҳисоблашлар бу боғланиш фотоВАХ нинг сифат коэффициентига жуда куч-ли боғлиқ бўлишини ва $n' > 1,01$ бўлганда (2.11) формуладан ҳисобланган қисқа туташув токи зичлиги тажриба натижаларига умуман мос келмас-лигини кўрсатди.

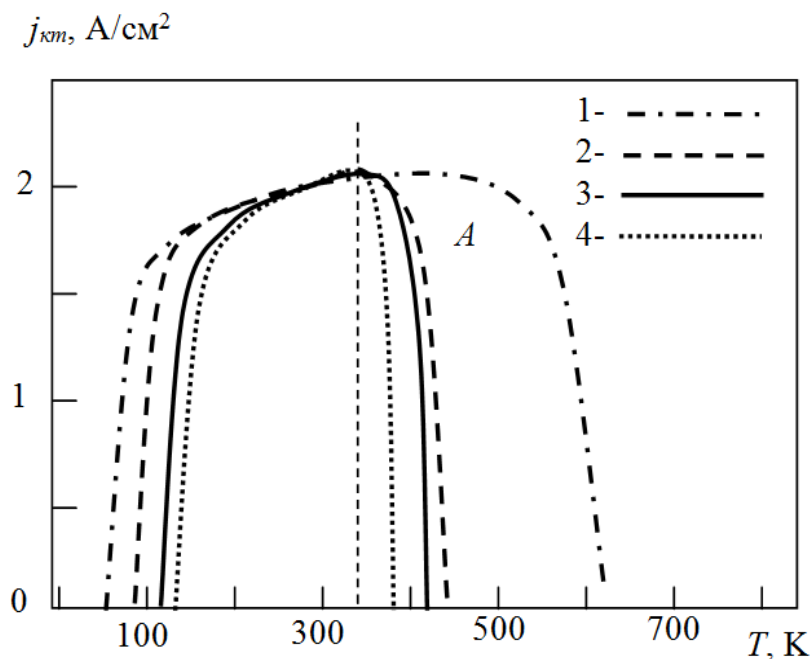
[75] да паст ҳароратларда қисқа туташув токи зичлигини $j_{kt}=0$ қийматга



2.17-расм. *a*-Si:H асосли ҚЭ ини қисқа туташув токи зичлигини температурага боғланишини $n'=1,006$ ва $\phi=1,16$ В қийматлар учун (8) формуладан олинган натижалар.

эга бўладиган ҳарорати ҚЭ потенциал тўсиқ баландлигини ортиб бориши билан ортиши кўрсатилган. Шуни ҳисобга олиб, тажриба натижаларини (2.11) формула ёрдамида тўла тушунтириш учун ҳисоблашлар бажарилди. Улар $n'=1,006$ ва $\phi=1,16$ В бўлганда (2.28) формула ва тажриба натижалари бири-бирига мос келишини кўрсатди (2.17-расм).

Кейинги ҳисоблашлар ҚЭ ларининг қисқа туташув токи зичлигининг қийматлари кучли ўзгаришга учрамайдиган ҳарорат интервали потенциал тўсиқ баландлигига боғлиқ бўлишини кўрсатди. Бу натижалар 2.18-расмда



2.18-расм. $a\text{-Si:H}$ асосли ҚЭ ини қисқа туташув токи зичлигини температурага боғланишини $n'=1,006$ ва $1-\varphi=0,45$ В, $2-\varphi=0,97$ В, $3-\varphi=1,16$ В, $4-\varphi=1,5$ В қийматлар учун (2.13) формуладан олинган натижалар. А-қисқа туташув токи зичлигининг сўниши кузатиладиган соҳа.

келтирилган. Улардан кўринадики, потенциал тўсиқ баландлиги кичиклашиб борганда қисқа туташув токи зичлигининг қийматлари кучли ўзгаришга учрамайдиган ҳарорат интервали ортиб борар экан. Юқори ҳароратларда эса ($T > 360$ К) қисқа туташув токи зичлигини яримўтказгичларнинг фотоўтказувчанлигининг ҳароратий сўнишига ўхшаш (А соҳа) камайиши кузатилади экан.

2.1-жадвалда потенциал тўсиқ баландликларига мос келувчи (2.28) формуладан ҳисобланган критик ҳароратлар келтирилган.

2.1-жадвал

Яримўтказгич асосли қуёш элементларида тақиқланган зона энергетик кенглигини ҳароратга боғлиқлиги

№	E_g , эВ	$I_{kt}=0$ бўладиган $T_{\min}$, К	$I_{kt}=I_{\max}$ бўладиган T , К	$I_{kt}=0$ бўладиган $T_{\max}$, К
1	0,45	69	425	621
2	0,97	97	367	441
3	1,16	109	354	410
4	1,5	128	340	379

Ундаги T_1 -қисқа туташув токи зичлиги нолга тенг бўладиган ($j_{\text{қт}}=0$) паст, T -қисқа туташув токи зичлиги максимал қийматга ($j_{\text{қт}}=j_{\text{макс.}}$) эга бўладиган ва T_2 -эса қисқа

туташув токи зичлиги нолга ($j_{\text{қт}}=0$) тенг бўладиган юқори ҳароратлар.

Маълумки, идеал ҚЭ ларининг потенциал тўсиғи баландлиги таъқиқ зонанинг (ҳаракатчанлик тирқиши) кенглиги билан аниқланади [9; б. 278]

$$\varphi \approx \frac{E_g}{q} . \quad (2.30)$$

Бу натижалар паст ва юқори ҳароратларда ишлайдиган ҚЭ ларини тақиқ зонасининг энергетик кенглиги кичик бўлган яримўтказгичлар асо-сида тайёрлаш кераклигини кўрсатади.

Таъкидлаб ўтамизки, бу ишда олинган натижалар кристалл ярим-ўтказгич асосли ҚЭ лари учун ҳам ўринли бўлади [82; 435-446 б., 94; 60-62 б.].

Бу ерда T_1 -қисқа туташув токи нолга тенг бўладиган ҳароратни минимал, T -қисқа туташув токи максимал бўладиган ҳароратни, T_2 -қисқа туташув токи нолга тенг бўладиган ҳароратни максимал қийматлари

§2.3. Қуёш элементларининг фотоВАХ га ҳароратни таъсири

Маълумки, ҚЭ ларининг иш самарадорлигини уларнинг фотогальваник параметрлари аниқлаб беради. Бу параметрлар қийматларини, ҚЭ ни ёритишда ВАХ ни тажрибавий ўлчашлардан аниқланади. ҚЭ ишини кенг температура диапазонида, масалан $T=(-120\text{ }^{\circ}\text{C}\div 140\text{ }^{\circ}\text{C})$ да текширишларда назарий қандай бўлса, амалий ҳам худди шундай қийматларга эга бўлади [74/1].

[75,76,77/1,2,3] ишларда ҚЭ ВАХ ва фотоэлектрик параметрларига температура таъсири аниқловчи тажрибадан аниқланган натижалар келтирилган. Бироқ унинг параметрларини характерловчи тенгламалар мураккаб кўринишга эга, яъни ушбу параметрлардаги баъзи катталикларни

бевосита ВАХ ёки фотоВАХ дан фойдаланиб аниқлаш амалий жихатдан мумкин эмас.

Бунга боғлиқ ҳолда ушбу параграфда, фотогальваник характеристикаларининг температурага боғланишини аниқловчи тажриба натижалари ва [78,79,80/1, 2, 4] да назарий олинган тенгламалардан фойдаланиб ҚЭ ни ёритишда унинг ВАХга температура таъсирини ўрганилди.

Кўришиб турибдики (2.2) формуладан фойдаланиб ҚЭ ларининг ёритилганликдаги ВАХ сини ҳароратга боғланишни аниқловчи тажриба натижаларини тушутириш мумкин эмас. Чунки, бу натижаларни тушунтириш учун олдиндан (2.2) ифодадаги тўйиниш токи зичлиги ва қисқа туташув токи зичликларини ҳароратга боғланишини билиш керак.

[81,82,83/1, 2, 4] ишларда а-Si:H аморф гидрогенизирланган кремний асосли ҚЭ модел сифатида танлаб, улар учун ярим эмпирик усулда ҚЭ ёритилганликдаги ВАХ ни температурага боғлиқлигини аниқловчи ва тажрибалардан олинган натижаларни етарлича яхши изоҳлашга имкон берадиган соддалашган тенгламалар олинди.

Бунинг учун бошида қисқа туташув токи зичлиги ва тўйиниш токи зичлигига температурани таъсирини аниқлаш керак. ҚЭ ни ёритишда ВАХ нинг экспериментал натижалари, қачонки чиқиш кучланиши салт ишлаш кучланишига (U_{cu}) га тенг бўлганда ундан чикувчи фототок зичлиги нолга тенг бўлади. Шунинг учун агар (2.2) да $U=U_{cu}$ ва $j_{\phi}=0$ ни ҳисобга олинса қуйидаги тенглик бажарилади:

$$j_{km} = j_0 \left[\exp\left(\frac{qU_{cu}}{nkT}\right) - 1 \right]. \quad (2.3)$$

Бу ердан U_{xx} кучланиш учун қуйидагини топамиз:

$$U_{cu} = \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{j_{km}}{j_0} + 1\right). \quad (2.4)$$

Салт ишлаш кучланишини температурага боғлиқлигини аниқлашда тўйиниш токи зичлиги учун [84/3] да олинган натижалардан фойдаланамиз:

$$j_0 = q\mu_c N(E_c) E_s \exp\left(-\frac{q\varphi}{kT}\right), \quad (2.5)$$

Бу ерда φ – ҚЭнинг потенциал тўсиқ баландлиги, μ -заряд ташувчининг ҳаракатчанлиги, $N(E_c)$ - ўтказувчанлик зонасида электрон ҳолатлар зичлигининг эффектив қиймати, E_s –ҚЭ да юзага келган ташқи электр майдон кучланганлиги.

Ўрганилаётган ҚЭ учун берилган параметрларнинг сон қийматини бевосита ВАХ дан аниқлаб бўлмайди. Шундай қилиб бу параметрларни аниқлашда сермашаққат ўлчашларни йўқотадиган бошқа усулни топиш мақсадга мувофиқ бўлади. Шунинг учун аввал тўйиниш токи зичлигининг температуравий боғлиқлигини қуйидаги кўринишда аниқлаймиз. Қачон $T_0=300$ К, бўлганда тўйиниш токининг зичлиги $j_0=j_{00}$ бўлади деб фараз қилсак, у ҳолда (2.5) дан қуйидагини ифодани оламиз:

$$j_{00} = q\mu_c N(E_c) E_s \exp\left(-\frac{q\varphi}{kT_0}\right). \quad (2.6)$$

(2.6) ни ҳисобга олиб (2.5) ни ўзгартирсак тўйиниш токи зичлиги учун қуйидаги ифодани оламиз:

$$j_0 = j_{00} \exp\left(\frac{q\varphi}{k} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)\right). \quad (2.7)$$

(2.7) ни (2.4) га қўйиб қуйидаги ифодани оламиз:

$$U_{cu} = \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{j_{km}}{j_{00}} \exp\left(-\frac{q\varphi}{k} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)\right) + 1\right). \quad (2.8)$$

Маълумки ҚЭ учун $\frac{j_{km}}{j_0} \gg 1$ шарт бажарилади, шунинг учун (2.4) ни қуйидаги кўринишда ёзиш мумкин:

$$U_{cu} = \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{j_{km}}{j_0}\right). \quad (2.9)$$

У ҳолда (2.7) ва (2.9) дан қуйидаги ифодани оламиз:

$$U_{cu} = \left[\ln \left(\frac{j_{kt}}{j_{00}} \right) - \frac{q\varphi}{kT_0} \right] \frac{nkT}{q} + n\varphi. \quad (2.10)$$

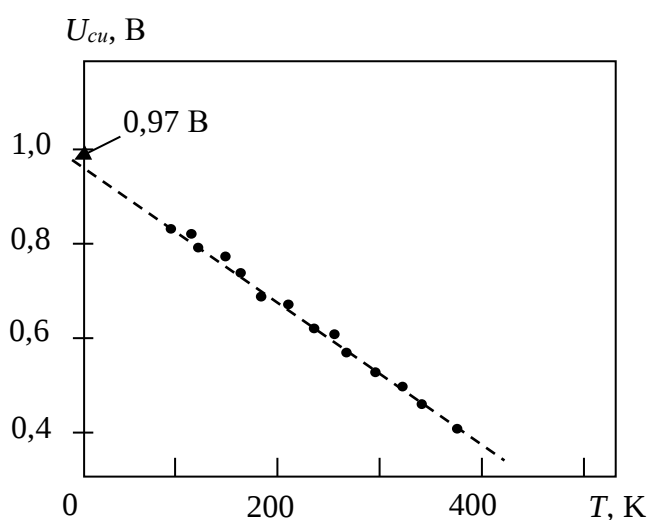
[85/3, 86/5] ишда тўйиниш токи зичлигини температурага боғлиқлиги формуласидан фойдаланиб, салт ишлаш кучланишининг температуравий боғланиши учун ифода олинган:

$$U_{cu} = \left[\ln j_{kt} - \ln(q\mu_C N(E_C) E_s) \right] \frac{nkT}{q} + n\varphi. \quad (2.11)$$

(2.10) ва (2.11) лар ёрдамида салт ишлаш кучланишини температурага боғлиқлиги учун олиб борилган ҳисоблаш натижалари битта эгри чизиқни характерлайди. Демак (2.10) формула бўйича салт ишлаш кучланишини температурага боғлиқлигини аниқлаш мумкин.

Экспериментал натижалар $-100^\circ\text{C} < t < +100^\circ\text{C}$ температура интервалида ҚЭ қисқа туташув токи температурага деярли боғлиқ эмаслигини кўрсатади [87,88/1, 3]. (2.10) ва (2.11) дан салт ишлаш кучланиши температурага чизиқли боғланишга эга эканлиги келиб чиқади ва ($T=0$) температурада бу боғланиш экстраполяция қилиш йўли $U_{cu} = n\varphi$ ни оламиз.

2.3-расмда а-Si:H ҚЭ учун салт ишлаш кучланишини температуравий боғланишини экспериментал натижалари келтирилган [90/3].



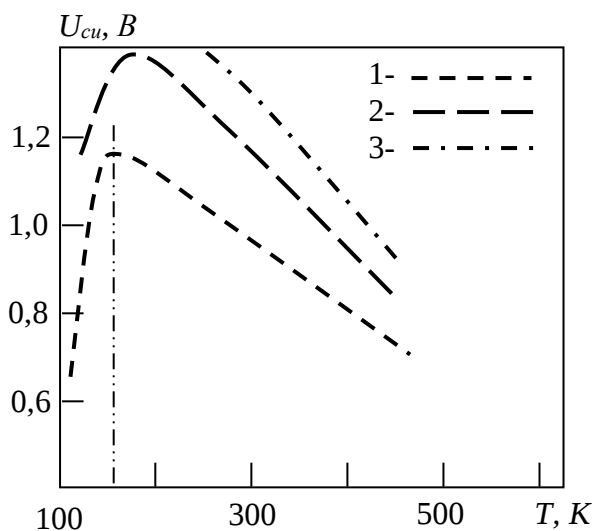
2.3 – расм. Гидрогенизацияланган аморф кремний асосли ҚЭ ларининг салт ишлаш кучланишини температурага боғланишини аниқловчи тажриба натижалари ($\varphi_0=0,97$ В) [90/3].

2.3-расмдаги графикдан кўриниб турибдики ҳақиқатдан ҳам $U_{cu}(T)$ боғланиш чизиқли. Бу маълумотлардан фойдаланиб $(0, n\varphi)$ ва (T_0, U_{cu0}) нуқталардан ўтувчи тўғри чизик тенгламасини аниқлаш мумкин натижада қуйидагини оламиз:

$$U_{cu} = (U_{cu0} - n\varphi) \frac{T}{T_0} + n\varphi, \quad (2.12)$$

Бу ерда $U_{cu0} - T_0 = 300$ К да салт ишлаш кучланиши.

(2.12) формуладан ҚЭ ларининг салт ишлаш кучланишини ҳароратга боғланиши учун олинган ҳисоблаш натижалари 2.4 – расмда келтирилган. Расмдан кўринадики, салт ишлаш кучланишининг ҳароратга боғланиши фотоВАХ нинг ноидеаллик коэффиценти ўзгариши билан жуда кучли ўзгарар экан. Бу ўзгаришларда фотоВАХнинг ноидеаллик коэффиценти 1 дан катта бўлса ҚЭ ларининг салт ишлаш кучланишининг қиймати идеал ҚЭ ларининг понециал тўсиғининг баландлигининг қийматидан катта бўлиб бўлиб қолади.



2.4-расм. ҚЭ ларининг салт ишлаш кучланишини температурага боғланиши учун (2.12) ифодадан олинган ҳисоблаш натижалари: Ҳисоблашларни фотоВАХ нинг ноидеаллик коэффиценти 1- $n=1$; 2- $n=1,1$; ва 3- $n=1,2$ қийматлари учун бажарилган.

$$\varphi_0 = \frac{E_{g0}}{q} ,$$

бу ерда E_{g0} – идеал ҚЭ ларининг таъқиқ зонасининг энергетик кенглиги. Буни эса бўлиши мумкин эмас. Шунинг учун ҚЭ ларининг фотоВАХ сидаги салт ишлаш кучланиши аниқланадиган нуқтасида фотоВАХ нинг ноидеаллик коэффиценти 1 га тенг бўлади ёки салт ишлаш кучланиши фотоВАХ нинг ноидеаллик коэффицентиға умуман боғлиқ бўлмайди деган хулосани чиқариш мумкин.

(2.12) ни ўзгартириб (2.11) га ўхшаш кўринишни оламиз:

$$U_{cu} = \left(\frac{q}{nkT_0} (U_{cu0} - \varphi) \right) \frac{nkT}{q} + n\varphi . \quad (2.13)$$

(2.10), (2.11) ва (2.13) лар ёрдамида бажарилган сонли ҳисоблашлар, j_{kt} , j_{00} , $\mu_C N(E_C) E_S$ ва U_{x0} ни қийматларини танлаб эгри чизикларнинг ўзаро мувофиқлигини тaminлаш мумкинлигини кўрсатади. Демак салт ишлаш кучланишининг температуравий боғланиши учун (2.13) тенгламадан фойдаланиш мумкин.

Маълумки, ҚЭ потенциал тўсиқ баландлигини яримўтказгич тақиқланган энергетик зона кенглиги аниқлайди. Шунинг учун ҚЭ потенциал тўсиқ баландлиги температураға боғланиши тақиқланган энергетик зона кенглигини температураға боғланиши билан бир хил кўришда бўлади деб ҳисоблаш мумкин:

$$\varphi = \varphi_0 - \gamma T \quad (2.14)$$

Бу ерда φ_0 - $T=0$ К да ҚЭ потенциал тўсиқ баландлиги, γ - аморф яримўтказгичда ковак ҳаракатчанлиги кенглигини температуравий коэффиценти. Унинг қиймати яримўтказгичлар учун $\gamma \approx (5 \cdot 10^{-4} - 10^{-5})$ эВ/К ораликда жойлашади [91/6].

