

## Лекция 4

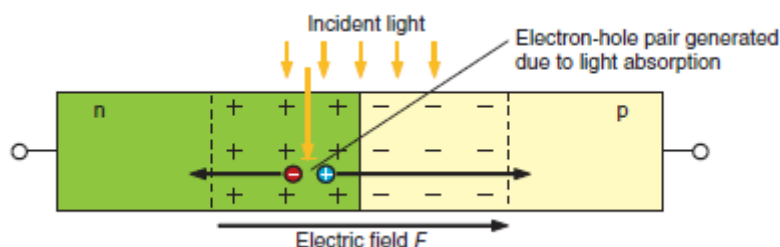
### Күн батареяларының құрылымы мен жұмыс істеу әдісі

Фотоэлектрлік электр энергиясын өндірудің негізі күн батареясы болып табылады. Осы себепті бұл тарауда оның құрылымы мен қызметі толығырақ қарастырылады. Біз тиімділіктің жоғары дәрежесіне қалай қол жеткізуге болатыны туралы сұраққа ерекше назар аударамыз және күн батареяларының қазіргі тиімділік рекордын ұсынамыз.

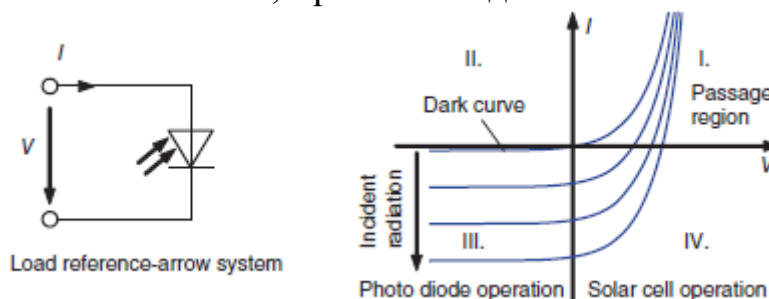
#### 4.1 Фотодиод

##### 4.1.1 Құрылымы мен сипаттамалары

Біз фотодиодты ең қарапайым жағдайда бүйірден жарықтандырылған p-n өтуі ретінде көрсете аламыз (4.1-сурет).



Сурет 4.1 – Жарықталған p-n өтуі: жарықты сіңіру нәтижесінде пайда болатын бос электрондар мен тесіктер ғарыштық заряд аймағының өрісінен бөлініп, «үйге әкелінді».



#### Сурет 4.2 – Фотодиодтың таңбасы және қисықтары

Еніп жатқан фотондар жұтылып, бос электрон-тесік жұптарын тудырады. Олар қайтадан ғарыштық заряд аймағында басым болатын электр өрісімен бөлінеді және «үйге әкелінді»: электрондар n-жағына және тесіктер p-жағына. Онда олар қалаусыз рекомбинациялардың ықтималдығын төмендететін негізгі тасымалдаушылар болып табылады. Енді өндірілген қуатты контактілерден алуға болады. Ол фотондар арқылы жасалатындықтан, ол фототок  $I_{ph}$  деп аталады.

Әрбір жұтылған фотон электронды-саңылау жұбына әкеледі және сондықтан фототокқа үлес қосады деп есептейміз. Сонымен,  $I_{ph}$  фототок  $E$  сәулеленуіне пропорционал:

$$I_{ph} = \text{const} \cdot E$$

Алынған сипаттамалық қисық 4.2 - суретте көрсетілген.

Фотодиодка жарық түспегенше, ол қалыпты р-п өтуі сияқты әрекет етеді. Кері кернеуде тек аз ғана кері ток ағады, ол қараңғы ток деп аталады. Жарық диодка түскен бойда диодтың сипаттамалық қисығына  $V$  кернеуіне тәуелсіз фототок қосылады. Ол кері бағытта ағып жатқандықтан, ол бейнеленген  $I/V$  қисығын төмен қарай ығыстырады. III квадрантта фотодиодты пайдалану фотодиод жұмысы деп аталады, өйткені фотодиодтар әдетте оптикалық деректерді қабылдағыштар үшін детектор ретінде қызмет ету үшін қолданылатын кері кернеумен жұмыс істейді. IV квадрантта фотодиод күн батареясы ретінде жұмыс істейді: оң кернеумен нәтиже теріс ток болып табылады. Көрсетілген жүктеме анықтамалық-көрсеткі жүйесінде бұл құрылғыдан энергия пайдаланылмайтынын, бірақ энергия өндірілетінін білдіреді.

