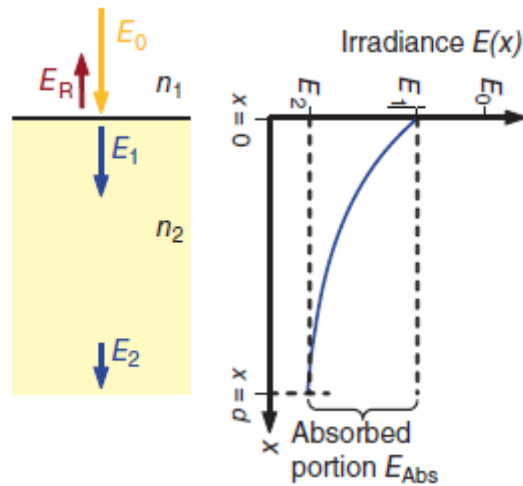


## Лекция 5 Фототок

Бір жағынан, фототоктың мөлшері күн элементі түскен фотондардың санына байланысты. Екінші жағынан, жарықты сіңіру нәтижесінде пайда болатын электронды-тесік жұптары бөлініп, үйге қауіпсіз жеткізілуі керек. Біз мұның шарттарын толығырақ қарастырамыз.

### 5.1 Абсорбция тиімділігі

32-суретте ұқсас күн батареясының жарық жұтуы көрсетілген.  $E_0$  жалпы сәулеленуінің бір бөлігі  $E_R$  бетінде көрінеді. Сонымен  $E_1 = (1-R) \cdot E_0$  бөлігі күн элементі ішіне енеді. Жарықтың интенсивтілігі енді 3.20 теңдеуіне сәйкес элементтен өту арқылы жұтылу арқылы әлсірейді. Төменгі жағында  $E_2 = E(x=d) = E_1 e^{-\alpha \cdot d}$  әлі қалады.  $E_{Abs} = E_1 - E_2$  айырмашылығы жасушада жұтылған жарық бөлігін береді.



Сурет 5.1 - Күн батареясындағы жарықтың жұтылуы

Абсорбция тиімділігін біз жұтылған фотондар саны мен сырттан түсетін фотондар саны арасындағы байланыс ретінде анықтаймыз.

$$\eta_{Abs} = \frac{\text{Number of absorbed photons}}{\text{Number of incident photons}} = \frac{N_{Ph\_Abs}}{N_{Ph}} = \frac{E_{Abs}}{E_0} = \frac{E_1 - E_2}{E_0}$$

Жоғарыдағы теңдеулерді енгізгеннен кейін мынаны аламыз:

$$\eta_{Abs} = (1 - R) \cdot (1 - e^{-\alpha \cdot d})$$

$R$  - шағылысатын фактор,  $\alpha$  - сіңіру коэффициенті

$\eta_{Abs}$  100% дерлік мәндерге жетуі мүмкін. Бұл үшін, бір жағынан, беттегі шағылыстыруды азайту. Екінші жағынан, жасушаны  $x=d$  үшін фотондар дерлік қалмайтындай етіп қою керек. Мұндағы мәселе жұтылу коэффициенті толқын ұзындығына қатты тәуелді. Жақын инфрақызыл аймақтағы жарық салыстырмалы түрде әлсіз жұтылады.

### 5.2 Кванттық тиімділік

Тіпті ол сіңіру тиімділігін 100%-ға дейін жеткізсе де, барлық электрон-тесік жұптары фототокқа ықпал ете алмайды. Осы себепті сыртқы кванттық

тиімділік  $\eta_{\text{Ext}}$  фототок пен жалпы түскен фотондар үшін қолданылатын электронды-тесік жұптары арасындағы қатынас ретінде анықталады:

$$\eta = \frac{\text{Number of usable electron-hole pairs}}{\text{Number of impinging photons}} = \frac{N_{\text{EHP}}}{N_{\text{Ph}}}$$

Сыртқыдан басқа, біз  $h\nu_{\text{int}}$  ішкі кванттық тиімділікті де анықтаймыз, мұнда шағылысудан болатын шығындар ескерілмейді:

$$\eta_{\text{Int}} = \frac{\eta_{\text{Ext}}}{1 - R}$$

Әрине, оның мәні әрқашан сыртқы кванттық тиімділіктен жоғары.

### 5.3 Спектрлік сезімталдық

Спектрлік сезімталдық  $S(\lambda)$  белгілі бір оптикалық қуаттың түсуімен қандай фототок пайда болатынын көрсетеді:

$$S(\lambda) = \frac{I_{\text{Ph}}}{P_{\text{Opt}}}$$

Екі шама арасындағы байланысты токты  $Q$  заряды ретінде және оптикалық қуатты  $W_{\text{Opt}}$  бір уақытта оптикалық энергия ретінде түсінгенде оңай табуға болады:

$$S(\lambda) = \frac{I_{\text{Ph}}}{P_{\text{Opt}}} = \frac{\frac{Q}{\Delta t}}{\frac{W_{\text{Opt}}}{\Delta t}} = \frac{N_{\text{EHP}} \cdot q}{N_{\text{Ph}} \cdot (h \cdot f)} = \frac{N_{\text{EHP}}}{N_{\text{Ph}}} \cdot \frac{q}{h \cdot c} = \frac{q}{h \cdot c} \cdot \lambda \cdot \eta_{\text{Ext}}(\lambda)$$