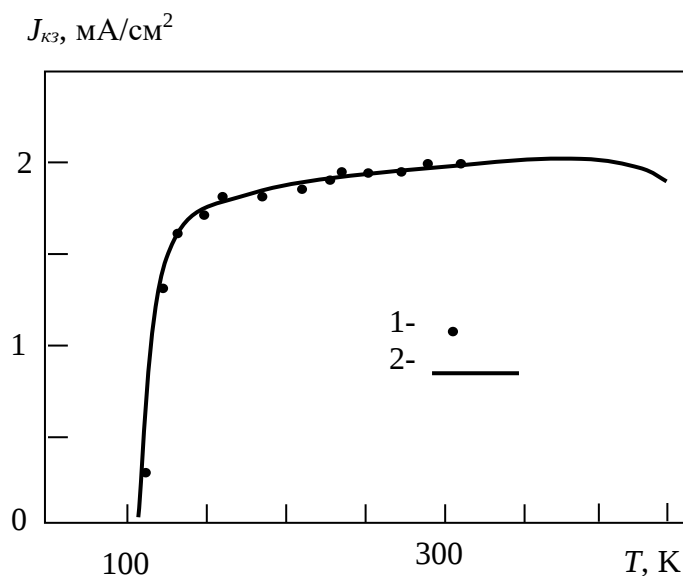
Шунинг учун (2.7), (2.12) ва (2.14) ларни (2.3) ифодаға қўйиб, ҚЭ қисқа туташув токи зичлигини температураға боғлаш учун қуйидаги кўринишда тенглама олинди:

$$j_{\kappa m} = j_{00} \exp \left[\frac{q(\varphi_0 - \gamma T)}{k} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right] \left[\exp \left[\frac{q(\varphi_0 - \gamma T)}{nkT_0} \left(\frac{U_{cu0}}{(\varphi_0 - \gamma T)} - n \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) \right) \right] - 1 \right]. \quad (2.15)$$

Бироқ (2.15) дан фойдаланиб ҳисобланган натижалар [92/3] да олинган қисқа туташув токи зичлигига температура таъсирини кўрсатувчи экспериментал натижаларни етарлича тўлиқ тушунтириб бера олмаслигини кўрсатади. Кейинги олиб борилган тадқиқотлар асосида $T=0$ ва $U_{cu}=\varphi$ да салт ишлаш кучланишини экстраполяция қилишдан экспериментал натижаларни тўлиқ тушунтирувчи қуйидаги ифодага эга бўламиз:

$$j_{\kappa z} = j_{00} \exp \left[\frac{q(\varphi_0 - \gamma T)}{k} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right] \left[\exp \left[\frac{q(\varphi_0 - \gamma T)}{nkT_0} \left(\frac{U_{cu0}}{(\varphi_0 - \gamma T)} - 1 + \frac{T_0}{T} \right) \right] - 1 \right]. \quad (2.16)$$

2.6-расмда бу тенглама ёрдамида олинган ҳисоблаш маълумотлари кўрсатилган ва таққослаш учун тажриба натижалари кўрсатилган ($n=1,006$ ва $\varphi_0=0,97$ В) Уларнинг мослигидан ҚЭ ни ёритишда ВАХ ноидеаллик коэффиценти амалий жихатдан яна температурага боғлиқ эмаслигини



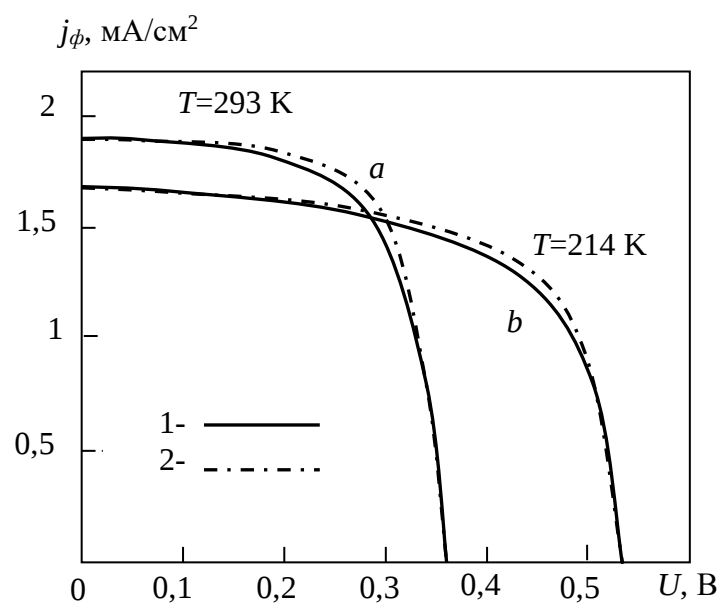
2.6 – расм. Гидрогеизацияланган аморф кремний асосли ҚЭ ларининг қисқа туташув токи зичлигининг ҳароратга боғланиши. 1- тажриба [90/3] ва (2.16) формуладан $n'=1,006$ ва $\varphi_0=0,97$ В бўлганда олинган ҳисоблаш натижалари.

тасдиқлаш мумкин. Шунинг учун қисқа туташув токи зичлигининг температуравий боғлиқлигини аниқлашда бу параметр қийматига температура таъсирини ҳисобга олинмаган.

Энди ҚЭни ёритишда ВАХга температура таъсирини тушунтириб берувчи ифодани аниқлашга ўтамиз. (2.7) ва (2.16) ларни ҳисобга олиб (2.2) дан қуйидагини оламиз:

$$j_{\phi} = j_{00} \exp \left[\frac{q(\phi_0 - \gamma T)}{k} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right] \left\{ \exp \left(\frac{qU}{nkT} \right) - \exp \left[\frac{q(\phi_0 - \gamma T)}{nkT_0} \left(\frac{U_{cu0}}{\phi} - 1 + \frac{T_0}{T} \right) \right] \right\}. \quad (2.17)$$

Кўриниб турибдики, бу ифодадан фойдаланиб ҚЭ ВАХ га температура таъсирини тавсифлаш мумкин. 2.7-расмда ҚЭ фотоВАХ ни температурага боғлиқликда ўзгаришни кўрсатувчи экспериментал натижалар келтирилган.



2.7 - расм. Гидрогенизацияланган аморф кремний асосли ҚЭ ларининг 214 ва 293 температуралардаги фотоВАХ лари. 1-тажриба [90/3] ва (2.17) формуладан $\phi_0=0,97$ В, $j_{00}=3,96 \cdot 10^{-6}$ мА/см², $\gamma=5 \cdot 10^{-5}$ эВ/К бўлганда олинган ҳисоблаш натижалари.

Ўша ерда $\varphi_0=0,97$ В, $\gamma \approx 5 \cdot 10^{-5}$ эВ/К, $U_{cu0}=0,35$ В, $j_{00}=1,29 \cdot 10^{-8}$ мА/см² қийматларда (2.17) ёрдамида олинган ҳисоблаш натижалари кўрсатилган. 2.7-расмдан кўриниб турибдики тажриба ва ҳисоблаш натижалари катта ва кичик кучланишларда мос келади. Лекин ВАХ эффектив қувват нуқталари яқинида бу натижалар орасида жиддий тафовут юзага келади. Бизнинг назаримизда ВАХ нинг кўрилатган нуқтасида эгри чизиқнинг бошқа соҳасига нисбатан ноидеаллик коэффиценти ҚЭ нинг реал кучланишига кучли боғлиқ бўлади. Маълумки, диод ноидеаллик коэффицентининг қиймати у орқали ўтувчи электр тоқининг характери аниқлайди [93/4].

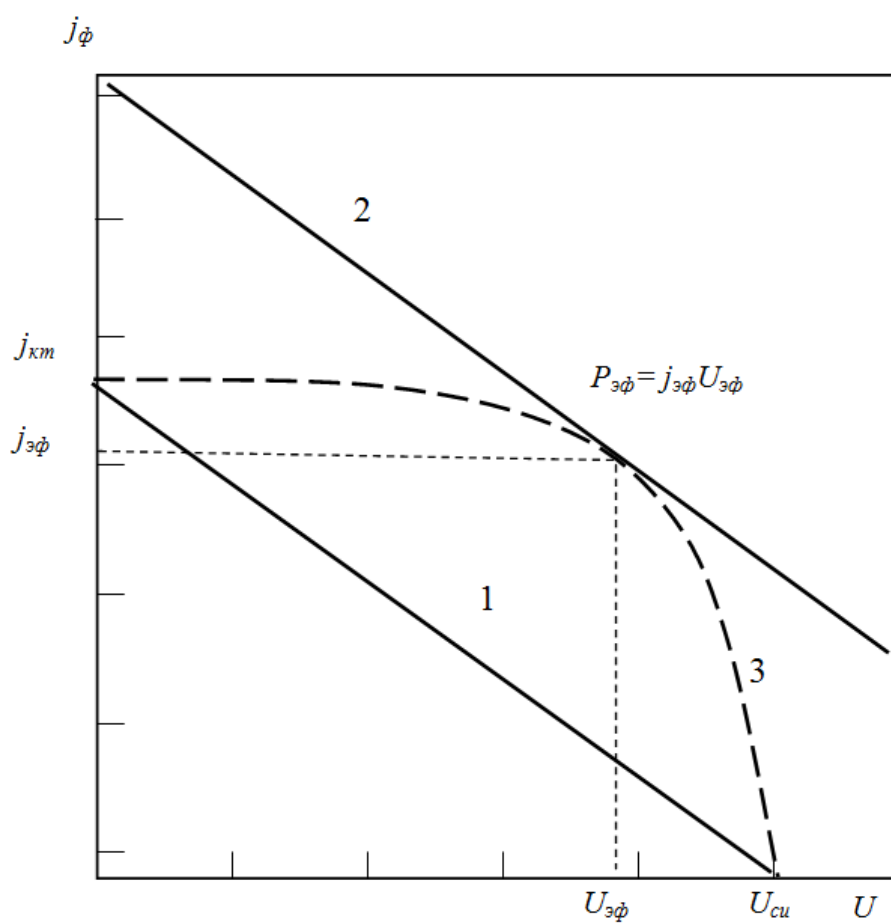
Шуни эслатиб ўтиш лозимки ҳисоблаш ва тажриба натижалари мос келиши учун ҚЭ ВАХ нинг ноидеаллик коэффицентини қийматини қуйидагича танлашга тўғри келди: $T_1=214$ К да $n_1=1,0034$, $T_2=293$ К да $n_2=1,0061$. n_1 ва n_2 ларнинг фарқи унчалик катта эмас бунда у тажриба хатолиги чегарасида жойлашган деб ҳисоблаш лозим. Демак ҚЭ ВАХ нинг ноидеаллик коэффиценти амалий жихатдан температурага боғлиқ эмас. Шундай қилиб температура ва ёритилганлик даражаси ўзгаришнинг текширилатган диапазонда заряд ташиш механизми ўзгармасдан қолади. Бу натижалардан қуйидаги хулосани чиқариш мумкин. Яримўтказгичлар асосида тайёрланадиган ҚЭ ВАХ ни температурага боғлиқлиги учун экспериментал натижаларни янада аниқроқ тушунтиришга имкон берадиган янги тенглама олинди. Ҳисоблаш ва тажриба натижаларини таққослаш йўли билан текширилатган диапазонда температуранинг ўзгариши ҚЭ ВАХ нинг ноидеаллик коэффицентининг қийматига амалий жихатдан таъсир қилмаслигини кўрсатилди.

§2.4. Қуёш элементларининг эффектив фотогальваник характеристикаларини ҳисоблашни янги усули

Маълумки, ҚЭ эффектив қуввати, ҚЭ идан чиқадиган кучланиш ва ток кучини эффектив қийматлари билан аниқланади

$$P_{эф} = j_{эф} U_{эф}. \quad (3.1)$$

Кўриниб турибдики, ҚЭ нинг эффектив қуввати зичлигини аниқлайдиган формулани келтириб чиқариш учун, $j_{эф}$ – эффектив ток кучи ва $U_{эф}$ – эффектив кучланиш ифодаларни аниқлаш керак. Бу параметрларни ҚЭ нинг тажрибалардан аниқланган фотоВАХ дан фойдаланиб, ундаги эффектив қувватга мос келувчи нуқтани аниқлаш усули 3.1-расмда келтирилган. Бунинг учун, фотоВАХ ни графигидан сальт ишлаш кучланиши ва қисқа туташув токи зичлигини аниқловчи нуқталарни координата ўқларида белги-ланади яъни, $(0; j_{кт})$ ва $(U_{си}; 0)$. Бу нуқталардан ўтувчи тўғри чизикни чизиб (1-тўғри чизик), уни параллел кўчириб (2-тўғри чизик) ҚЭ фотоВАХ нинг графиги (3-эгри чизик) билан уриниш нуқтаси аниқланади. Шу нуқта эффектив қувватни аниқлайди. Бу усулдан фойдаланиб эффектив қувват зичлигини аниқловчи формулани келтириб чиқариш мумкин.



3.1-расм. Тажрибалар натижаларидан фойдаланиб ҚЭ фотоВАХ сидан эффе́ктив қувватни аниқлаш усули. 3-ҚЭ фотоВАХ си.

Бундан фойдаланиб 3.1-расмдаги 1-тўғри чизик учун

$$j = \frac{j_{\kappa m}}{U_{cu}} U - j_{\kappa m} \quad (3.2)$$

ифодани оламиз. Бу формуладаги $a = \frac{j_{\kappa m}}{U_{cu}}$ киймат шу тўғри чизикнинг бурчак коэффиценти бўлади.

Энди 1-чизикқа параллел бўлган ва ҚЭ фотоВАХ га уринувчи тўғри чизик тенгламасини аниқлаймиз. У чизик тенгламаси ҳам, $j = aU + b$ кўринишида бўлади. Бу чизикни бурчак коэффиценти a ни аниқлаш учун ҚЭ фотоВАХ дан

$$j_{\phi} = j_0 \left(\exp \left(\frac{qU}{n'kT} \right) - 1 \right) - j_{\kappa m} \quad (3.3)$$

фойдаланамиз [36; 763–771 б.].

Агар (3.3) фотоВАХ дан кучланиш бўйича ҳосила олиб, уни $U = U_{\phi}$ га тенг бўладиган кийматини топсак, a учун қуйидаги ифодани оламиз

$$a = j'_{\phi}(U_{\phi}) = j_0 \frac{q}{n'kT} \exp \left(\frac{qU_{\phi}}{n'kT} \right). \quad (3.4)$$

Тўғри чизикларни параллеллик шартига кўра, уларни бурчак коэффиценти бир - бирига тенг бўлади

$$\frac{j_{\kappa m}}{U_{cu}} = j_0 \frac{q}{n'kT} \exp \left(\frac{qU_{\phi}}{n'kT} \right). \quad (3.5)$$

Бундан фойдаланиб ҚЭ эффектив кучланиши учун (U_{ϕ})

$$U_{\text{эф}} = \frac{n'kT}{q} \ln \frac{j_{\text{кт}}}{j_0} \frac{n'kT}{qU_{\text{си}}} \quad (3.6)$$

ифодани оламиз.

Эффектив ток кучи зичлигини аниқлаймиз, бунинг учун ҚЭ фотоВАХ даги кучланишга тенг бўлганда, фототок зичлиги ҚЭ эффектив ток зичлигига тенг бўлишидан

$$j_{\text{эф}} = j_0 \left(\exp \left(\frac{qU_{\text{эф}}}{n'kT} \right) - 1 \right) - j_{\text{кт}}. \quad (3.7)$$

Бу ифодадаги $U_{\text{эф}}$ ни ўрнига (3.6) ни қўямиз ва

$$j_{\text{эф}} = j_{\text{кт}} \left(\frac{n'kT}{qU_{\text{си}}} - 1 - \frac{j_0}{j_{\text{кт}}} \right) \quad (3.8)$$

эффектив ток кучи зичлигини аниқлаш мумкин бўлган ифодани оламиз. (3.6) ва (3.8) дан эффектив қувватни аниқласак, қуйидаги ифода ҳосил бўлади

$$P_{\text{эф}} = j_{\text{эф}} U_{\text{эф}} = j_{\text{кт}} \left(\frac{n'kT}{qU_{\text{си}}} - 1 - \frac{j_0}{j_{\text{кт}}} \right) \frac{n'kT}{q} \ln \frac{j_{\text{кт}}}{j_0} \frac{n'kT}{qU_{\text{си}}}. \quad (3.9)$$

Қисқа туташув ($j_{\text{кт}}$) ва тўйиниш токи зичликларини (j_0) ишораси ман-фий бўлишини ҳисобга олсак (3.9) формула қуйидаги кўринишга келади

$$P_{\text{эф}} = \frac{n'kTj_{\text{кт}}}{q} \left(1 + \frac{j_0}{j_{\text{кт}}} - \frac{n'kT}{qU_{\text{си}}} \right) \ln \frac{j_{\text{кт}}}{j_0} \frac{n'kT}{qU_{\text{си}}}. \quad (3.10)$$

Биз ҚЭ и эффектив қуввати зичлигини аниқлаш мумкин бўлган ифода-га эга бўлдик.

§2.5. Қуёш элементларининг эффектив фотогальваник характеристикаларини ҳароратга боғланиши

Олдинги параграфда ҚЭ и эффектив қуввати зичлигини аниқлаш мумкин бўлган ифодани олдик. Энди мақсадимиз, ҚЭ эффектив қуввати зичлигини ҳароратга боғланишини тадқиқ қилишдан иборат. Маълумки, ҚЭ

ни j_0 –тўйиниш ва j_{km} –қисқа туташув токи зичиклари, U_{cu} - салът ишлаш кучланиши ҳам, ҳароратга боғлиқ бўлади [74; 18-22 б.]. Бу боғланишлар [75; б.18-22, 76; 148-150 б.] ишларида аниқланган бўлиб, уларни қуйидаги кўринишларда ёзиш мумкин:

$$j_0 = j_{00} \exp\left(-\frac{q\varphi}{k}\left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)\right), \quad (3.11)$$

$$U_{cu} = (U_{0cu} - \varphi)\frac{T}{T_0} + \varphi, \quad (3.12)$$

$$j_{km} = j_0 \left[\exp\left[\frac{q\varphi}{n'kT_0}\left(\frac{U_{0cu}}{\varphi} - 1 + \frac{T_0}{T}\right)\right] - 1 \right]. \quad (3.13)$$

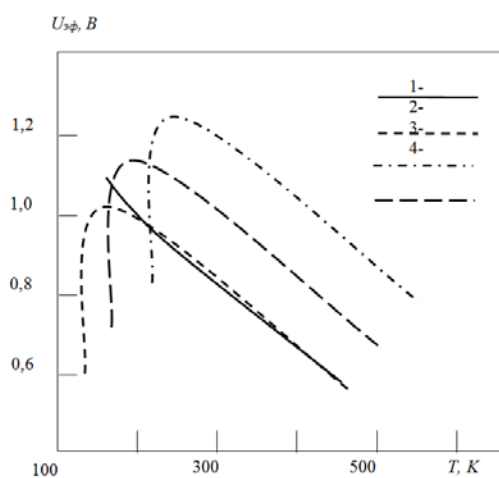
Бу ифодалардаги j_{00} -хона ҳароратидаги тўйиниш токи зичлиги, T_0 -хона ҳарорати ва U_{0cu} - хона ҳароратидаги салът ишлаш кучланишлари бўлиб, улар ҳароратга боғлиқ бўлмайди. n' -ҚЭ и фотоВАХ сини сифат коэффиценти ҳам $100 < T < 500$ К ҳарорат интервалида ҳароратга деярли боғлиқ бўлмаслиги [77; 448-461 б.] ишда кўрсатилган. φ - ҚЭ ининг потенциал тўсиғи баландлигини ҳароратга боғланиши яримўтказгичларнинг таъқиқ зонасини ҳароратга боғланиши билан бир хил бўлиб, уни жуда паст қуйидаги бўлмаган ҳароратлар учун кўринишда ёзиш мумкин [10; 418 б.].

$$\varphi = \varphi_0 - \gamma T. \quad (3.14)$$

Бу ерда, φ_0 - ҚЭ ининг $T=0$ К ҳароратдаги потенциал тўсиғи баланд-лиги бўлиб, (3.12) формуладан кўриш мумкинки уни қийматини, салът иш-лаш кучланишини ҳароратга боғланишини ($U_{cu}(T)$), $T=0$ К га экстраполяция қилиб аниқлаш мумкин [10; 356-411 б.] (2.3-расм). γ - потенциал тўсиқ баландлигини ҳарорат коэффиценти бўлиб, уни қиймати 10^{-3} - 10^{-4} В/К ора-ликда ётади [4; 133-140 б.]. (3.14) ни (3.11)-(3.13) ларга қўйилса, бу фотогальваник характеристикаларда ўзгарувчи сифатида фақат ҳарорат қолади.