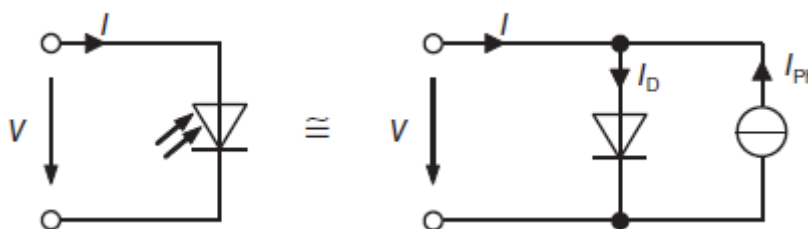
#### 4.1.2 Эквивалентті схема

Фотодиодтың электрлік әрекетін фототокпен біріктірілген Шокли теңдеуі арқылы көрсетуге болады.

$$I = I_D - I_{Ph} = I_S \cdot \left( e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right) - I_{Ph}$$

Бұл жағдайда  $I_S$  өлшемі алдыңғы тарауда айтылған қанықтыру тогы болып табылады:

$$I_S = A \cdot q \cdot n_i^2 \cdot \left( \frac{D_N}{L_N \cdot N_A} + \frac{D_P}{L_P \cdot N_D} \right)$$



Сурет 4.3 - Фотодиодтың эквивалентті тізбегі

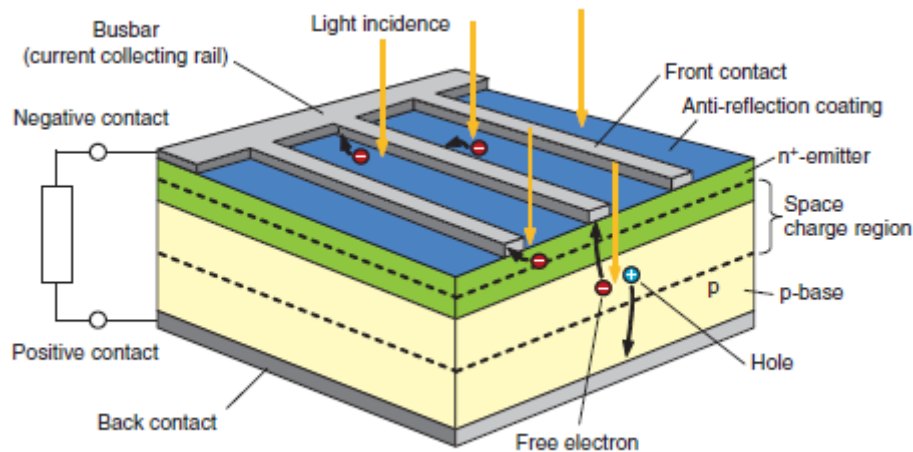
Соңғы теңдеуді электрлік эквиваленттік тізбек арқылы көрсетуге болады (4.3-сурет). Бұл жағдайда  $I_{Ph}$  күші бар ток көзі пассивті диодпен біріктірілген. Күн батареясын қарастырғанда осы эквивалентті тізбекке қайта ораламыз.