Уларни (3.6) га қўйиб эффектив кучланишни, (3.8) га қўйиб эффектив ток зичлигини, (3.10) га қўйиб, эффектив қувват зичлигини ҳароратга боғла-

нишини аниқловчи ифодаларни олиш мумкин. (3.6) дан эффектив кучланишини ҳароратга боғланиши учун олинган ҳисоблашлар 3.2-расмда келтирилган (1-эгри чизик).

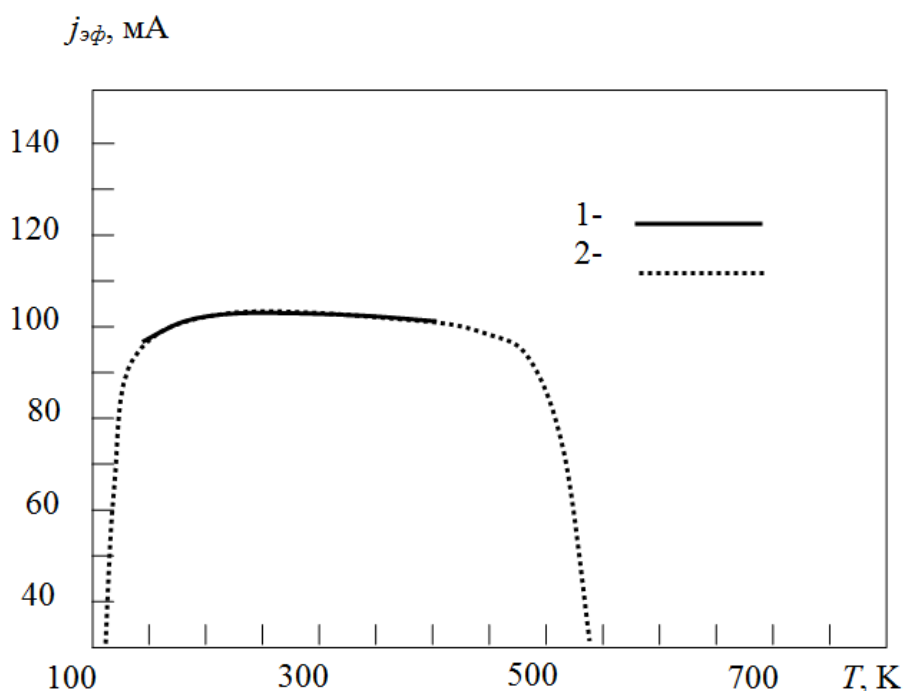


3.2-расм. ҚЭ ларининг эффектив кучланишини температурага боғланиши. 1 - тажрибадан олинган натижалар [11], (3.6) формуладан олинган ҳисоблаш натижалари: 2- $n=1$; 3- $n=1,1$; ва 4- $n=1,2$.

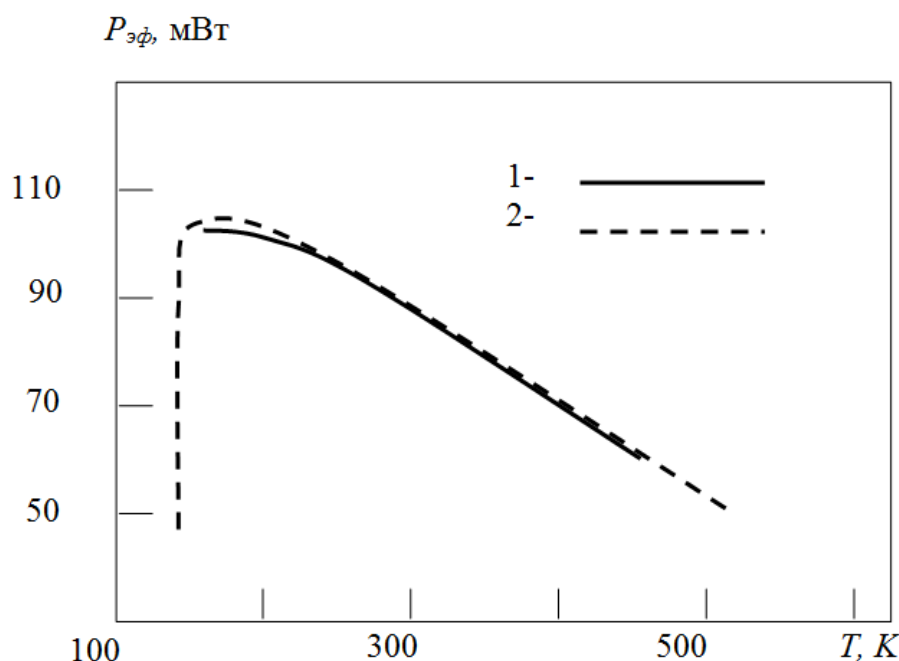
Солиштириб кўриш учун шу расмда тажрибадан олинган натижалар ҳам келтирилган (2-эгри чизик). Ҳисоблашлардан, бу натижалар бир-бирига мослигининг нисбий хатолиги тажрибаларда йўл қўйиладиган хатоликдан (8 %) катта бўлмаслиги аниқланди.

(3.8) дан эффектив ток кучи зичлигини ҳароратга боғланиши учун 3.3-расмда келтирилган (1-эгри чизик), эффектив ток кучи зичлигини ҳаро-ратга боғланиши учун тажрибадан олинган натижалар келтирилган (2-эгри чизик). Ҳисоблашлардан, бу натижалар бир-бирига мослигининг нисбий хатолиги тажрибаларда йўл қўйиладиган хатоликдан (8 %) катта бўлмаслиги аниқланди.

(3.10) дан фойдаланиб топилган ҚЭ эффектив қуввати зичлигини



3.3-расм. ҚЭ ларини эффетив токини температурага боғланиши 1-тажриба [11; 141 б.] ва 2-ҳисоблаш натижалари. Ҳисоблашларни $n=2,5$; $\varphi_0=1,42$ В ва $\gamma=2 \cdot 10^{-4}$ В/К учун бажарилди. ҳароратга боғланиши учун бажарилган ҳисоблашларни натижалари 3.4-расмда келтирилган (1-эгри чизик). Солиштириб кўриш учун шу расмда ҚЭ ни эффектив қуввати зичлигини ҳароратга боғланиши учун тажрибадан олинган натижалар ҳам келтирилган (2-эгри чизик).



3.4-рasm. ҚЭ ларининг эффектив кувватиини температурага боғланиши (1) тажриба [76] ва ҳисоблаш (2) натижалари.

Ҳисоблашлардан, бу натижалар бир-бирига мослигининг нисбий хатолиги тажрибаларда йўл қўйиладиган хатоликдан (8 %) катта бўлмаслиги аниқланди. Барча ҳисоб-лашларни ҚЭ потенциал тўсиғини ҳарорат коэффиценти учун $\gamma=5 \cdot 10^{-4}$ В/К қиймат олинди.

Энди (3.10) формуладан олинадиган натижаларини ҚЭ идан чиқади-ган максимал кувватни аниқлайдиган кучланиш ва ток кучининг қиймат-лари билан солиштирамиз.

Маълумки ҚЭ идаги электр токининг қуввати зичлиги Жоуль-Ленц қонунига кўра қуйидаги формула билан ҳисобланади:

$$P = j_{\phi} U \quad (3.15)$$

ёки

$$P = (j_0 \exp(\frac{qU}{n'kT}) - 1) + j_{km}) U \quad (3.16)$$

Булардан кўринадики фототок ва кучланишнинг эффектив қийматларини икки хил усулда (3.10) ва (3.16) формулани максимум қийматидан ҳисоблаш мумкин. Агар (3.10) тўғри бўлса улардан аниқланган j_{ϕ} ва U_{ϕ} лар-

нинг қийматлари уларни (3.16) дан ҳисобланган максимумлар билан мос келиши керак. Ҳисоблашлардан олинган солиштириш натижалари бу катталикларни бир-бири билан айнан мос тушушини кўрсатди.

AlGaAs-GaAs асосли ҚЭ учун эффе́ктив кучланишини ҳароратга боғланиши учун олинган ҳисоблашлар 3.5-расмда келтирилган (1-эгри чизик). Солиштириб кўриш учун шу расмда тажрибадан олинган натижалар ҳам келтирилган (2-эгри чизик). Ҳисоблашлардан, бу натижалар бир-бирига мослигининг нисбий хатолиги тажрибаларда йўл қўйиладиган хатоликдан (8 %) катта бўлмаслиги аниқланди [79; 84-87 б.]. 3.1-жадвалда $T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ҳароратда ФИК $\eta=16,4\%$ бўлган *AlGaAs-GaAs* асосли ҚЭ ини фотоэлектрик параметрларини *AM0* ($P_0=140\text{ мВт/см}^2$) шароитида ҳароратга боғланиши учун олинган ҳисоблаш натижалари келтирилган.

III БОБ. ҚУЁШ ЭЛЕМЕНТЛАРИНИНГ ФОТОВАХ НИНГ НОИДЕАЛЛИК КОЭФФИЦИЕНТИ

§3.1. Қуёш элементларининг фотоВАХ нинг ноидеаллик коэффи́циенти

Маълумки, ҚЭ ни занжиридаги қоронғиликдаги ток зичлиги (2.1) ифода билан аниқланади. Бу формуладан ҚЭ нинг қоронғиликда ВАХ нинг ноидеаллик коэффи́циенти учун

$$n = \frac{qU}{kT} \frac{1}{\ln\left(\frac{j + j_0}{j_0}\right)} \quad (2.18)$$

ифодани олиш мумкин. Одатда диоднинг ВАХ сини ноидеаллик коэффи́центини тажрибалардан фойдаланиб аниқланади. Чунки бу параметрнинг қиймати диоддан ўтяпган токни тури билан аниқланади. Агар диоддан ўтаяпган ток асосан диффузион ток бўлса $n=1$ га, рекомбинацион-генерацион ток бўлса $n=2$ га, инжекцион токда ёки диффузион ва ток билан рекомбинацион-генерацион ток тенг қийматларни ташкил қилганда $1 < n < 2$ ораликда ётади. Шунинг учун диодни ВАХ сини ноидеаллик коэффи́циенти

$1 < n < 2$ ораликда ўзгаради деб ҳисобланади [1,2].

ҚЭ ларининг ёритиландаги ноидеаллик коэффиценти учун (2.2) формуладан

$$n' = \frac{qU}{kT} \frac{1}{\ln\left(\frac{j_\phi + j_{km} + j_0}{j_0}\right)} \quad (2.19)$$

ифодани олиш мумкин. Аммо бу ифодадан фойдаланиб фотоВАХ нинг ноидеаллик коэффиценти фақат тажрибалар натижаларидангина аниқлаш мумкин. Чунки, юқорида айтиб ўтилганидек унинг қиймати ҳам фототокни тури билан аниқланди. [94,95/1,2] ишларда ҚЭ дан ўтаяпган ток бир сатҳли рекомбинацион ток бўлганда $n'=2$ га, умуман олганда эса ҚЭ ларининг фотоВАХ сини ноидеаллик коэффиценти қиймати $1 < n' < 4$ ораликда ўзгариши мумкин эканлиги кўрсатилган.

[96,97/1,2] ишларда ҚЭ ларининг салът ишлаш кучланиши (U_{cu}), қисқа туташув токи зичлиги (j_{km}), эффектив кучланиш (U_{ϕ}) ва эффектив ток зичлиги (j_{ϕ}) нинг ҳароратга боғланиши тадқиқ қилиш натижасида фотоВАХ ининг ноидеаллик коэффиценти ҳароратга $200 K < T < 500 K$ ораликда боғлиқ бўлмас экан деб хулоса чиқарилган. Чунки, бу параметрларни ҳароратга боғланишини аниқловчи тажриба натижаларни назарий усулда тушунириш учун бажарилган ҳисоблашларда ҚЭ фотоВАХ сидаги салът ишлаш кучланиши (U_{cu}), қисқа туташув токи зичлиги (j_{km}), эффектив кучланиш (U_{ϕ}) ва эффектив ток зичлиги (j_{ϕ}) ни қийматлари аниқланадиган нуқталаридаги фотоВАХ нинг ноидеаллик коэффицентларининг қийматлари ўзгартирилмаган. ҚЭ фотоВАХ қисқа туташув токи зичлиги аниқланадиган нуқтасида ноидеаллик коэффиценти бирга яқин қийматга, эффектив ток зичлиги аниқланадиган нуқтасида эса икки яримга яқин қийматга эга бўлиши кўрсатилган. Бундан ҚЭ фотоВАХ ининг ноидеаллик коэффиценти фотоВАХ нинг турли нуқталарида турлича қийматга эга бўлишини айтиш мумкин. Ҳақиқатдан ҳам фотоВАХ ининг ноидеаллик коэффиценти намунадан ўтган токни тури билан аниқланади [98/3], шунинг учун у фотоВАХ ни барча нуқталарида бир хил қийматга эга

бўлиши мумкин эмас. [99/3] ишларда салът ишлаш кучланиши фототок нолга тенг бўладиган нуктада аниқланганлиги учун, у ҚЭ фотоВАХ ининг ноидеаллик коэффициентига боғлиқ бўлмаслиги ёки бу параметрни фотоВАХ ни шу нутасидаги қиймати бирга тенг бўлиши ёки салът ишлаш кучланиши фотоВАХнинг ноидеаллик коэффициентига боғлиқ бўлмаслиги (2.12) формуладан олинган ҳисоблашлар ёрдамида кўрсатилди. Шунини ҳисобга олиб бу параметрни қуйидаги кўринишда ёзамиз.

$$U_{cu} = (U_{cu0} - \varphi) \frac{T}{T_0} + \varphi \quad (2.20)$$

[95/3] ишда эса, кучланишни эффектив қиймати учун кетириб чиқарилган формулада, бу параметрни ҚЭ нинг фотоВАХ ининг ноидеаллик коэффициентига боғлиқ бўлиши кўрсатилган. Аммо бу параметрни ҳароратга боғланиши тажрибадан олинган натижаларни тушунтириши учун бажарилган ҳисоблаш натижаларига кўра, фотоВАХ ни эффектив қувват аниқланадиган нуктасида ундаги, фотоВАХ ни ноидеаллик коэффициентини қиймати бирга тенг бўлиши ёки бу параметр ҳам ноидеаллик коэффициентига умуман боғлиқ бўлмаслиги кўрсатилган.

§3.2. Қуёш элементларининг ноидеаллик коэффициентига ҳароратни таъсири

Юқоридагиларни ҳисобга олиб ушбу параграфда фотоВАХ ининг ноидеаллик коэффициентини ҳароратга боғланишини тадқиқ қилиш мақсад қилиб қўйилган.

Юқорида кўрсатиб ўтилдики, ҚЭ дан чиқувчи кучланиш салът ишлаш кучланишига тенг бўлганда фототокни нолга тенг бўлишидан фойдаланиб, ҚЭ ининг фотоВАХ сидан (2.2) фотоВАХ ининг ноидеаллик коэффициенти учун қуйидаги ифодани ёзиш мумкин

$$n'_1 = \frac{qU_{cu}}{kT} \frac{1}{\ln\left(\frac{j_{km} + j_0}{j_0}\right)}. \quad (2.21)$$

[2] ишда тўйиниш токи зичлиги, салът ишлаш кучланиши, қисқа туташув токи зичлигининг ва ҚЭ ининг потенциал тўсиғи баландлигини ҳароратга боғланиши учун $T_0=300$ К бўлганда 2.1 ва 2.2 параграфларда келтириб чиқарилган (2.7), (2.14), (2.16) ва (2.20) формулаларни (2.21) га қўйиб, ҚЭ ининг фотоВАХ сени ноидеаллик коэффициентини ҳароратга боғланишини аниқловчи ифодани олиш мумкин. Бу формуладан олинган ҳисоблашлар ҚЭ ларининг фотоВАХ сени қисқа туташув токи зичлиги аниқланадиган нуқтасидаги фотоВАХ ни ноидеаллик коэффициентини қийматларни ҳароратга боғланишини аниқлайди. Монокристалл кремний асосли ҚЭ лари ($\varphi_0=1.12$ В) учун фототок қисқа туташув токига тенг бўладиган нуқта учун (2.21) ифодадан фотоВАХ ноидеаллик коэффициентини ҳароратга боғланиши учун олинган ҳисоблаш натижалари 2.8-расмда келтирилган.

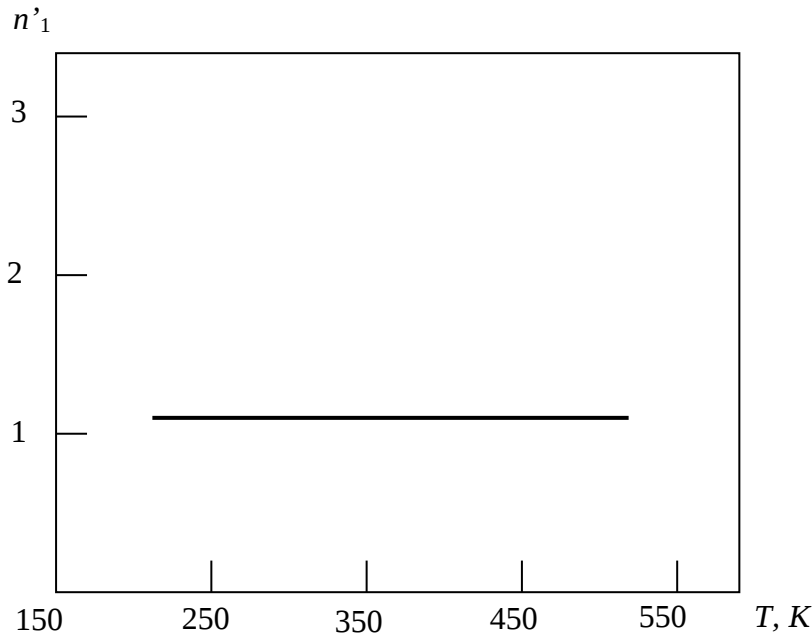
Расмдан кўришиб турибдики, ҚЭ ларининг фотоВАХ ини ноидеаллик коэффициенти $160K < T < 500K$ ораликда ҳароратга умуман боғлиқ бўлмас ва уни қиймати $n'_1=1,0018$ га тенг бўлар экан. Эслатиб ўтамизки, ҳисоблашларни $j_{00}=3,468 \cdot 10^{-10}$ А/см², $U_{0cu}=0,6287$ $\varphi_0=1,12$ В, $n'_1=1,0018$ ва $\gamma=2 \cdot 10^{-4}$ В/К қийматлар учун бажарилди.

Маълумки, ҚЭ дан чиқувчи кучланиш эффектив кучланишга тенг бўлганда унда ҳосил бўлувчи фототок зичлиги ҳам ўзининг эффектив қийматига тенг бўлади. Шунинг учун ҚЭ фотоВАХ сени қуйидаги кўринишда ёзиш мумкин.

$$j_{\varepsilon\phi} = j_0 \left[\exp\left(\frac{qU_{\varepsilon\phi}}{n'kT}\right) - 1 \right] - j_{km} \quad (2.21)$$

Бу ифодадан ҚЭ ларининг фотоВАХ ини ноидеаллик коэффициентини топсак қуйидаги ифода ҳосил бўлади.

$$n'_2 = \frac{qU_{\text{эф}}}{kT} \frac{1}{\ln\left(\frac{j_{\text{эф}} + j_{\text{км}} + j_0}{j_0}\right)} \quad (2.22)$$



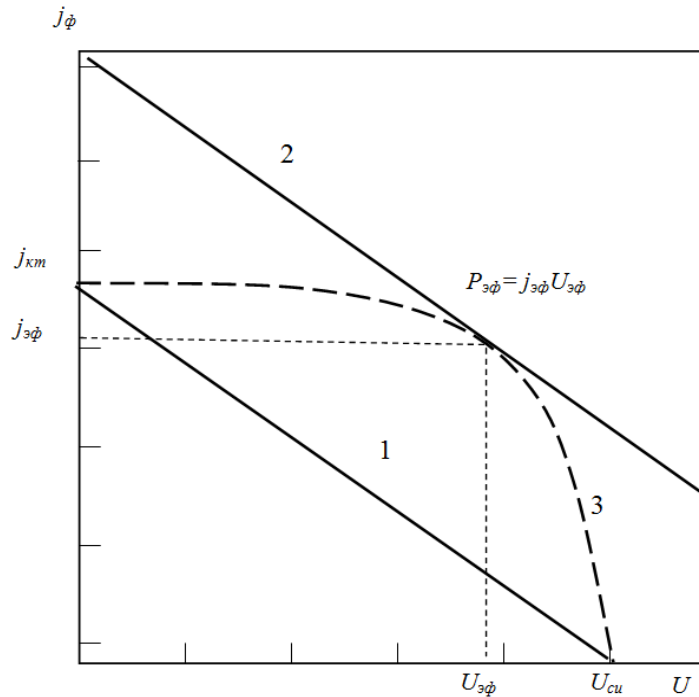
2.8-расм. ҚЭ фотоВАХ и ноидеаллик коэффициентининг ҳароратга боғланиши. Ҳисоблашларни $j_{00}=3,468 \cdot 10^{-10} \text{ A/cm}^2$, $U_{0\text{СИ}} = 0,6287 \text{ В}$ $\varphi_0=1,2 \text{ В}$, $n'_1=1,0018$ ва $\gamma=2 \cdot 10^{-4} \text{ В/К}$ қийматлар учун бажарилди.

Бу

формуладан кўриниб турибдики ундаги $j_{\text{эф}}$ – эффектив ток кучи зичлиги ва $U_{\text{эф}}$ – эффектив кучланиш ифодаларни ҳароратга боғланишини аниқласак ҚЭ ларининг фотоВАХ сини эффектив ток кучи зичлиги аниқланадиган нуқтасидаги фотоВАХ сини ноидеаллик коэффициентини ҳароратга боғланиш ифодасини оламиз. Бу параметрларни аниқлаш учун ҚЭ нинг тажрибалардан аниқланган фотоВАХ дан фойдаланиб, ундаги эффектив қувватга мос келувчи нуқтани топиш усулидан фойдаланамиз. Тажрибалардан фойдаланиб эффектив қувватни аниқлаш усули схематик равишда 2.7-расмда келтирилган.

Бунинг учун, фотоВАХни графигидан салът ишлаш кучланиши ва қисқа туташув токи зичлигини аниқловчи нуқталарни координата ўқларида белгиланади яъни, $(0; j_{\text{км}})$ ва $(U_{\text{си}}; 0)$. Бу нуқталардан ўтувчи тўғри чизикни чизиб (1-тўғри чизик), уни параллел кўчириб (2-тўғри чизик) ҚЭ фотоВАХ нинг графиги (3-эгри чизик) билан уриниш нуқтаси аниқланади. Шу нуқта

эффектив қувват зичлигини аниқлайди. Бу усулдан фойдаланиб эффектив қувват зичлигини аниқловчи формулани келтириб чиқариш мумкин.



2.7-расм. Тажрибалар натижаларидан фойдаланиб ҚЭ фотоВАХ сидан эффектив қувватни аниқлаш усули схемаси.

Бу ерда 3-ҚЭ тажрибадан олинган фотоВАХ си.

Бундан фойдаланиб 2.7-расмдаги 1-тўғри чизик учун икки нуқтадан ўтувчи тўғри чизик тенгламасидан

$$j = \frac{j_{kt}}{U_{ci}} U - j_{kt} \quad (2.23)$$

ифодани оламиз. Бу формуладаги $a = \frac{j_{kt}}{U_{ci}}$ қиймат шу тўғри чизикнинг бурчак коэффициентини бўлади.

Энди 1-чизикқа параллел бўлган ва ҚЭ фотоВАХ га уринувчи тўғри чизик тенгламасини аниқлаймиз. У чизик тенгламаси ҳам, $j = aU + b$ кўринишида бўлади. Бу чизикни бурчак коэффициенти a ни аниқлаш учун ҚЭ фотоВАХ дан

$$j_\phi = j_0 \left(\exp \left(\frac{qU}{n'kT} \right) - 1 \right) - j_{kt} \quad (2.24)$$

фойдаланамиз [36; 763–771 б.].

Агар (2.24) фотоВАХ дан кучланиш бўйича ҳосила олиб, уни $U=U_{эф}$ га тенг бўладиган қийматини топсак, a учун қуйидаги ифодани оламиз

$$a = j'_\phi(U_{эф}) = j_0 \frac{q}{n'kT} \exp\left(\frac{qU_{эф}}{n'kT}\right). \quad (2.25)$$

Тўғри чизикларни параллеллик шартига кўра, уларни бурчак коэффициенти бир - бирига тенг бўлади

$$\frac{j_{кт}}{U_{си}} = j_0 \frac{q}{n'kT} \exp\left(\frac{qU_{эф}}{n'kT}\right). \quad (2.26)$$

Бундан фойдаланиб ҚЭ эффектив кучланиши учун ($U_{эф}$)

$$U_{эф} = \frac{n'kT}{q} \ln \frac{j_{кт}}{j_0} \frac{n'kT}{qU_{си}} \quad (2.27)$$

ифодани оламиз.

Эффектив ток кучи зичлигини аниқлаймиз, бунинг учун ҚЭ фотоВАХ даги кучланишга тенг бўлганда, фототок зичлиги ҚЭ эффектив ток зичлигига тенг бўлишидан

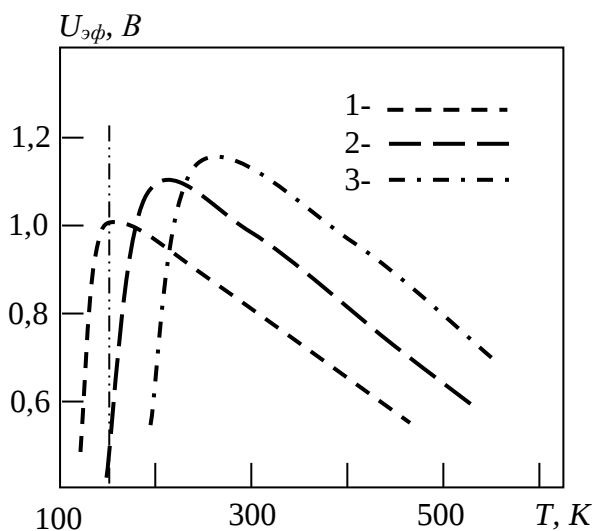
$$j_{эф} = j_0 \left(\exp\left(\frac{qU_{эф}}{n'kT}\right) - 1 \right) - j_{кт}. \quad (2.28)$$

Бу ифодадаги $U_{эф}$ ни ўрнига (2.27) ни қўямиз ва

$$j_{эф} = j_{кт} \left(\frac{n'kT}{qU_{си}} - 1 - \frac{j_0}{j_{кт}} \right) \quad (2.29)$$

эффектив ток кучи зичлигини аниқлаш мумкин бўлган ифодани оламиз.

(2.27) формуладан кўринадик ҚЭ ларининг эффектив кучланиши фотоВАХ ни эффектив қувват аниқланадиган нуктасидаги фотоВАХ нинг ноидеаллик коэффициентига (n') боғлиқ бўлар экан. Аммо, бу ифодадан олинган ҳисоблаш натижаларини (2.8 - расм) кўрсатишича n' ни қиймати 1 дан катта бўлса ҚЭ эффектив кучланишини қиймати уларни салт ишлаш кучланишини қийматидан катта бўлиб қолар экан.



2.8-расм. ҚЭ ларининг эффектив кучланишини температурага боғланиши учун (2.27) формуладан олинган ҳисоблаш натижалари: 1- $n'=1$; 2- $n'=1,1$; ва 3- $n'=1,2$.

Б

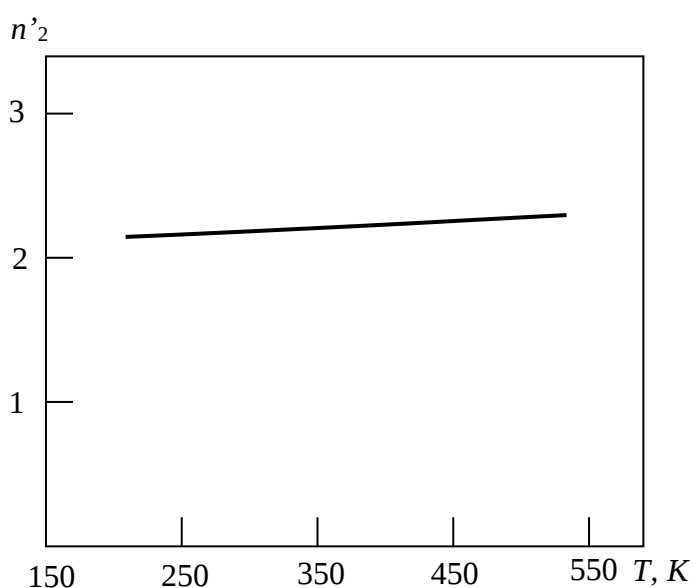
у натижалардан ҚЭ ларининг эффектив кучланиши фотоВАХ нинг эффектив қувват аниқланадиган нуқтасидаги фотоВАХ нинг ноидеаллик коэффициентига боғлиқ бўлмайди деган хулосани чиқариш мумкин.

Юқоридаги ифодалардан фойдаланиб ҚЭ нинг фотоВАХ нинг эффектив ток зичлиги аниқланадиган нуқтасида ноидеаллик коэффициентини ҳароратга боғланишини аниқлайдиган ифодани олиш мумкин.

Бунинг учун (2.27) ва (2.29) формулаларга мос равишда юқоридаги (2.7), (2.14), (2.16) ва (2.20) ифодаларни қўйиб, сўнгра уларни (2.22) қўйсак ҚЭ

фотоВАХ и ноидеаллик коэффицентининг ҳароратга боғланишларини аниқловчи ифодага эга бўламиз.

2.9-расмда эса, фотоВАХ нинг ҚЭ фотогальваник характеристикаларни эффектив қиймати аниқланадиган нуқтаси учун (2.22) формуладан олинган монокристалл кремний асосли ҚЭ учун бажарилган ҳисоблаш натижалари келтирилган. Расмдан кўринадик, ҚЭ лари фотоВАХ ини ноидеаллик коэффиценти $160\text{ K} < T < 500\text{ K}$ оралиқда ҳароратга деярли боғлиқ бўлмас экан яъни $2,1 < n_2' < 2,3$ оралиқдагина ўзгарар экан.



2.9-расм

Ҳисоблашларни $j_{00}=3,468 \cdot 10^{-10}\text{ A/cm}^2$, $U_{0cu} = 0,6287$ $\varphi_0=1,12\text{ В}$, $n_2'=2.5$ ва $\gamma=2 \cdot 10^{-4}\text{ В/К}$ қийматлар учун бажарилди. Аммо, $n_2'=2.5$ бажарилган ҳисоблашда n_2' нинг қиймати нима учун бу қийматдан фарқ қилишини қуйидагича изоҳлаш мумкин. Бизнингча, фотоВАХ ни ҚЭ ининг фотогальваник характеристикаларини эффектив қиймати аниқланадиган нуқтада фототок кучли ўзгаришга учрайди. Шунинг учун ҳароратни ўзгариши билан фотоВАХ нинг ноидеаллик коэффиценти ҳам жуда кичик ўзгаришга учраши мумкин.

Шундай қилиб, ушбу параграфда ҚЭ ларининг фотоВАХ ини ноидеаллик коэффицентини ҳароратга боғланиши тадқиқ қилинди ва бу катталикини

қиймати фотоВАХ сининг турли нукталари учун турли қийматларга эга бўлиши ва бу қиймат $160\text{ K} < T < 500\text{ K}$ ораликда ҳароратга деярли боғлиқ бўлмаслиги аниқланди.

§3.3. Қуёш элементларининг эффектив кучланиши, токи зичлиги ва қуввати зичлиги ҳамда фотоВАХ нинг ноидеаллик коэффиценти

Гидрогенизацияланган аморф кремний ($a\text{-Si:H}$) асосидаги ҚЭ ларининг асосий хусусиятлари сифатида: уларни катта юзаларда тайёрлаш мумкинлиги ва бу материалнинг ишчи қатламининг монокристалл яримўтказгичларникига нисбатан оптик ютилиш коэффиценти ва фотосезгирлигининг катта эканлигини кўрсатиш мумкин. $a\text{-Si:H}$ нинг оптик ютилиш коэффиценти ва фотосезгирлигининг катталиги бу материал структурасининг тартибсизлиги ва унда водороднинг мавжудлиги билан белгиланади. Бу борада мақсадли илмий тадқиқотларни амалга ошириш, жумладан, гидрогенизацияланган аморф кремний асосли ҚЭ ларини;

фотогалваник характеристикаларининг ҳароратга боғлиқлигини таҳлили қилиш ва уларни оптималлаштириш;

уларни самарали ишлаш ҳарорат интервалини аниқлаш;
шу соҳани долзарб муаммоларидан ҳисобланади.

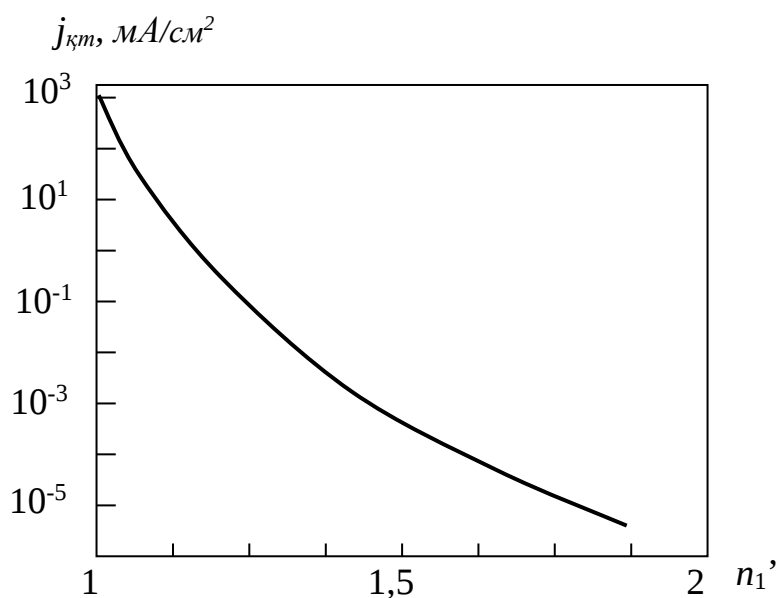
[103/1] ишда U_{cu}, j_{km} ва n' лар бир-бирига боғлиқ бўлмаслиги ва шунининг учун уларни бир-бирига боғланишларини алоҳида ўрганиш мумкин эканлиги кўрсатилган.

Шунинг учун бу параграфда ҚЭ ларининг қисқа туташув токи зичлигини, эффектив кучланиш, эффектив ток зичлиги ва эффектив қувватларни ҳароратга боғланиши учун келтириб чиқарилган янги ифодалар асосида, бу параметрларни фотоВАХ сини ноидеаллик коэффицентиға боғланишини назарий тадқиқ қилинди.

Яримўтказгичлар асосида тайёрланадиган Шоттки тўсиқли ҚЭ ларининг ноидеаллик коэффиценти $n' \approx 1,0-2,5$ ораликда, $p\text{-}n$ ва $p\text{-}i\text{-}n$ асосли ҚЭ

лариники эса $n' \approx 1,0-3,5$ оралиқда ётади [2].

3.9 - расмда ҚЭ ларининг қисқа туташув токи зичлигига фотоВАХ нинг ноидеаллик коэффицентини таъсирини аниқлаш бўйича (3.11) формуладан олинган ҳисоблаш натижалари келтирилган.



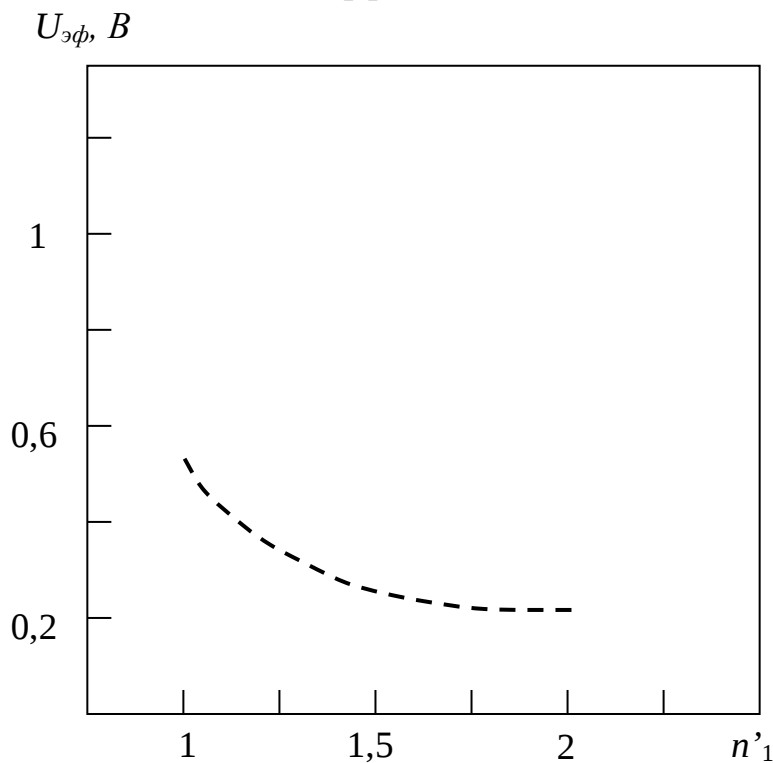
3.9 - расмда ҚЭ ларининг қисқа туташув токига фотоВАХнинг ноидеаллик коэффицентини таъсирини аниқлаш бўйича (3.11) формуладан олинган ҳисоблаш натижалари келтирилган. $U_{0cu}=0.31$ В, $\varphi=1.16$ В, $j_{00}=1.28 \cdot 10^{-4}$ мА учун бажарилди.

$U_{0cu}=0.31$ В, $\varphi=1.16$, В, $j_{00}=1.28 \cdot 10^{-4}$ мА учун бажарилди. Ҳисоблашлар бу боғланиш фотоВАХ нинг сифат коэффиценти ортиб бориши билан қисқа туташув токи зичлиги камайиб боришини ва бу боғланиш жуда кучли бўлишини кўрсатди.

Олдинги бобда кўрдикки, ҚЭ ларининг салёт ишлаш кучланиши фотоВАХ нинг ноидеаллик коэффицентига умуман боғлиқ бўлмайди. Эффе́ктив кучланиш эса, ҚЭ ларининг фотоВАХ сининг эффе́ктив қувват аниқланадиган нуқтасидаги фотоВАХ инг ноидеаллик коэффицентига боғлиқ бўлмайди, аммо бу параметр учун келириб чиқарилган формулада (3.13) қисқа

туташув токи зичлиги мавжуд бўлганлиги учун, бу параметр ҳам фотоВАХ нинг қисқа туташув токи зичлиги аниқланадиган нуқтасида ноидеаллик коэффициентига боғлиқ бўлади. Ток зичлигининг ва қувватнинг эффектив қийматлари эса, ҚЭ ларининг фотоВАХ сининг эффектив қувват аниқланадиган нуқтасидаги фотоВАХ инг ноидеаллик коэффициентига ҳам, қисқа туташув токи аниқланадиган нуқтасидаги фотоВАХ инг ноидеаллик коэффициентига ҳам, боғлиқ бўлади.

3.10- расм. ҚЭ ларининг эффектив кучланишининг (3.13) формуладан ҳисобланган фотоВАХ нинг қисқа туташув токи аниқланадиган нуқтасидаги фотоВАХ нинг ноидеаллик коэффициентига боғланиши келтирилган.