### 4.2 Күн батареясының қызмет ету әдісі

#### 4.2.1 Күн батареясының құрылым принципі

Күн батареясының құрылымы қандай? 4.4-суретте бұл туралы ақпарат берілген. Негізінен, фотодиод сияқты ол р-п өткелінен тұрады. Бұл асимметриялық қоспаланған, төменгі жағында р-негізі және жоғарғы жағында қатты легирленген  $n^+$ -эмиттер. База және эмитент терминдері биполярлы транзисторлардың басталу уақытынан шыққан және күн

батареялары үшін қабылданған. Егер жарық жасушаға енсе, онда әрбір жұтылған фотон электрон-тесік жұбын тудырады. Бөлшектер кеңістіктік заряд аймағының өрісінен бөлініп, контактілерге ауысады: саңылаулар негіз арқылы төменгі артқы жанасуға, электрондар эмитент арқылы алдыңғы контактілерге.



Сурет 4.4 – Кәдімгі кремний күн батареясы

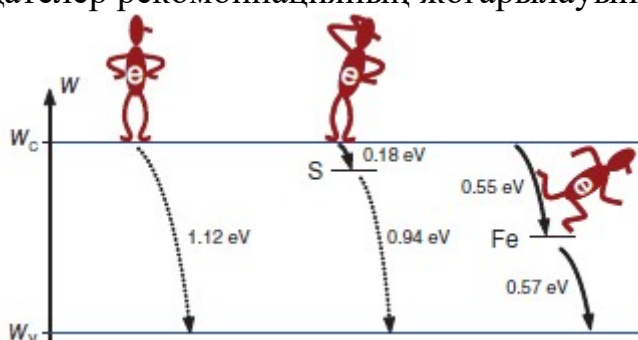
Бұл түзілген электрондарды ток коллекторлық рельсіне (шинаға) тасымалдайтын шағын металл жолақтар. Егер жүк күн батареясының екі полюсіне қосылса, бұл өндірілген электр энергиясын тартып алуы мүмкін.

#### 4.2.2 Рекомбинация және диффузия ұзындығы

Жасушаның жұмыс істеу әдісін егжей-тегжейлі қарастырмас бұрын, азшылық заряд тасымалдаушылардың мінез-құлқымен танысуымыз керек. Түскен жарық кезінде фотондардың жұтылуы арқылы электрон-тесік жұптары пайда болады және олар «артық» заряд тасымалдаушылар ретінде қол жетімді. Жарық көзі өшірілгенде, бөлшектер бастапқы күйді қалпына келтіру үшін қысқа уақыттан кейін қайта біріктіріледі.

Біз үшін ең маңызды механизм - жетілмегендік рекомбинациясы. Бұл теориялық идеалды кристал бөгде атомдарға, кристалдық құрылым қателеріне немесе соған ұқсас нәрселерге байланысты таза емес болғанда пайда болады. Бұл жағдайда тыйым салынған аймақ бос емес, қосымша деңгейлері бар (4.5-сурет). Осылайша, кремний кристалындағы темір атомы, мысалы, тыйым салынған аймақтың ортасында деңгейге әкеледі, бірақ күкірт атомы өткізгіштік диапазонынан тек 0,18 эВ төмен орналасқан. Электрон үшін қосымша деңгейлер валенттік диапазонға түсу оңайырақ және осылайша ықтималырақ болатын қадам деңгейлері сияқты нәрсені білдіреді. Күкірт атомының деңгейіне электронның өткізгіштік жолағынан жетуі оңай, бірақ ол әлі де  $1,12 \text{ эВ} - 0,18 \text{ эВ} = 0,94 \text{ эВ}$  диапазонының барлығын дерлік өтеуі керек. Алайда темір атомымен қадам биіктігі 0,56 эВ дейін төмендейді, сондықтан мұнда рекомбинация ықтималдығы өте үлкен. Бөтен атомдар тудыратын рекомбинация орталықтары да тұзақтар деп аталады. Бөтен

атомдардан басқа, бос тор орындары немесе кристалдық орын ауыстырулар сияқты кристалдық қателер рекомбинацияның жоғарылауына әкеледі.



Сурет 4.5 – Қоспалар жағдайында электрон-тесік жұптарының рекомбинациясы: бөгде атомдардың энергетикалық деңгейі «қадамдық деңгейлерді» құрайды, оның көмегімен электронның өткізгіштіктен валенттік аймаққа ауысуы ықтималдығы артады.