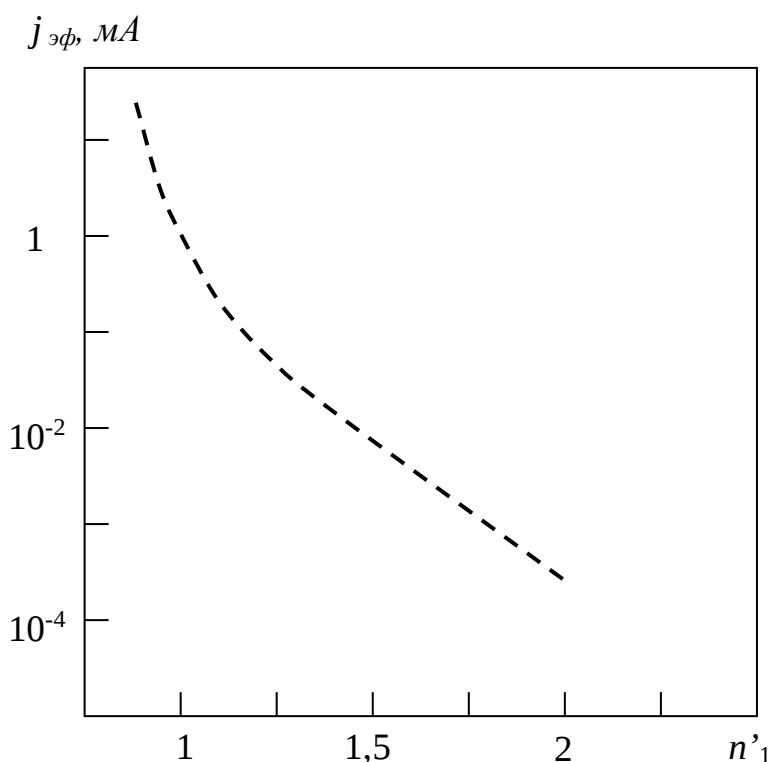


3.10- расм. ҚЭ ларининг эффектив кучланишининг фотоВАХ нинг қисқа туташув токи аниқланадиган нуқтасидаги фотоВАХ нинг ноидеаллик коэффициентига боғланиши.

Ҳисоблашларни $T_0=273\text{ K}$, $T=300\text{ K}$, $j_0=1,5 \cdot 10^{-10}\text{ A}$, $U_{cu}=0,65\text{ B}$, $\varphi_0=1,12\text{ B}$ ва $\gamma=5 \cdot 10^{-4}\text{ B/K}$ қийматлар учун бажарилган.

Расмдан кўринадик, фотоВАХ нинг қисқа туташув токи аниқланадиган нуқтасидаги фотоВАХ нинг ноидеаллик коэффициенти катталашиб бориши билан эффектив кучланиш камайиб борар экан.

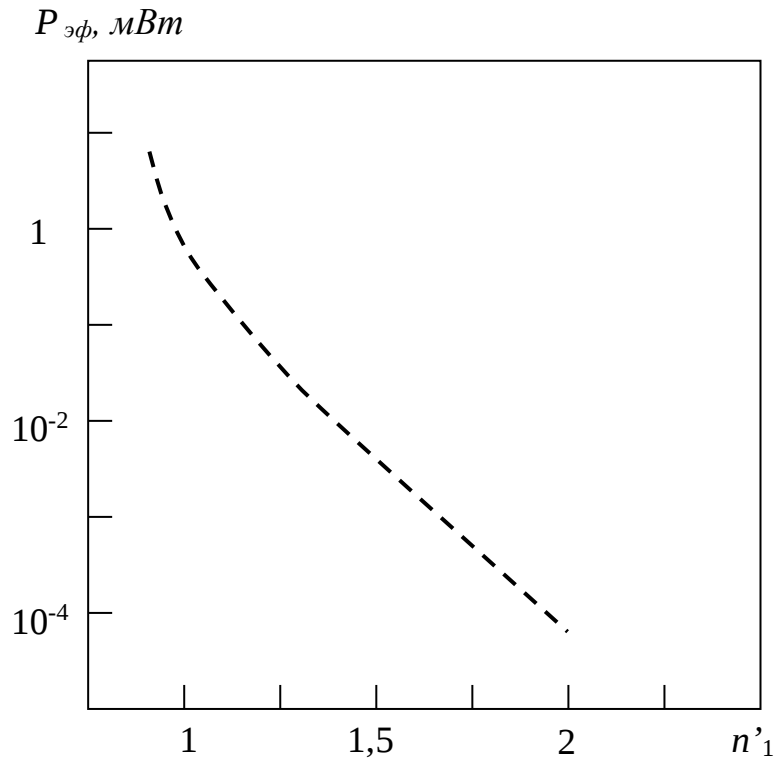
3.11-расмда ҚЭ ларининг эффектив токини (3.14) формуладан ҳисобланган фотоВАХ нинг қисқа туташув токи аниқланадиган нуқтасидаги фотоВАХ нинг ноидеаллик коэффициентига боғланиши келирилган.



3.11- расм. ҚЭ ларининг эффектив токини фотоВАХ нинг қисқа туташув токи аниқланадиган нуқтасидаги фотоВАХ нинг ноидеаллик коэффициентига боғланиши. Ҳисоблашларни $T_0=273 K$, $T=300 K$, $j_0=1,5 \cdot 10^{-10} A$, $U_{cu}=0,65 B$, $\varphi_0=1,12 B$ ва $\gamma=5 \cdot 10^{-4} B/K$ қийматлар учун бажарилди.

Ҳисоблашларни $T_0=273 K$, $T=300 K$, $j_0=1,5 \cdot 10^{-10} A$, $U_{cu}=0,65 B$, $\varphi_0=1,12 B$ ва $\gamma=5 \cdot 10^{-4} B/K$ қийматлар учун бажарилди. Расмдан кўринадики, ҚЭ ларининг эффектив токини фотоВАХ нинг қисқа туташув токи аниқланадиган нуқтасидаги фотоВАХ нинг ноидеаллик коэффициентига боғланиши жуда кучли бўлар экан. Ноидеаллик коэффициенти катталашиб борган сари эффектив ток экспоненциал равишда камайиб ноидеаллик коэффициентини қиймати 1 ва 2 оралиғида ўзгарганда токни қиймати 140,1 мА дан $9,05 \cdot 10^{-4}$ мА оралиқда ўзгарар экан.

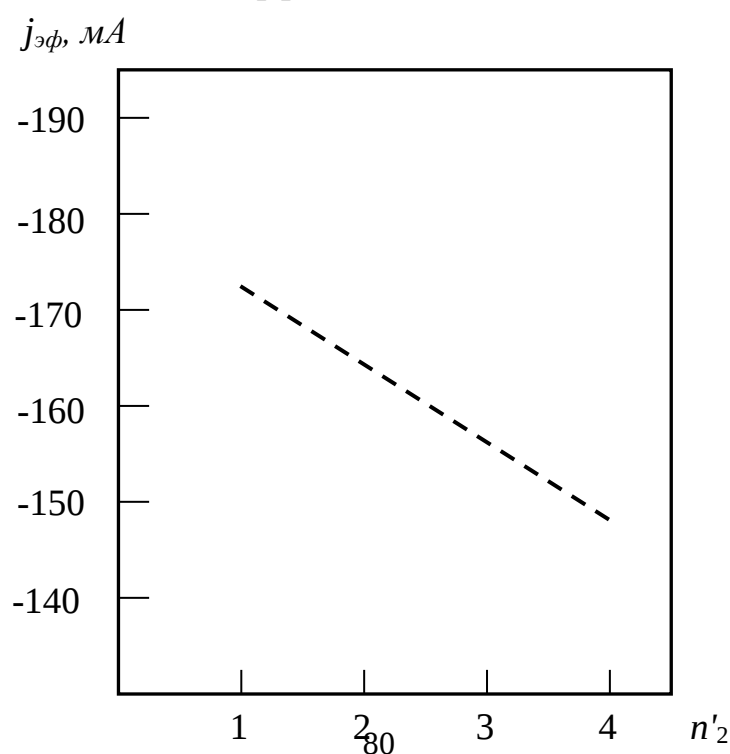
3.12- расмда ҚЭ ларининг эффектив қувватини фотоВАХ нинг қисқа туташув токи аниқланадиган нуқтасидаги фотоВАХ нинг ноидеаллик коэффициентига боғланиши учун (3.15) формуладан олинган ҳисоблаш натижалари келтирилган.



3.12- расм. ҚЭ ларининг эффектив қувватини фотоВАХ нинг қисқа туташув токи аниқланадиган нуқтасидаги фотоВАХ нинг ноидеаллик нуқтасига боғланиши. Ҳисоблашларни $T_0=273\text{ K}$, $T=300\text{ K}$, $j_0=1,5 \cdot 10^{-10}\text{ A}$, $U_{cu}=0,65\text{ B}$, $\varphi_0=1,12\text{ B}$ ва $\gamma=5 \cdot 10^{-4}\text{ B/K}$ қийматлар учун бажарилди.

Бу боғланиш ҳам, жуда кучли бўлиб, ноидеаллик коэффиценти катталашиб борган сари эффектив ток экспоненциал равишда камайиб ноидеаллик коэффиценти қиймати 1 ва 2 оралиғида ўзгарганда эффектив қувват қиймати 75,1 мВт дан $2,08 \cdot 10^{-4}$ мВт оралиқда ўзгарар экан. Ҳисоблашларни $T_0=273$ К, $T=300$ К, $j_0=1,5 \cdot 10^{-10}$ А, $U_{cu}=0,65$ В, $\varphi_0=1,12$ В ва $\gamma=5 \cdot 10^{-4}$ В/К қийматлар учун бажарилди. Бу ҳисоблашлардан кўринадики, фотоВАХ нинг ноидеаллик коэффиценти катталашганда ҚЭ ларининг фотогальваник характеристикаларини эффектив қийматлари камайар экан. Бу эса ҚЭ ларининг ФИК ларни камайишига олиб келади.

3.13-расмда ҚЭ ларининг эффектив токини (3.14) формула ёрдамида ҳисобланган фотоВАХ нинг эффектив қувват аниқланадиган нуқтасидаги фотоВАХ нинг ноидеаллик коэффицентиға боғланиши келтирилган.

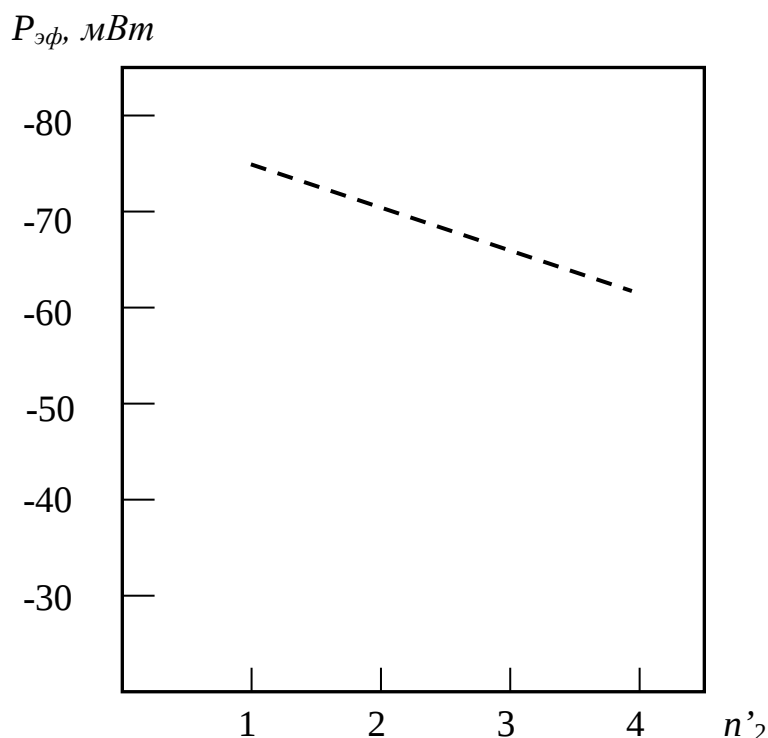


3.13-расм. ҚЭ ларининг эффектив токини фотоВАХ нинг ноидеаллик коэффицентиға боғланиши.

Ҳисоблашларни $T_0=273\text{ K}$, $T=300\text{ K}$, $j_0=9\cdot 10^{-9}\text{ A}$, $\varphi_0=1,12\text{ B}$, $U_{cu}=\varphi_0/2\text{ B}$, $\gamma=5\cdot 10^{-4}\text{ B/K}$ ва $n_1'=1,00239$ қийматлар учун бажарилди.

Бу боғланиш чизикли бўлиб n_2' ни қиймати 1 дан 4 гача ортиб борганда $j_{\text{эф}}=(173,8 - 146,48)\text{ mA}$ оралиқда камайар экан. Ҳисоблашларни $T_0=273\text{ K}$, $T=300\text{ K}$, $j_0=9\cdot 10^{-9}\text{ A}$, $\varphi_0=1,12\text{ B}$, $U_{cu}=\varphi_0/2\text{ B}$, $\gamma=5\cdot 10^{-4}\text{ B/K}$ ва $n_1'=1,00239$ қийматлар учун бажарилди.

3.14-расмда эса ҚЭ ларининг эффектив қувватини (3.15) формуладан олинган фотоВАХ нинг эффектив қувват аниқланадиган нуқтасидаги фотоВАХ нинг ноидеаллик коэффициентига боғланиши келтирилган. Бу боғланиш ҳам чизикли бўлиб ноидеаллик коэффициенти 1 дан 4 гача ортиб борганда ҚЭ ларнинг эффектив қуввати $P_{\text{эф}}=(76,6 - 64,54)\text{ mW}$ оралиқда камайар экан. Ҳисоблашларни $T_0=273\text{ K}$, $T=300\text{ K}$, $j_0=9\cdot 10^{-9}\text{ A}$, $\varphi_0=1,12\text{ B}$, $U_{cu}=\varphi_0/2\text{ B}$, $\gamma=5\cdot 10^{-4}\text{ B/K}$ ва $n_1'=1,00239$ қийматлар учун бажарилди.



3.14-расм. ҚЭ ларининг эффектив кувватини фотоВАХ нинг ноидеаллик коэффициентига боғланиши. Ҳисоблашларни $T_0=273\text{ K}$, $T=300\text{ K}$, $j_0=9\cdot 10^{-9}\text{ A}$, $\varphi_0=1,12\text{ B}$, $U_{cu}=\varphi_0/2\text{ B}$, $\gamma=5\cdot 10^{-4}\text{ B/K}$ ва $n_1'=1,00239$ қийматлар учун бажарилди.

Бу натижалардан қуйидаги хулосани чиқариш мумкин. ҚЭ ларининг фотоВАХ нинг ноидеаллик коэффициентини ҳар қандай ортиши фотогальваник характеристикаларни қийматларини камайишига олиб келар экан. Бу эса ҚЭ ларнинг ФИК ини камайишига сабаб бўлади.

IV БОБ. ҚУЁШ ЭЛЕМЕНТЛАРИНИНГ ФОЙДАЛИ ИШ КОЭФФИЦИЕНТИ

§4.1. Қуёш элементларини ёруғлик тушгандаги вольт-ампер характеристикасини тўлдириш коэффициентини ҳисоблаш

Яримўтказгичли қурилмалар хусусан ҚЭ фотоэлектрик параметрларига автоматлаштирилган тез ўлчов назорат тизимини кенг тадбиқ этишда, бу параметрларни аниқлашнинг янада универсал ва қулай ҳисоблаш усули керак. Шунинг учун ушбу параграфда ҚЭ нинг ФИК учун яримэмпирик усулда содда

ва бу параметрни ҚЭ ларининг бошқа фотогальваник характеристикаларига боғланишларини аниқлаш имкониятини яратадиган ифода олинган. Олинган ифода ёрдамида ҚЭ нинг ФИК ини температура, потенциал тўсиқ баландлиги каби апарметрларга боғланишини тушунтира олиши кўрсатилган.

ҚЭ ларининг фойдали иш коэффиценти (ФИК)

$$\eta = ff \frac{U_{cu} j_{km}}{P_0 S} \quad (4.1)$$

ифодадан аниқланади. Бу ерда ff -ҚЭ лари фотоВАХ сининг тўлдириш коэффиценти, P_0 - ҚЭ юзасига тушаётган қуёш радиациясининг қуввати, S - ҚЭ нинг ишчи юзаси.

ҚЭ ларининг фотоВАХ сининг тўлдириш коэффиценти

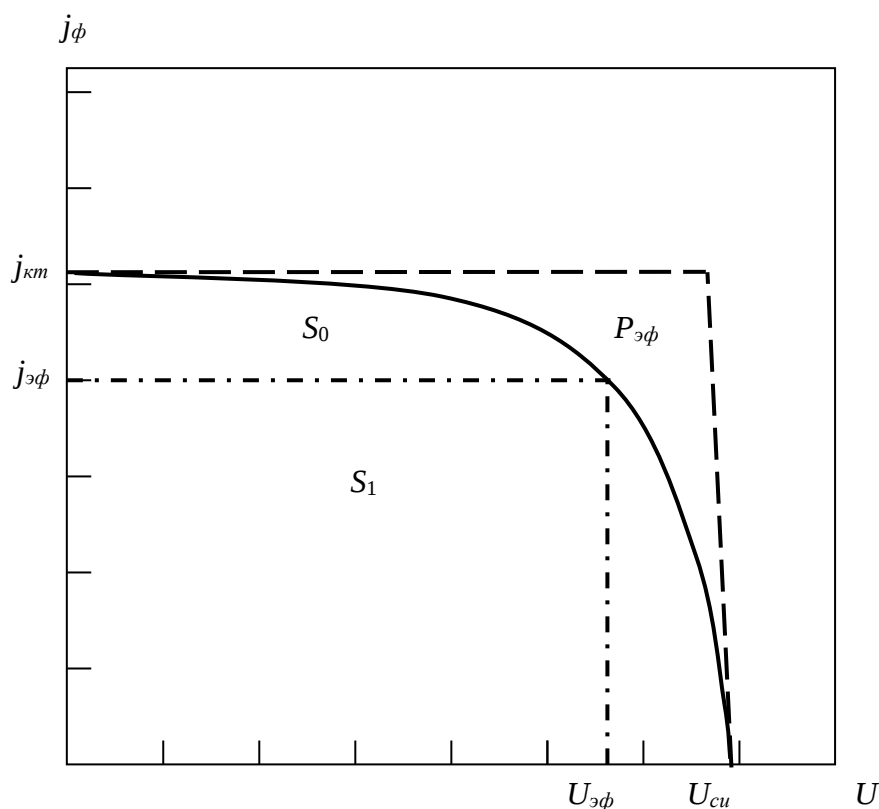
$$ff = \frac{S_1}{S_0} = \frac{U_{эф} j_{эф}}{U_{cu} j_{km}} \quad (4.2)$$

формуладан аниқланади. Бу ердаги S_1 – ҚЭ ларининг кучланиши ва токи зичлигини эффектив қийматлари билан аниқланадиган тўғри тўрт бурчак юзаси, S_0 – эса ҚЭ ларининг салът ишлаш кучланиши ва қисқа туташув токи зичлиги билан аниқланадиган тўғри тўрт бурчак юзаси. Бу ифодалардан фойдаланиб ҚЭ ларининг ФИК ни қуйидаги кўринишда ёзиш мумкин.

$$\eta = \frac{U_{эф} j_{эф}}{U_{cu} j_{km}} \frac{U_{cu} j_{km}}{P_0 S} = \frac{U_{эф} j_{эф}}{P_0 S} = \frac{P_{эф}}{P_0 S} \quad (4.3)$$

(4.1) формуладан кўринадики, ҚЭ ларининг ФИК ни аниқловчи асосий параметрлар бу, уларни салът ишлаш кучланиши, қисқа туташув токи зичлиги ва фотоВАХ ни тўлдириш коэффицентлари ҳисобланар экан.

Турли ёритилганликдаги фотоВАХдан фойдаланиб, фотоэлементнинг оптимал ишлаш режимини яъни фотоВАХдаги «энг катта қувватни» аниқловчи нуқта олинади. Қуёш элементини оптимал режимда ишлаш нуқтаси фотоВАХда бўлган энг катта юзасига мос келади ва шу юзага мос келувчи қувват эффектив қувват деб аталади (4.1-расм).