Кристалл беті де идеалды, шексіз ұзартылған кристалдың бұзылуы болып табылады. Сыртқы атомдардың электрондары байланыс серіктестерін таппайды және ашық байланыс ретінде қалады. Содан кейін олар қажетсіз беттік рекомбинацияларға әкеледі.

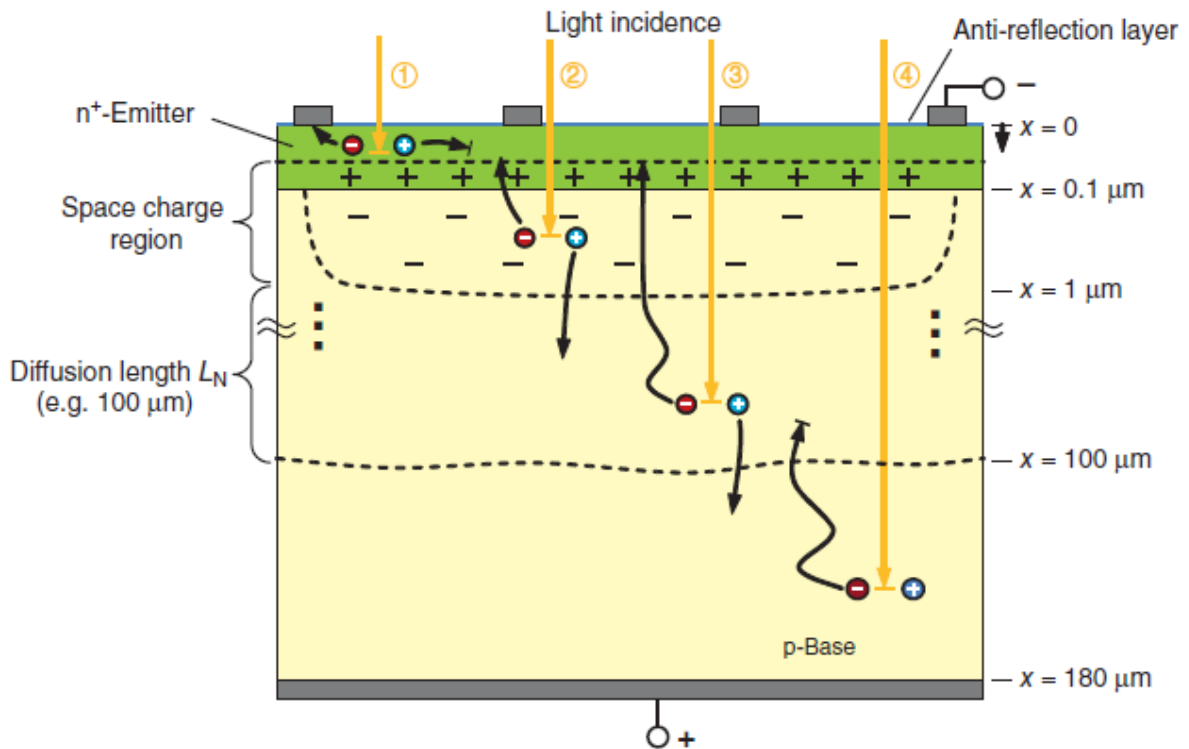
Осы тұрғыдан алғанда, күн батареялары үшін қолданылатын кристалдың мүмкіндігінше бір кристалды және жоғары тазалық дәрежесі болуы керек екендігі белгілі болады. Әртүрлі материалдарды салыстыру үшін белгілі бір материал үлгісінің тасымалдаушысының қызмет ету мерзімі өлшенеді. Тасымалдаушының қызмет ету мерзімі  $t_N$  генерацияланған электронның қайта біріктірілгенге дейін орта есеппен қанша уақыт бар екенін анықтайды. Кремнийдің сапасына және легирлеу концентрацияларына байланысты ол мс-ден  $\mu\text{s}$ -ге дейінгі диапазонда жатады.