4.1-расм. ҚЭ нинг тўртинчи чорак қисмидаги фотовольт-ампер характеристикасидан фотоВАХ нинг тўлдириш коэффициентини аниқлаш усули. Бу ерда туташ чизик ҚЭ ларининг тажрибадан аниқланган фотоВАХ си.

Бу расмда j_{kt} —қисқа туташув токи зичлиги, $j_{\text{эф}}$ —куёш элементларининг эффектив токи зичлиги, $U_{\text{эф}}$ —куёш элементларининг эффектив кучланиши, $U_{\text{си}}$ —сальт ишлаш кучланиши, $P_{\text{эф}}$ —куёш элементларининг эффектив қувватини зичлиги.

Куёш элементларининг эффектив қуввати дейилганда, куёш элементининг ишчи сиртига тушаётган куёш нурлари оқими тўлиқ қувватининг куёш элементи томонидан оптимал равишда ўзлаштирилиши тушунилади [11].

Биз қуйида куёш элементининг фотоВАХ сининг тўлдириш коэффициентини аниқлайдиган формулани келтириб чиқарамиз. Бунинг учун куёш элементининг фотоВАХ сидан фойдаланамиз. ҚЭ ларининг j_{kt} - қисқа туташув токи зичлиги, $U_{\text{си}}$ - сальт ишлаш кучланиши, $j_{\text{эф}}$ — эффектив ток кучи зичлиги ва $U_{\text{эф}}$ — эффектив кучланишларни аниқловчи ифодаларни топсак,

фотоВАХ нинг тўлдириш коэффициентини аниқлаш мумкин бўлган формулага эга бўламиз. Бу катталикларни қийматларини аниқловчи формулаларни иккинчи ва учинчи бобда келтириб чиқарган эдик. Уларни қуйидаги кўринишларда ёзиш мумкин:

$$U_{cu} = (U_{cu0} - \varphi) \frac{T}{T_0} + \varphi, \quad (4.9)$$

$$j_{\kappa m} = j_0 \left[\exp \left[\frac{q\varphi}{n'_1 k T_0} \left(\frac{U_{cu0}}{\varphi} - 1 + \frac{T_0}{T} \right) \right] - 1 \right]. \quad (4.10)$$

$$U_{\varepsilon\phi} = \frac{kT}{q} \ln \frac{j_{\kappa m}}{j_0} \frac{kT}{qU_{cu}} \quad (4.11)$$

$$j_{\varepsilon\phi} = j_{\kappa m} \left(\frac{n'_2 kT}{qU_{cu}} - 1 - \frac{j_0}{j_{\kappa m}} \right) \quad (4.12)$$

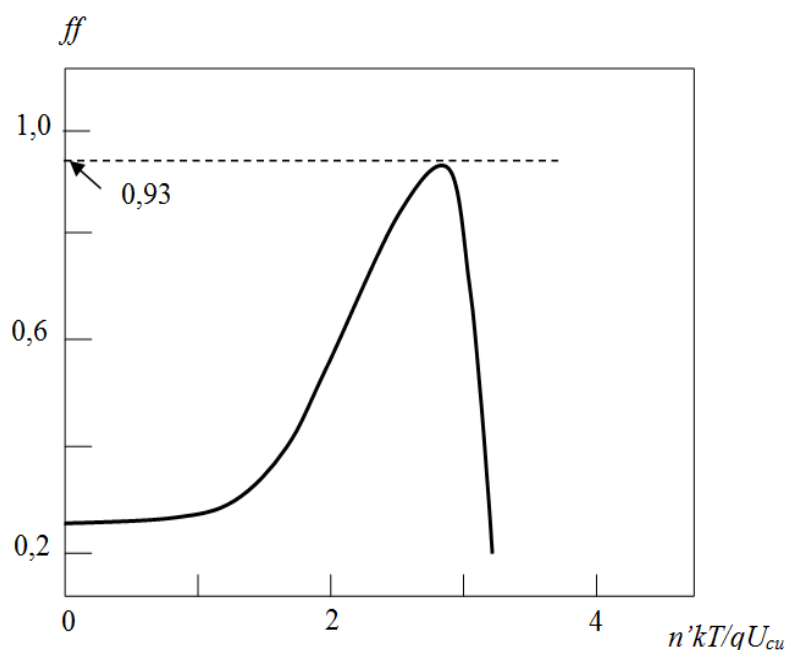
Бу ифодаларни (4.2) га қўйсак фотоВАХ ни тўлдириш коэффициентини аниқловчи ифодани оламиз. Бу ифодалардаги j_0 - тўйиниш токи зичлигини қуйидаги кўринишда ёзиш мумкин эканлигини олдинги бобларда кўрсатиб ўтилган эди.

$$j_0 = j_{00} \exp \left(- \frac{q\varphi}{k} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right), \quad (4.13)$$

Бу ифодаларни (4.2) га қўйсак фотоВАХ ни тўлдириш коэффициентини аниқловчи ифодани оламиз.

$$ff = \frac{\frac{kTj_{\kappa m}}{q} \left(1 + \frac{j_0}{j_{\kappa m}} - \frac{n'_2 kT}{qU_{cu}} \right) \ln \frac{j_{\kappa m}}{j_0} \frac{kT}{qU_{cu}}}{((U_{cu0} - \varphi) \frac{T}{T_0} + \varphi) j_0 \left[\exp \left[\frac{q\varphi}{n'_1 k T_0} \left(\frac{U_{cu0}}{\varphi} - 1 + \frac{T_0}{T} \right) \right] - 1 \right]} \quad (4.14)$$

[106] ишларимизда фотоВАХ ни тўлдириш коэффициентини ҳароратга боғланиши учун (4.14) формуладан олинган ҳисоблаш натижалари, идеал ҚЭ лари учун бу параметрни қиймати 0,93 дан катта бўлиши мумкин эмаслигини кўрсатди (4.2 - расм).



4.2-расм. Аморф яримўтказгич асосли ҚЭ ларининг фотоВАХ ини тўлдириш коэффициентини $n'kT/qU_{cu}$ катталиқка боғланиши.

Бундан идеал ҚЭ ларида ҳам ютилган фотонларни энергиясини 7% йўқотилади деб хулоса чиқариш мумкин. Тажрибалардан аниқланадиган фотоВАХ ни тўлдириш коэффициентини максимал қиймати 0,89-0,90 бўлиши аниқланган бу қийматлардан кўринадикки, ноидеал ҚЭ ларида ютилган фотонларни энергиясини камида 10% йўқотилар экан.

§4.2. Қуёш элементлари фото вольт-ампер характеристиканинг тўлдириш коэффициентига ҳароратни таъсири

Маълумки, қуёш элементларининг (ҚЭ) самарадорлиги қуёш радиацияси энергиясини электр энергиясига эффектив айлантириши билан аниқланади [20; 76-79 б.]. Буни аниқлайдиган асосий катталиқлардан бири ҚЭ дан чиқиши мумкин бўлган эффектив ($P_{эф}$) қувват ҳисобланади, уни қуйидаги ифодадан аниқланади

$$P_{эф} = j_{эф} U_{эф}, \quad (4.11)$$

бу ерда $j_{эф}$ -фототок ва $U_{эф}$ - кучланишларини эффектив қийматлари.

ҚЭ ларини эффектив қуввати ҳароратга боғланишини кўрсатувчи тажриба натижалари келтирилган. Аммо, ҳозирги пайтгача бу боғланиш-ларни

аниқловчи ифодалар келтириб чиқарилмаган. Шунинг учун ушбу ишда, яримэмпирик усулда, ҚЭ чиқувчи қувватни эффектив қиймати учун янги формула келтириб чиқарилган. Бу формула эффектив қувватни ҳаро-ратга боғланишини кўрсатувчи тажриба натижаларини тушунтира олиши кўрсатилган.

Ҳисоблашларни бажаришда ҚЭ чиқувчи фототок ва кучланишни эффектив қийматларини учун

$$U_{ef} = \frac{nkT}{e} \ln \frac{I_{qt}}{I_0} \frac{nkT}{eU_{si}} \quad (4.12)$$

$$I_{ef} = I_{qt} \left(\frac{nkT}{eU_{si}} - 1 - \frac{I_0}{I_{qt}} \right) \quad (4.13)$$

$$j_{qt} = j_{00} \exp \left[\frac{e\varphi}{k} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right] \left[\exp \left[\frac{e\varphi}{nkT_0} \left(\frac{U_{0si}}{\varphi} - 1 + \frac{T_0}{T} \right) \right] - 1 \right]. \quad (4.14)$$

ифодалар олинган. Бу ерда j_0 - диод структурани тўйиниш токи зичлиги, n – ҚЭ лари фотоВАХ ни сифат (ноидеаллик) коэффиценти, e -электрон заряди, k -Больцман доимийси, T -ҳарорат, T_0 -хона ҳароратси, j_{00} -хона ҳароратидаги тўйиниш токи зичлиги, U_{0cu} -хона ҳароратидаги салът ишлаш кучланиши, φ -ҚЭ потенциал тўсиғи баландлиги.

Энди ҚЭ лари фотоВАХ ини тўлдириш коэффиценти ҳароратга боғланишини кўриб чиқамиз.

Маълумки, ҚЭ ларини j_{km} -қисқа туташув токи зичлиги, j_0 -тўйиниш токи зичлиги ва U_{cu} -салът ишлаш кучланишлари ҳароратга боғлиқ бўлади. Бу боғланишларни ифодаловчи тажриба натижаларини тушунтирувчи формуларни (3.11)-(3.13) кўринишларда ёзиш мумкин

Маълумки, куёш элементларини фотоВАХсини тўлдириш коэффиценти $P_{эф}$ — эффектив қувватни $P_{max}=J_{km}U_{cu}$ максимал қувватга нисбати билан аниқланади

$$ff = \frac{I_{ef} U_{ef}}{I_{qt} U_{si}}. \quad (4.15)$$

Бу ифодага (4.12) ва (4.13) ларни қўйсак, тўлдириш коэффиценти учун қуйидаги натижани оламиз

$$ff = \frac{nkT}{eU_{si}} \ln \frac{I_{qt}}{I_0} \frac{nkT}{eU_{ef}} \left(1 + \frac{I_0}{I_{qt}} - \frac{nkT}{eU_{ef}} \right). \quad (4.16)$$

(4.12)-(4.14) ларни (4.15) га қўйсак, бу ифодада фақат, ҳароратга боғлиқ бўлиши мумкин бўлган φ ва n катталиклар қолади. Маълумки, ҚЭ ларини потенциал тўсиғи баландлигини ҳароратга боғланиши эса учинчи бобда кўрсатилган бўлиб (3.27) кўринишда ёзилади. Бу формуладаги φ_0 - қуёш элементининг $T=0$ К ҳароратдаги потенциал тўсиғининг баландлиги.

Маълумки, ҚЭ нинг фотоВАХидан фойдаланиб, салът ишлаш кучланишини ҳароратга боғланиши учун

$$U_{cu} = \frac{nkT}{e} \ln \left(\frac{j_{km}}{j_0} + 1 \right) \quad (4.17)$$

ифодани олиш мумкин. Кўриниб турибдики, бу ифодадан ҚЭ салът ишлаш кучланиши, уларни фотоВАХ ни сифат коэффицентиға боғлиқ бўлар экан. Буни текшириб кўриш учун, $AlGaAs-GaAs$ асосли ҚЭ ларининг салът ишлаш кучланиши ҳароратга боғланишини кўрсатувчи тажриба натижаларидан фойдаланилди (2.9-расм).

[10; 418 б.] ишда яримўтказгич асосли ҚЭ ни салът ишлаш кучланиши учун келтирилган қуйидаги ифода

$$U_{cu} = [\ln j_{km} - \ln(e\mu_c N(E_c)E_s)] \frac{nkT}{e} + n\varphi \quad (4.18)$$

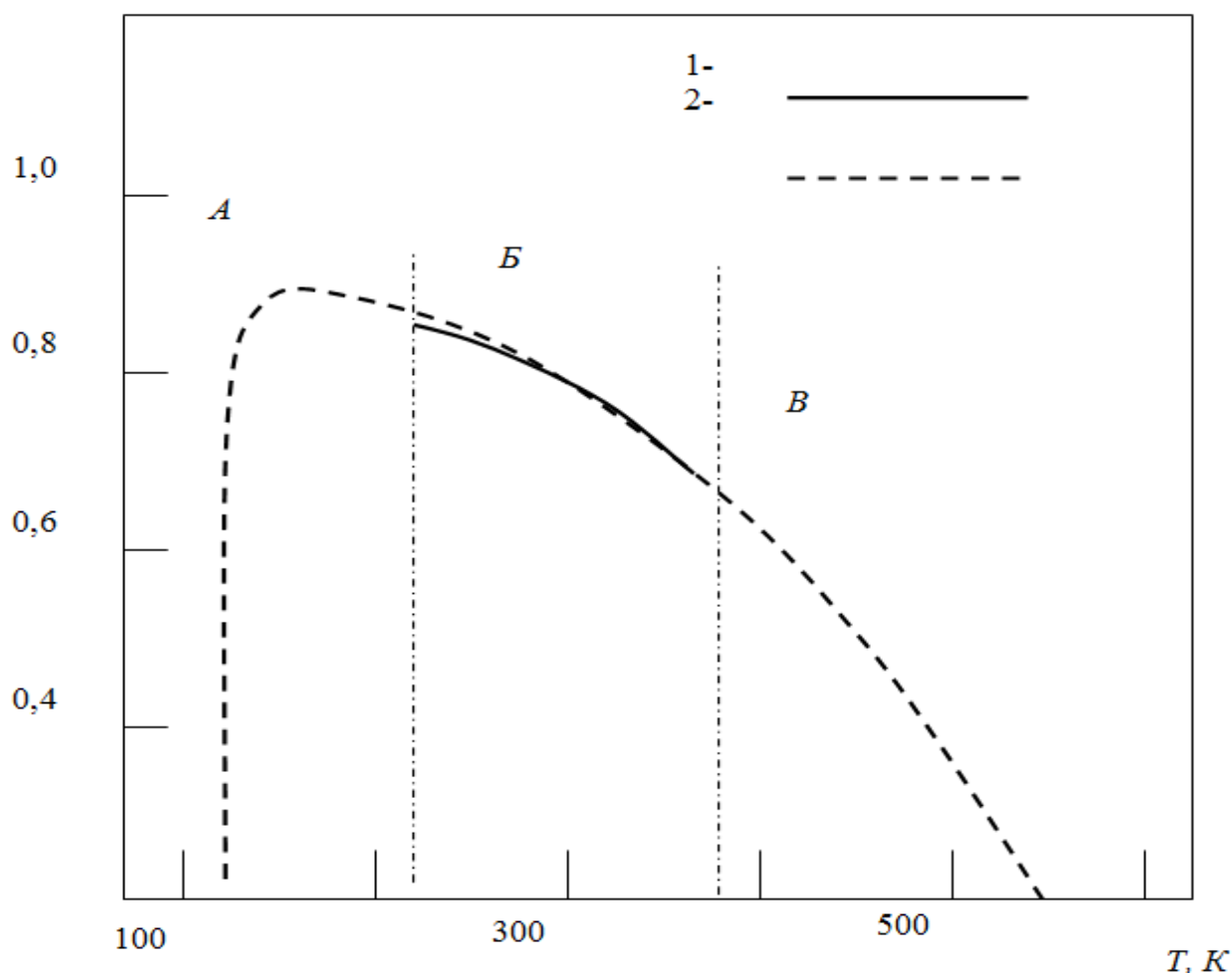
келтирилган. Ҳисоблашлар бу ифода ҳам фақат $n=1$ бўлгандагина тажриба натижаларини тушунтира олишини кўрсатди. (4.17) ва (4.18) ифодаларни солиштириб бажарилган ҳисоблашлардан олинган юқоридаги натижалар, салът ишлаш кучланиши фотоВАХ ни сифат коэффицентиға боғлиқ бўлмаслигини кўрсатади.

Маълумки, фотоВАХ ни сифат коэффиценти диод структурадан ўтадиган электр токини тури билан аниқланди. Ҳақиқатдан ҳам, фотоВАХ ни салът ишлаш кучланиши аниқланадиган нуқтасида фототок нольга тенг

бўлади. Шунинг учун, фотогальваник характеристикаларни шу нуқтадаги қийматлари фотоВАХ ни сифат коэффициентига боғлиқ бўлмаслиги керак.

(4.12)-(4.14) ифодаларни (4.16) га қўйиб, ҚЭ фотоВАХ нинг тўлдириш коэффициентига ҳароратни таъсирини аниқловчи муносабатларни олиш мумкинлиги кўриниб турибди. Бу ифодалардан фотоВАХ нинг тўлдириш коэффициентини ҳароратга боғланишини ўрганиш учун бажарилган ҳисоб-

ff



4.4 -расм. Кристалл *Si* асосли ҚЭ фотоВАХ нинг тўлдириш коэффициентини температурага боғланишини кўрсатувчи 1-тажриба ва 2-ҳисоблаш натижалари.

лашларни натижалари улар тенг кучли эканлигини кўрсатди.

4.4-расмда кристалл *Si* асосли ҚЭ фотоВАХ нинг тўлдириш коэффициентини ҳароратга боғланишини кўрсатувчи тажриба ва (4.16) ифодадан олинган ҳисоблаш натижалари келтирилган. Ҳисоблаш натижалари $\varphi_0=1,22$ В, $\gamma=2 \cdot 10^{-4}$ В/К ва $n=1,002$ бўлганда тажрибага мос келиши (*B* соҳа) аниқланди.

Расмдан (2.35) ифода ҚЭ нинг фотоВАХ тўлдириш коэффициентини ҳароратга боғланишини кўрсатувчи тажриба натижаларини тўла тушунтириши ва уни тўлдириши (A ва B соҳалар) кўриниб турибди. Бундан ташқари ҳисоблашлар кристалл Si асосли ҚЭ фотоВАХ нинг тўлдириш коэффициенти $T=115$ К да максимумга ($ff=0,88$) эга бўлишини, $T<112$ К ва $T>550$ К ҳароратларда нольга тенг бўлишини кўрсатди.

Шундай қилиб, ушбу ишда бажарилган ҳисоблашлар орқали:

Тажриба ва ҳисоблаш натижаларини солиштириб ҚЭ ларининг салът ишлаш кучланиши уларни фотоВАХ ни сифат коэффициентиға боғлиқ бўлмаслиги аниқланди.

ҚЭ лари фотоВАХ ни тўлдириш коэффициентини ҳароратга боғланиши учун тажриба натижаларини тушунтира оладиган формула келтириб чиқарилди.

Кристалл Si асосли ҚЭ лари фотоВАХ ни тўлдириш коэффициентини $T=115$ К да максимумга ($ff=0,88$) эга бўлишини, паст $T<112$ К ва юқори $T>550$ К ҳароратларда нольга тенг бўлиши кўрсатилди.

4.1-жадвалда юзаси 4 см^2 бўлган кремний асосли экспериментал ҚЭ нинг фотоэлектрик параметрларини ҳароратга боғланиши ($P_0=140\text{ мВт/см}^2$) лари келтирилган.

1-жадвал

**Юзаси 4 см² бўлган кремний асосли экспериментал ҚЭ иннинг
фотоэлектрик параметрларини хароратга боғланиши ($P_0=140$ мВт/см²).**

№	$t, ^\circ\text{C}$	T, K	U_{cu}, B	I_{km}, mA	ff	$\eta, \%$
1	-70	203	0,77	126,7	0,839	14,20
2	-60	213	0,75	127,4	0,833	13,72
3	-50	223	0,73	128,0	0,830	13,25
4	-40	233	0,71	128,5	0,827	12,47
5	-30	243	0,69	128,95	0,821	12,30
6	-20	253	0,67	129,35	0,812	11,82
7	-10	263	0,65	129,75	0,800	11,35
8	0	273	0,63	130,155	0,785	10,87
9	10	283	0,61	130,65	0,767	10,40
10	20	293	0,59	131,0	0,746	9,92
11	30	303	0,57	131,35	0,722	9,45
12	40	313	0,55	131,7	0,695	8,97
13	50	323	0,53	132,0	0,665	8,50
14	60	333	0,51	132,2	0,632	8,02
15	70	343	0,49	132,4	0,596	7,55

§4.3. Қуёш энергиясини айлантиришнинг ФИК ва уни ҳарорат ва ноидеаллик коэффицентига боғланиши

Яримўтказгичли қурилма ҚЭ сифатида эффектив ишлаши учун бажарилиши керак бўлган шартларни кўриб чиқайлик. Биринчидан, ҳар қандай муҳитга ўтаётган ёруғлик нурининг бир қисми ортга қайтади. Шунинг учун ҚЭ юзасини шундай танлаш керакки, тушаётган ёруғликнинг асосий қисми ҚЭ ичига ўтиши керак. Бунинг учун ҳозирги пайтда каскадли ҚЭ ларидан фойдаланилади. Каскадли ҚЭ лари қаватли ҚЭ ларидан иборат. Унинг биринчи қаватида E_g – таъқиқланган зонаси кенглиги каттароқ бўлган яримўтказгичдан ясалган ҚЭ бўлиб, бу қатлам тўлқин узунлиги каттароқ нурларни ютади. Кейинги қатламда эса уз навбатида ўртача тўлқин узунлигидаги нурлар ютилса, учинчи қатламда катта тўлқин узунликка эга бўлган нурлар ютилади [107/9].

Иккинчидан эса, ҳар қандай модда ҳам ёруғликни ўтказиб юбориш хоссасига эга бўлади. Шунини ҳисобга олган қуёш энергиясини кўпроқ қисми ютилиши учун ҚЭ тайёрланадиган яримўтказгич намунасининг оптик ютилиш коэффиценти етарлича катта бўлиши керак. Шунинг учун қалинлиги 1 мкм бўлган плёнкаларда (a-Si:H асосли қуёш элементи ишчи қисмининг ўртача қалинлиги 1 мкм бўлади), ҳеч бўлмаганда кўзга кўринадиган спектр соҳаси учун ютилиш коэффиценти $\alpha=10^4 \text{ см}^{-1}$ бўлиши керак. Шу билан бирга,

ёруғлик таъсирда ҳосил бўлган электронлар ва коваклар, ҚЭ нинг иккала томонидаги контактларга эффектив равишда тўпланиши керак. Бу эса асосий бўлмаган ток ташувчиларнинг дрейф узунлиги, плёнканинг қалинлигига тенг бўлиши кераклигини билдиради. Бошқача сўз билан айтганда, фазовий заряд соҳасининг ички майдони, ҚЭ қалинлигини асосий қисмига ёйилган бўлиши керак.

Куёш энергиясини эффектив равишда электр энергиясига айлантириш учун катта ички потенциал керак бўлади. Чунки, бу катталиқ куёш элементининг ЭЮК ни аниқлайди. Яримўтказгичларда ички потенциал p - n ўтиш гетероўтиш ёки Шоттки тўсигли ўтишлар натижасида пайдо бўлади. ҚЭ ларининг ФИК ни камайтирувчи сабаблардан бири, бу қурилмалар ўзига хос шунт қаршилиққа эга бўлади. Бу қаршилиқ диодни ҚЭ сифатида ишламайдиган қисмини қаршилиги билан аниқланади. ҚЭ ларини тайёрлашда шунт қаршилиқни қиймати иложи борица катта бўлишини таъминлашга ҳаракат қилинади.

Булардан ташқари куёш элементлари унча катта бўлмаган умумий кетма-кет қаршилиққа эга бўлади. Ишлаш вақтида бу қаршилиқда кучланишни тушиши ЭЮК ни унча катта бўлмаган қисмини ташкил қилиши керак. Умумий кетма-кет қаршилиқ қуйидаги қаршилиқлардан контактлар қаршилиги, ярим ўтказгич плёнкасининг ҳажмий қаршилиги, юпқа яримшаффоф ёруғлик ўтказувчи қатламни сирт қаршилиги, коллектор тўрлар (сеткалар) каби қаршилиқларини киритиш мумкин.

Ёруғлик нурларини электр энергиясига фақат ҚЭ лари эмас, балки, фотопрёмниклар, фотоқаршилиқлар ҳам айлантиради. Лекин уларни манбага улаш керак. Куёш элементлари эса бевосита манбага уланмасдан куёш радиацияси энергиясини нафақат электр энергиясига, балки бошқа турдаги энергияга ҳам айлантира олади.

Асосан ҚЭ ларини ФИК ини оширишга кескин бурилиш, электронларни зоналардаги ўтиш назарияси тажрибаларда тасдиқлангандан сўнг ва берилган хусусиятга эга бўлган тоза яримўтказгичларни тайёрлаш технологияси

яратилгандан кейин содир бўлади.

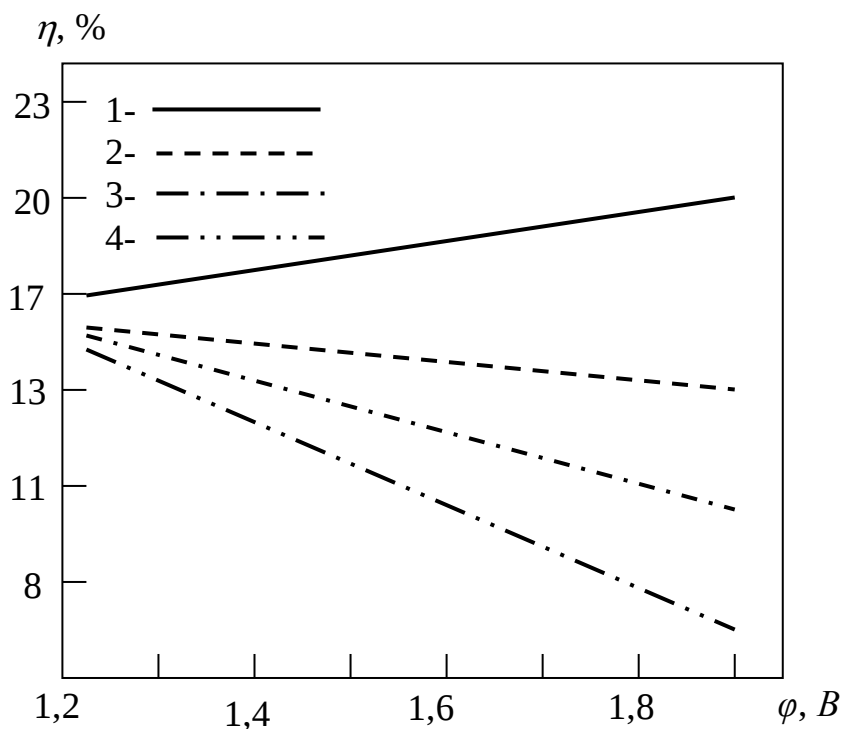
Иккинчи ва учинчи авлод космик аппаратлар қуёш элементи билан ишлаган. Уларнинг ФИК 9 - 10 % га тенг бўлган. Биринчи авлод космик аппаратлари эса аккумулятор билан ишлаган.

Ҳозирги вақтда назарий ҳисоблашлар кристалл (Si) кремнийдан тайёрланган қуёш элементларини ФИК 26 % гача етиб бориши аниқланган. Арсенид галлий (GaAs) дан тайёрланган қуёш элементларини назарий ҳисоблашларда олинган ФИК ни қиймати 30 % га тенг бўлса, лаборатория шароитида олинган натижа 25,5 % етиб борди.

ҚЭ ларининг ФИК ни аниқловчи (4.3) формулага эффектив қувват зичлиги учун олинган ифодани қўйиб ҚЭ ларининг ФИК учун қуйидаги тенгламани олиш мумкин.

$$\eta = \frac{\frac{kTj_{\kappa m}}{q} \left(1 + \frac{j_0}{j_{\kappa m}} - \frac{n'_2 kT}{qU_{cu}} \right) \ln \frac{j_{\kappa m}}{j_0} \frac{kT}{qU_{cu}}}{P_0 S} \quad (4.15)$$

Бу ифодадан ҚЭ лари ФИК ни ҳисоблаш мумкин. (4.15) га потенциал тўсик баландлигини ҳароратга боғланишини аниқловчи (2.14) ифодани қўйиб, ҚЭ ларининг ФИК ни ҳисобласа бўлади. $AM0$ ($P_0=1353 \text{ Вт/м}^2$) шароитида $t=25 \text{ }^\circ\text{C}$ ҳароратда ФИК $\eta=16,4 \text{ } \%$ бўлган $AlGaAs-GaAs$ асосли ҚЭ ини ФИК ҳароратга боғланиши учун (4.15) дан олинган ҳисоблаш натижалари 4.1 жадвалда келтирилган. Жадвалдан кўринадик, $AlGaAs-GaAs$ асосли ҚЭ ини ФИК жуда паст ҳароратларда ($t < -100 \text{ }^\circ\text{C}$) ортиб, ҳарорат юқорилаб борган сари камайиб борар экан. Бу олинган натижаларни тажрибадан ва бошқа назарий усулларда олинган формуларни ҳисоблашлардан олинган натижаларга мос келишини 1.4 – расмдан кўриш мумкин. Расмдан кўринадик, ҳақиқатдан ҳам турли яримўтказгичлар асосида тайёрланган ҚЭ ларининг ФИК ҳарорат ортиб борган сари камайиб борар экан.



4.3-расм. Қуёш элементларини фойдали иш коэффициентининг потенциал тўсиқ баландлигига боғлиқлиги. 1- $T=200\text{ K}$, 2- $T=300\text{ K}$, 3- $T=400\text{ K}$, 4- $T=500\text{ K}$.

4.3 – расмда (4.15) ифодадан ҚЭ нинг ФИК ва потенциал тўсиқ баландлиги орасидаги боғланишлар ҳисобланди. $T=200\text{ K}$, $T=300\text{ K}$, $T=400\text{ K}$ ва $T=500\text{ K}$ ҳароратлар учун олинган ҳисоблаш натижалари келтирилган. Расмдан кўринадикки бу боғланиш жуда катта аниқликда чизиқли бўлар экан. Аммо, бу ҳисоблашлар жуда паст ҳароратларда ($T < 250\text{ K}$) потенциал тўсиқ баландлиги ортиб бориши билан ҚЭ ларининг ФИК ортиб борса, юқори ҳароратларда ($T < 300\text{ K}$) аксинча камайиб боришини кўрсатди.

4.1-жадвал

$T=25\text{ °C}$ ҳароратда ФИК $\eta=16,4\%$ бўлган $AlGaAs-GaAs$ асосли ҚЭ ини асосий фотоэлектрик параметрларини $AM0$ ($P_0=1353\text{ Вт/м}^2$) шароитида ҳароратга боғланиши.

№	$t, ^\circ\text{C}$	T, K	U_{cu}, B	U_{ef}, B	I_{km}, mA	I_{ef}, mA	$\eta, \%$
1	-120	153	1,415	1,271	100,0	98,0	18,89
2	-100	173	1,358	1,214	101,3	99,25	18,91
3	-80	193	1,304	1,160	102,525	100,15	18,82
4	-60	213	1,252	1,108	103,835	101,35	18,70
5	-40	233	1,200	1,056	104,25	102,2	18,40
6	-20	253	1,148	1,004	105,5	102,8	17,85
7	0	273	1,096	0,952	106,7	103,3	17,18
8	20	293	1,044	0,990	107,825	103,7	16,59
9	40	313	0,992	0,948	108,95	104,0	15,77
10	60	333	0,940	0,896	110	103,9	15,26
11	80	353	0,888	0,844	111	103,7	14,59
12	100	373	0,836	0,792	112	103,4	13,92
13	120	393	0,784	0,740	113	102,9	13,26
14	140	413	0,732	0,688	114	102,2	12,59
15	160	433	0,680	0,636	115	101,7	11,92
16	180	453	0,628	0,584	116	101,3	11,26
17	200	473	0,576	0,532	117	101,0	10,59
18	220	493	0,524	0,480	118	109,9	9,93

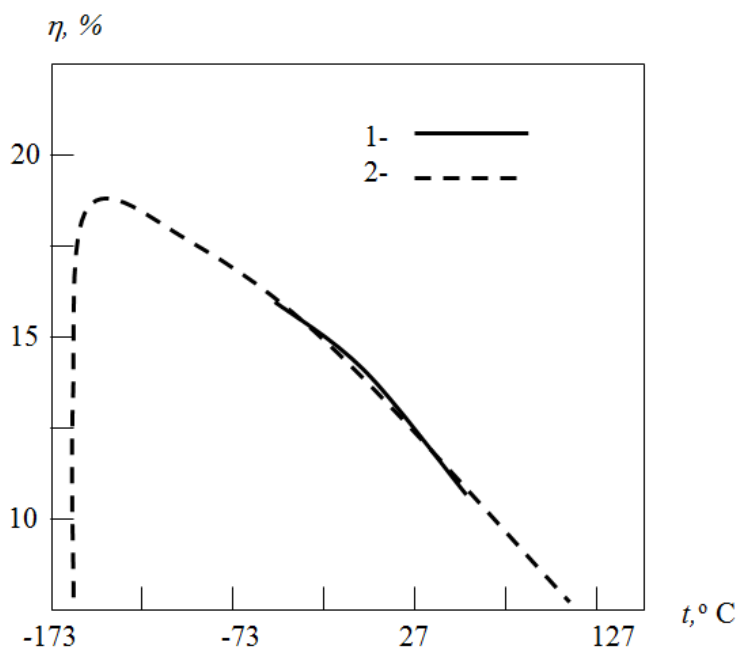
Ушбу параграфда яна, яримўтказгичли ҚЭ эффективлигини аниқлашнинг яримэмпирик усулда аниқланган (4.15) тадқиқ қилишга бағишланган. Бу формулани энг катта афзаллиги, уни транцендент эмаслиги ва кўриниши содда эканлиги ҳисобланади. Бошқа авторлар томонидан ҚЭ ларининг ФИК учун назарий усулларда олинган тенгламаларни барчаси биринчидан транцендент бўлса, иккинчидан анча мураккаб кўринишга эга. (4.15) формулага эса фотоВАХни бевосита тажрибавий ўлчашлардан аниқласа

бўладиган параметрлар кирган. Шунинг учун ҚЭ ФИК учун бошқа авторлар ва маълум усулларда олинган натижага қараганда яққолроқ ифодаланган. Мисол сифатида [109/1] ишда ҚЭ ларининг ФИК учун олинган формулани кўрсатиш мумкин.

$$\eta = \frac{1}{P_0} \left[\frac{\left(1 - \left(\frac{eU_{\text{эф}}}{nkT} + 1 \right)^{-1} \right) \ln \left(\frac{J_{\text{КЭ}}}{J_0} \left(\frac{eU_{\text{эф}}}{nkT} + 1 \right)^{-1} \right)}{\ln \frac{J_{\text{КЭ}}}{J_0}} \right] \quad (4.16)$$

Қайд
лозимки,
ва (4.16)

этиш
(4.15)
ларни



4.4-расм. Расмда гомоген кремний асосли ҚЭ ФИК нинг температурага боғликланишини 1-тажрибадан [109/1, с.217] 2-(4.15) формулани ҳисоблашдан олинган натижалар.

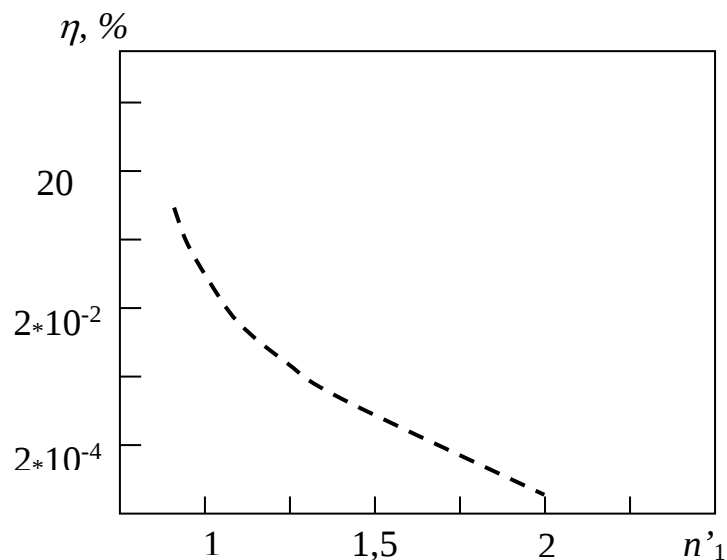
ўхшашлигини кўрсатиш осон эмас, чунки уларни олиш учун хар-ҳил методдан фойдаланилган. (4.16) формула трансцендент бўлганлиги учун (4.15) ва (4.16) ларни ўхшашлигини кўрсатиш учун қўпол сонли ҳисоблашларни бажариш лозим бўлади. Бу ҳисоблашларни келгусида бажариш кўзда тутилган.

ҚЭни температуравий боғлиқлигини ҳисоблаш масаласини юқорида бажарилган ҳисоблашларга ўхшаш тарзда кўриб чиқиш мумкин.

(4.15) формуладан олинган ҚЭ ларининг ФИК ни ҳисоблаш натижалари 4.4-расмда келтирилган. Расмда гомоген кремний асосли ҚЭ ФИК нинг температуравий боғлиқлиги учун ҳисоблаш ва тажрибавий [109/1, с.217] натижалар кўрсатилган.

Кўриниб турибдики бу натижалар $-73\text{ }^{\circ}\text{C} < T < 77\text{ }^{\circ}\text{C}$, температура интервалида яхши мос келади, ҳисоблашлар эса тажрибани тўлдиради. Бу графикдан кўринадикки кремний асосли ҚЭ $T < -160\text{ }^{\circ}\text{C}$ ва $T > 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ температураларда ишлашга яроқсиз бўлар экан. Шунини эслатиб ўтиш керакки, барча ҳисоблашлар параметрларнинг қуйидаги қийматлари учун олиб борилди: $T_0=273\text{ K}$, $\varphi_0=1,42\text{ В}$, $\gamma=5\cdot 10^{-5}\text{ В/К}$, $U_{0\text{xx}}=1,076\text{ В}$, $J_{00}=1,75\cdot 10^{-18}\text{ А}$.

4.5- расмда ҚЭ ларининг ФИК ини фотоВАХ нинг қисқа туташув токи аниқланадиган нуқтасидаги фотоВАХ нинг ноидеаллик коэффициентига

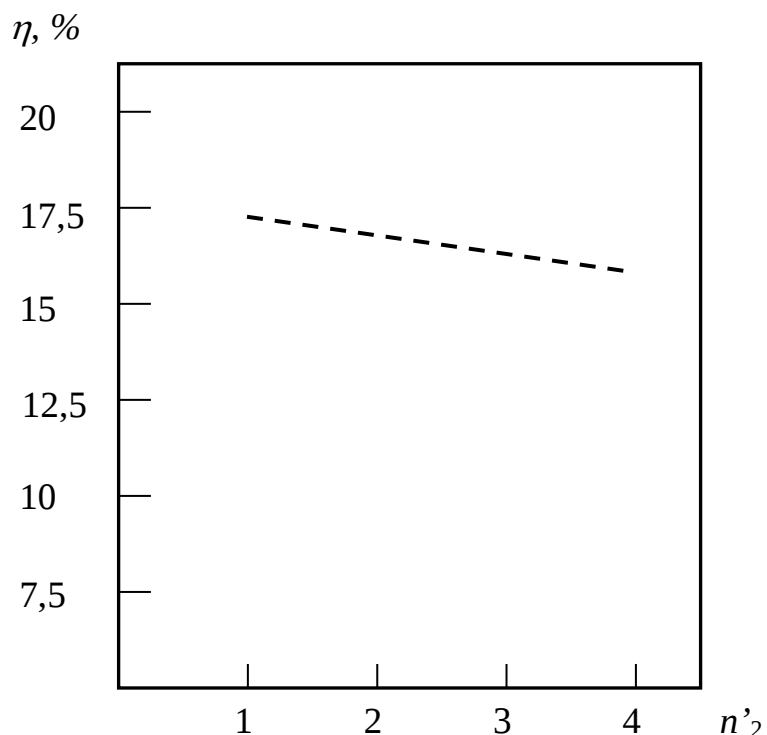


4.5- расм. ҚЭ ларининг ФИК ни фотоВАХ нинг қисқа туташув токи аниқланадиган нуқтасидаги фотоВАХ нинг ноидеаллик коэффицентига боғланиши. Ҳисоблашларни $T_0=273\text{ K}$, $T=300\text{ K}$, $j_0=1,5\cdot 10^{-10}\text{ А}$, $U_{cu}=0,65\text{ В}$, $\varphi_0=1,12\text{ В}$ ва $\gamma=5\cdot 10^{-4}\text{ В/К}$ қийматлар учун бажарилди.