Неғұрлым пайдалырақ  $L_N$  диффузиялық ұзындығын пайдалану болып табылады. Бұл генерацияланған электронның қайта біріктірілгенге дейін жартылай өткізгіште жүріп өткен жолын сипаттайды. Оны тасымалдаушының қызмет ету мерзімінен есептеуге болады:

$$L_N = \sqrt{D_N \cdot \tau_N}$$

$D_N$ - электронның диффузиялық константасы; c-Si үшін  $D_N=35 \text{ cm}^2/\text{s}$   
Кремнийдің әдеттегі сандық мәндері, мысалы, 50 мен 500  $\mu\text{m}$  аралығында.

#### 4.2.3 Күн батареяларының ішкі бөлігіндегі процесстер



Сурет 4.6 - Күн батареясының көлденең қимасы: жеке құрылған электронды-кемтік жұптары фототокқа үлес қосудың әртүрлі мүмкіндіктері

Фотон 1. Эмиттердегі абсорбция

Фотон 2. Ғарыштық заряд аймағындағы сіңіру

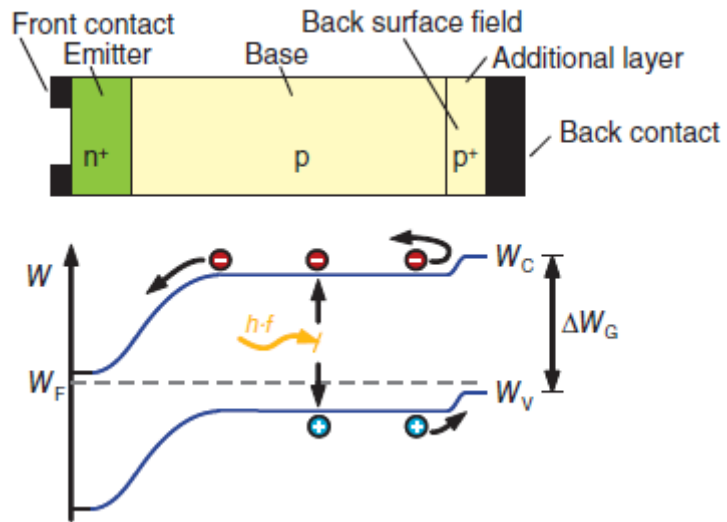
Фотон 3. Электрондардың диффузиялық ұзындығы шегінде жұтылу

Фотон 4. Электрондардың диффузиялық ұзындығынан тыс жұтылу

#### 4.2.4 Артқы беттік өріс

Күн батареясының төменгі аймағында пайда болатын электрондар үшін ерекше қауіп металл жартылай өткізгіш интерфейсі болып табылады, өйткені онда массивті беттік рекомбинациялар болуы мүмкін. Бұл қауіпті болдырмаудың қарапайым тәсілі - металл мен жартылай өткізгіш арасында жоғары легирленген  $p^+$ -қабатты қолдану. Бұған, мысалы, бор немесе допинг арқылы қол жеткізіледі алюминий атомдары.

Бұл қалай жұмыс істейді? Концентрация градиентіне байланысты саңылаулар осы жоғары легирленген  $p^+$ -қабатынан  $p$ -аймағына ағып, орнында бекітілген теріс зарядталған акцептор атомдарын қалдырады. Түзілген электр өрісі Back-Surface-Field (BSF) деп аталады. Ол ғарыштық заряд аймағының бағыты бойынша абсорбция арқылы пайда болған электрондарды қайтаратын электр айнасы сияқты әрекет етеді. Осылайша, жасушаның артқы жағындағы қажетсіз рекомбинация ықтималдығы айтарлықтай төмендейді.



Сурет 4.7 - Артқы беттік өрістің әсері: Жасалған электрондар  $pp^+$ -интерфейсіндегі қабат түзетін потенциалдық қадаммен тоқтатылады және қайтадан  $p$ -аймағына айдалады.

Әдебиет тізімі:

1. Mertens, K. (2018). *Photovoltaics: fundamentals, technology, and practice*. John Wiley & Sons.