боғланиши учун (4.15) формуладан олинган ҳисоблаш натижалари келтирилган. Бу боғланиш ҳам, жуда кучли бўлиб, ноидеаллик коэффиценти катталашиб борган сари ҚЭ ларининг ФИК экспоненциал равишда камайиб ноидеаллик коэффицентини қиймати 1 ва 2 оралиғида ўзгарганда 17,5 % дан $8\cdot 10^{-5}\text{ } \%$ оралиқда ўзгарар экан. Ҳисоблашларни $T_0=273\text{ K}$, $T=300\text{ K}$, $j_0=1,5\cdot 10^{-10}\text{ А}$, $U_{cu}=0,65\text{ В}$, $\varphi_0=1,12\text{ В}$ ва $\gamma=5\cdot 10^{-4}\text{ В/К}$ қийматлар учун бажарилди.

4.6-расмда эса ҚЭ ларининг ФИК ини (4.15) формуладан олинган фотоВАХ нинг эффектив қувват аниқланадиган нуқтасидаги фотоВАХ нинг ноидеаллик коэффицентига боғланиши келтирилган. Бу боғланиш ҳам чизиқли бўлиб ноидеаллик коэффиценти 1 дан 4 гача ортиб борганда ҚЭ

ларнинг эффектив қуввати $\eta=(17,5 - 15,4) \%$ оралиқда камайар экан. Ҳисоблашларни $T_0=273 \text{ K}$, $T=300 \text{ K}$, $j_0=9 \cdot 10^{-9} \text{ A}$, $\varphi_0=1,12 \text{ B}$, $U_{cu}= \varphi_0/2 \text{ B}$, $\gamma=5 \cdot 10^{-4} \text{ B/K}$ ва $n_1'=1,00239$ қийматлар учун бажарилди.



4.6-расм. ҚЭ ларининг ФИК ни фотоВАХ нинг ноидеаллик коэффициентига боғланиши. Ҳисоблашларни $T_0=273 \text{ K}$, $T=300 \text{ K}$, $j_0=9 \cdot 10^{-9} \text{ A}$, $\varphi_0=1,12 \text{ B}$, $U_{cu}= \varphi_0/2 \text{ B}$, $\gamma=5 \cdot 10^{-4} \text{ B/K}$ ва $n_1'=1,00239$ қийматлар учун бажарилди.

ФОЙДАЛАНИЛГАН АДАБИЁТЛАР

1. Qifen L, Zhangbo Y, Lifeng Z, et al. Analysis on temperature characteristics of concentration photovoltaic system. In: Proceedings of the 9th International Conference on Power Engineering, Vol. 1, 139– 44, Kobe, Japan, 2009.
2. Lee JC, Dutta V, Yoo J, Yi J, Song J, Yoon KH. Superstrate p-i-n a-Si:H solar cells on textured ZnO:Al front transparent conduction oxide. Superlattices Microstruct. 2007;42:369–374.
3. Физика гидрогенизированного аморфного кремния: Вып. 1. Структура, приготовление и приборы: Пер. с англ./Под ред. Дж. Джоунопулоса, Дж. Люковски.-М.: Мир, 1987.-368 с.
4. Zhu L, Wang Y, Fang Z, et al. An effective heat dissipation method for densely packed solar cells under high concentrations. Solar Energy Mater Solar Cells 2010;94:133– 40.
5. C. R. Wronski, J. M. Pearce, R. J. Koval, A. S. Ferlauto, and R. W Collins. Progress in amorphous silicon based solar cell technology. RIO 02-World Climate & Energy Event, N1, 2002. –p. 67-72.
6. A.F. Meftah, A.M. Meftah, A. Belgachi, Computer modeling of the photodegradation effect in a-Si :H p-i-n solar cell, ICEEDT 2007. Hammamet Tunisia.
7. A.F. Meftah, A.M. Meftah, A. Belghachi, (2006) “Computer Modelling of the Photodegradation Effect in a-Si:H p-i-n Solar Cell”, Colloque OASIS 2006, Centre Universitaire de Béchar, 11-13 Novembre 2006.
8. Аморфные полупроводники: Пер. с англ./Под ред. М. Бродски. -М.: Мир, 1982.-418 с.
9. Фаренбрух А., Бьюб Р. Солнечные элементы (теория и эксперимент), М., Энергоатомиздат, 1987, -139 с.

- 10.Аморфные полупроводники и приборы на их основе: Пер. с англ./Под ред. Й. Хамакавы.-М.: Металлургия, 1986.-376 с.
- 11.Алиев Р. Алиназарова М. А., Икрамов Р. Ғ, Исманова О.Т. “Аморф яримўтказгич асосли ҚЭ ишлайдиган харорат интервали”, Физика ва астрономия ютуқлари, ўқитиш методикаси ва таълим муаммолари. Республика илмий-амалий конференцияси материаллари, Тошкент, 2009, -315-317 бетлар.
- 12.Казанский А.Г., Кошелев О.Г., Сазонов А.Ю., Хомич А.А. Фотопроводимость тонких пленок аморфного гидрированного кремния. ФТП, Т. 42, 2008, -В. 2. -с.192-194.
- 13.Казанский А.Г., С. М. Петрушко., Н. В. Рыжкого., Фотопроводимость аморфного гидрированного кремния, легированного методом ионной имплантации. ФТП, Т. 33, 1999, -В.3.- с.332-334.
- 14.P. Roca i Cabarrocas and Y. Poissant. Optimizing phosphorous and boron doped layers for stable p-i-n solar cells. J. Non-Cryst. Solids, 2000, -v. 266-269. -p. 1134-1139.
- 15.С. Зи. Физика полупроводниковых приборов, книга 1, М.: Мир. 1984.- 456 с.
- 16.Современные проблемы полупроводниковой фотоэнергетики: Перю с англ./Под ред. Т. Коутса, Дж. Микина.-М.: Мир, 1988.-307 с.
- 17.Goetzberger and Ch. Hebling. Photovoltaic materials: past, present, future. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2000, -v. 62. - p. 1-19.
- 18.S. Guha, J. Yang and A. Banerjee. Amorphous Silicon Alloy Photovoltaic Research - Present and Future. Prog. Photovolt. Res. Appl., 2000, -v. 8. -p. 141-150.
- 19.G. Tao. Optical Modeling and Characterization of Hydrogenated Amorphous Silicon Solar Cells, Ph. D. thesis, Delft University of Technology, the Netherlands, 1994.

20. Radziemska E, Klugmann E. Thermally affected parameters of the current–voltage characteristics of silicon photocell. *Energy Convers Manage* 2002;43:1889–900.
21. A.G. Aberle, S.R. Wenham and M.A. Green. A new method for accurate measurements of the lumped series resistance of solar cells. // 23rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 1993. -pp. 133-138.
22. D. Nielsen. Distributed series resistance effects in solar cells. // *IEEE Trans. Electr. Dev.*, 1982. –v 29. -p.821.
23. Чучмай (Казанцева) И.А., Хохлов А.Ф., Ершов А.В. Оптические свойства аморфных кремниевых многослойных наноструктур // Всерос. Собрание "Нанопотоника-2002" Н. Новгород, 2002. - С. 47-50.
24. J.L. Hartke, "The Three-dimensional Poole Frenkel effect, " *Journal of Applied Physics*, 2007. vol. 39, pp 4871.
25. Chavali, R.V.K.; Wilcox, J.R.; Ray, B.; Gray, J.L.; Alam, M.A. (2014-05-01). [*"Correlated Nonideal Effects of Dark and Light I #x2013;V Characteristics in a-Si/c-Si Heterojunction Solar Cells"*](#). *IEEE Journal of Photovoltaics*. 4 (3): 763–771.
26. R.W. Collins, et al., "Evolution of microstructure and phase in amorphous, protocrystalline, and microcrystalline silicon studied by real time spectroscopic ellipsometry", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 78(1-4), pp. 143-180, 2003.
27. D.E. Carlson, C.R. Wronski, J.I. Pankove, P.J. Zanzucchi and D.L. Staebler. Properties of amorphous silicon and a-Si solar cells. *RCA Rev.*, 1977. -v. 38, -p. 211-225.
28. A.F. Meftah, A.M. Meftah, A. Merazga, Modelling of Staebler-Wronski effect in hydrogenated amorphous silicon under moderate and intense illumination, *Defect and Diffusion Forum*, 2004. -Vols. 230-232. -pp.221-232.
29. A.F. Meftah, A.M. Meftah, A. Merazga, Created defect under illumination in a-Si :H : hydrogenated or isolated dangling bond, *Vacuum*, 2004. -vol 75. - p.269-273.

30. Goetzberger and Ch. Hebling. Photovoltaic materials: past, present, future. // *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2000. -v. 62. -pp. 1-19.
31. S. Y. Myong, S. W. Kwon, J. H. Kwak, K. S. Lim, J. M. Pearce, and M. Konagai, "Good stability of protocrystalline silicon multilayer solar cells against light irradiation originating from vertically regular distribution of isolated nano-sized silicon grains", *4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion Proceedings*, p. 492, 2006.
32. C. R. Wronski, et al., "Intrinsic and Light Induced Gap States in a-Si:H Materials and Solar Cells - Effects of Microstructure", *Thin Solid Films*, 451-452 pp. 470-475, 2004.
33. M. A. Kreiger, et al., Life Cycle Analysis of Silane Recycling in Amorphous Silicon-Based Solar Photovoltaic Manufacturing, *Resources, Conservation & Recycling*, 70, pp.44-49 (2013).
34. Chavali, R.V.K.; Wilcox, J.R.; Ray, B.; Gray, J.L.; Alam, M.A. (2014-05-01). ["Correlated Nonideal Effects of Dark and Light I #x2013;V Characteristics in a-Si/c-Si Heterojunction Solar Cells"](#). *IEEE Journal of Photovoltaics*. 4 (3): 763–771.
35. R.W. Collins, et al., "Evolution of microstructure and phase in amorphous, protocrystalline, and microcrystalline silicon studied by real time spectroscopic ellipsometry", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 78(1-4), pp. 143-180, 2003.
36. R.R. Arya, A. Catalano and R.S. Oswald. Amorphous silicon p-i-n solar cells with graded interface. // *Appl. Phys. Lett.*, 1986. -v. 49. -pp. 1089-1091.
37. T. Takahama, M. Taguchi. S. Kuroda, T. Matsuyama, M. Tanaka, S. Tsuda, S. Nakano, and Y. Kuwano. High Efficiency Single- and Poly-crystalline Silicon Solar Cells Using ACJ-HIT Structure. // 7th E.C. PVSEC, 1992. -pp. 1057-1060.
38. T. Sawada, N. Terada, S. Tsuge, B. Toshiaki and, T. Takahama, K. Wakisaka, Sh. Tsuda and Sh. Nakano. High-efficiency a-Si/c-Si heterojunction solar cell. // First WCPEC; Dec. 5-9, 1994; Hawaii.

39. Liang, Jianjun; Schiff, E. A.; Guha, S.; Yan, Baojie; Yang, J. (2006). "Hole-mobility limit of amorphous silicon solar cells". *Applied Physics Letters*. **88** (6): 063512.
40. Radziemska E. The effect of temperature on the power drop in crystalline silicon solar cells. *Renew Energy* 2003;28:p.1–12.
41. M. Hejjo Al-Rifai, J. Carstensen, and H. Foil. A new passivity method for edge shunts of silicon solar cells. // *Proceedings of the 2001 European Photovoltaic Solar Energy Conference, Munich, Germany, 22 - 26 October 2001*. -pp. 1424-1427.
42. Vorobiev YV, Gorley N. Photovoltaic solar cells performance at elevated temperatures. *Solar Energy* 2005;78:243– 50.
43. Radziemska E. Thermal performance of Si and GaAs based solar cells and modules: a review. *Prog Energy Combust Sci* 2003;29:407– 24.
44. Skoplaki E, Palyvos JA. On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: a review of efficiency/power correlations. *Solar Energy* 2009;83:614–2445.
45. K.R. Kumar and M. Zeman. Simulation studies on the effect of a buffer layer on the external parameters of hydrogenated amorphous silicon p-i-n solar cells. *Bull. Mather. Sci.*, No. 5, 2008. -Vol. 31. -pp.737-739.
46. Б.Г. Будагян, А.А. Шерченков, М.Н. Мейтин. Полупроводниковые преобразователи энергии. -М.: МИЭТ (ТУ), 2000 - 68 с.
47. El-Adawi MK, Al-Nuaim IA. The temperature functional dependence of VOC for a solar cell in relation to its efficiency new approach. *Desalination* 2007;209:91–96.
48. S. Reynolds, Ch. Main, V. Smirnov and A. Meftah. Intensity dependence of quantum efficiency and photo-gating effects in thin film silicon solar cells”, *Phys. Status Solidi C* 7, No. 3–4, 2010. -p.505– 508.

49. N. Palit and P. Chatterjee. Computer analysis of a-Si:H p-i-n solar cells with a hydrogenated microcrystalline silicon p-layer. J. Appl. Phys., 1999, -v. 86 (12), -p. 6879-6889.
50. Азизов М. А. Ярим ўтказгичлар физикаси, -Тошкент, Ўқитувчи, 1974. - 292 бет.
51. Odeh S, Behnia M. Improving photovoltaic module efficiency using water cooling. Heat Transfer Eng 2009;30:499– 505.
52. Abdolzadeh M, Ameri M. Improving the effectiveness of a photovoltaic water pumping system by spraying water over the front of photovoltaic cells. Renew Energy 2009;34:91– 96.
53. H. Stiebig, A. Kreisel, J.-L. Nicque, Th. Eickhoff, N. Beneking and H. Wagner. Experimental and numerical study of a-Si:H solar cells. Proc. of the 12th ECPVSEC, 1994, Eds. R. Hill et al., Amsterdam, the Netherlands, -p. 164-167.
54. A. Goetzberger and Ch. Hebling. Photovoltaic materials: past, present, future. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2000, -v. 62, -p.1-19.
55. E. Kiran and D. Inan. Technical note. An approximation to solar cell equation for determination of solar cell parameters. // Renewable Energy, 1999, -v. 17, -pp.235-241.
56. E. Kiran and D. Inan. Technical note. An approximation to solar cell equation for determination of solar cell parameters. // Renewable Energy, 1999, -v. 17, -pp.235-241.
57. Тешабоев А., Зайнобиддинов С., Каримов И., Рахимов Н., Алиев Р. Яримўтказгичли асбоблар физикаси. -Андижон, Ҳаёт нашриёти, 2002, - 260 бет
58. M. Nopic, F. Smole and J. Furlan. Numerical analysis of a thin microcrystalline p-layer in p-i-n a-Si:H solar cells. J. Appl. Phys., 1998, -v. 83 (8), -p. 4518-4521.

59. Anderson WG, Dussinger PM, Sarraf DB, et al. Heat pipe cooling of concentrating photovoltaic cells. In 33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Vols 1–4, 905–910, San Diego, CA, 2008.
60. H. Matsuura, T. Okuno, H. Okushi, and K. Tanaka. Electrical properties of n-amorphous/p-crystalline silicon heterojunctions. // J.Appl.Phys., 1984, -v.55 (4), -pp.1012-1019.
61. Мейтин М. Ёруғлик тушгандаги вольтоика: материалы, технологии, перспективы пусть всегда будет солнце. Электроника-НБТ. 2000. №6 с. 40-47.
62. U. Stutenbaeumer, B. Mesfin. Equivalent model of monocrystalline, polycrystalline and amorphous silicon solar cells. // Renewable Energy, 1999, -v. 18, -pp. 501-512.
63. А. Меден, М. Шо. Физика и применение аморфных полупроводников. // Пер. с англ. М.: Мир, 1991. -670 с.
64. A. Kaminski, J.J. Marchand, A. Laugier. Non ideal dark I-V curves behavior of silicon solar cells. // Solar Energy Materials and Solar Cells, 1998, -v.51, -pp.221-231.
65. A.M. Meftah, A.F. Meftah, and A. Merazga, Numerical Simulation and Analysis of the Dark and Illuminated J-V Characteristics of a-Si-H p-i-n diodes, J. Phys.:Condens. Matter, 2006, v. 18, -pp.5459-5471.
66. Y. Hamakawa. Present status of solar photovoltaic R and D projects in Japan. Surface Sci., 1979, -v. 86, -p. 444-461.
67. Joseph J. Wysocki and Paul Rappaport. Effect of Temperature on Photovoltaic Solar Energy Conversion. J. Appl. Phys. 1960, 31, -pp. 571-579
68. S. Guha, J. Yang and A. Banerjee. Amorphous Silicon Alloy Photovoltaic Research - Present and Future. Prog. Photovolt. Res. Appl., 2000, v. 8, p. 141-150.
69. D.E. Carlson, C.R. Wronski, J.I Pankove, P.J. Zanzucchi and D.L. Steabler. Properties of amorphous silicon and a-Si solar cells. RCA Rev., 1977, -v. 38, -p. 211-225.

70. A.F. Meftah, A.M. Meftah, and A. Belghachi. Computer simulation of the a-Si:H p-i-n solar cell performance sensitivity to the free carrier's mobilities, the capture cross sections and the density of gap states, J. Phys.:Condens. Matter, 2006, -v 18, -p. 9435-9446.
71. Аморфные и поликристаллические полупроводники: Пер. с нем. /Под ред. В. Хейванга.- М.: Мир, 1987.-160 с.
72. Зайнобиддинов С., Икрамов Р.Г., Алиев Р., Исманова О.Т., Ниязова О., Нуритдинова М.А. Влияние температуры на фотоэлектрические характеристики солнечных элементов из аморфного кремния. Гелиотехника, №3, 2003, №3, -с. 19-22.
73. Алиев Р., Зайнобиддинов С., Икрамов Р.Г., Исманова О.Т., Нуритдинова М.А. Оценка фотоэлектрических параметров солнечных элементов на основе аморфного кремния. Гелиотехника, 2003, № 1, -с. 18-22.
74. Aliev R., Ikramov R.G., Alinazarova M.A., Ismanova O.T. Influence of Temperature on Photocurrent of Amorphous Semiconductor-Based Solar Element. Applied Solar Energy, 2009, -Vol.45, No.3, -pp. 148-150.
75. Физика гидрогенизированного аморфного кремния: Вып. 2. Электронные и колебательные свойства: Пер. с англ./Под ред. Дж. Джоунопулоса, Дж. Люковски.-М.: Мир, 1988.-448 с.
76. Аут И., Генцов Д., Герман К. Фотоэлектрические явления, -М., Мир, 1980, -208 с.
77. Фельц А. Аморфные и стеклообразные неорганические твердые тела. - М., Мир, 1986, -556 с.
78. Аморфный кремний и родственные материалы. /Сб. обзор. под ред. Х. Фрицше. - М., Мир, 1991, -542 с.
79. К. Чопра, С. Дас. Тонкопленочные солнечные элементы. // Пер. с англ. - М.: Мир, 1986.-435 с.
80. Ҳ. Акрамов, С. Зайнобиддинов, А. Тешабоев. “Яримўтказгичларда фотоэлектрик ҳодисалар”. Ўзбекистон нашриёти. 1994. 211-229 б.

81. Стребков Д.С., Безруких П.П. Возобновляемая энергетика: стратегия, ресурсы, технологии. М.: ГНУ ВИЭСХ, 2005. 261 с.

.