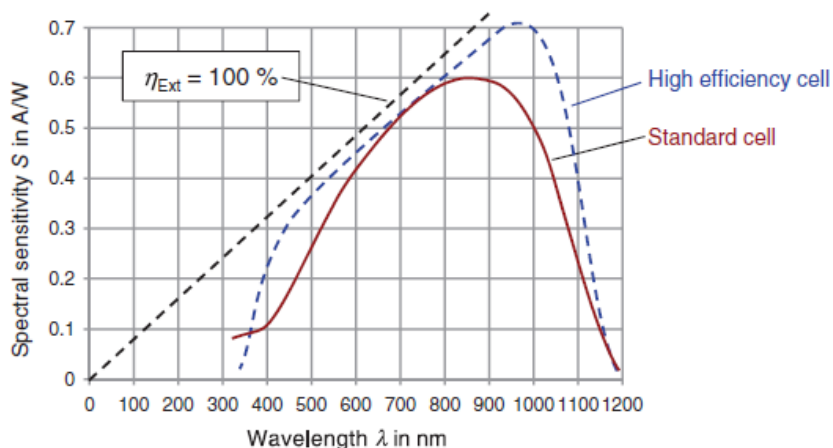
Алдын ала фактор  $q/(h \cdot c)$  тек табиғи тұрақтылардан тұрады және келесіге біріктірілуі мүмкін:

$$\frac{q}{h \cdot c} = \frac{1.6 \cdot 10^{-19} \text{ As}}{3.6 \cdot 10^{-34} \text{ Ws} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}} = 0.808 \cdot \frac{\text{A}}{\text{W} \cdot \mu\text{m}} = \frac{1}{1.24 \mu\text{m}} \cdot \frac{\text{A}}{\text{W}}$$

Осылайша, ақырында спектрлік сезімталдық үшін:

$$S(\lambda) = \frac{\lambda}{1.24 \mu\text{m}} \cdot \frac{\text{A}}{\text{W}} \cdot \eta_{\text{Ext}}(\lambda)$$

31-сурет c-Si стандартты күн батареясының, сондай-ақ жоғары тиімділік ұяшығының спектрлік сезімталдығының өлшенген қисығын көрсетеді. Бұл ретте  $\eta_{\text{Ext}}=100\%$  жағдайының идеалды қисығы көрсетілген. Көгілдір жарық аймағында (400–500 нм) кванттық тиімділік салыстырмалы түрде нашар екені байқалады.  $n^+$ -эмиттерде және генерацияланған саңылаулардың үлкен бөлігі фототокқа ықпал етпестен сол жерде рекомбинацияланады. Инфрақызыл спектрлік аймақта  $\eta_{\text{Ext}}$  қайтадан азаяды, өйткені сіңіру тек күн ұяшығының төменгі аймағында болады. 1100 нм-ден жоғары жарық фотондарының энергиясы кремнийдің жолақ аралығын жеңу үшін тым аз болады және осы себепті  $S(\lambda)$  салыстырмалы түрде кенеттен құлайды.



Сурет 5.2 - Екі күн батареясының спектрлік сезімталдығы: көк және инфрақызыл аймақтарда өлшенген қисықтар идеалды сызықтан ерекше ауытқиды.

### Сипаттамалық қисық және сипаттамалық параметрлер

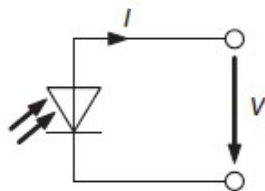
Күн батареясының сипаттамалық қисығы фотодиод принципіне сәйкес келеді. Дегенмен, күн батареясымен генератордың анықтамалық көрсеткі жүйесі негізінен таңдалады.

Энергия генерациясы енді бірінші квадрантта орын алады және осы себепті негізінен күн элементінің бірінші квадрантының сипаттамалық қисығы ғана көрсетіледі. Фотодиод белгісінің орнына арнайы күн батареясының белгісі стандартты болды және біз оны келесіде де қолданамыз. Күн батареясының типтік қисығы фотодиодтан танысқан эквивалентті тізбекті қоса алғанда 5.4-суретте көрсетілген. Біз оны оңайлатылған эквивалентті схема деп атаймыз, өйткені ол нақты күн элементтерінің әрекетін шамамен ғана сипаттайды.

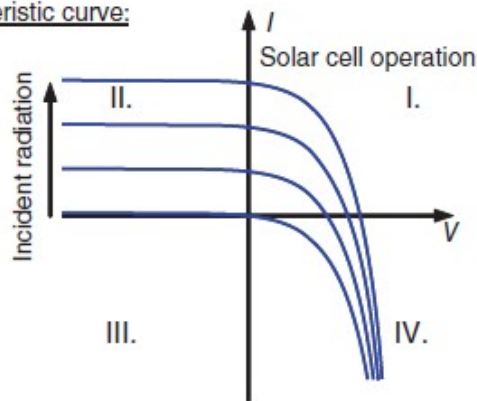
сипаттамалық қисық теңдеуі:

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

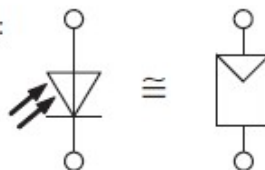
Generator reference-arrow system:



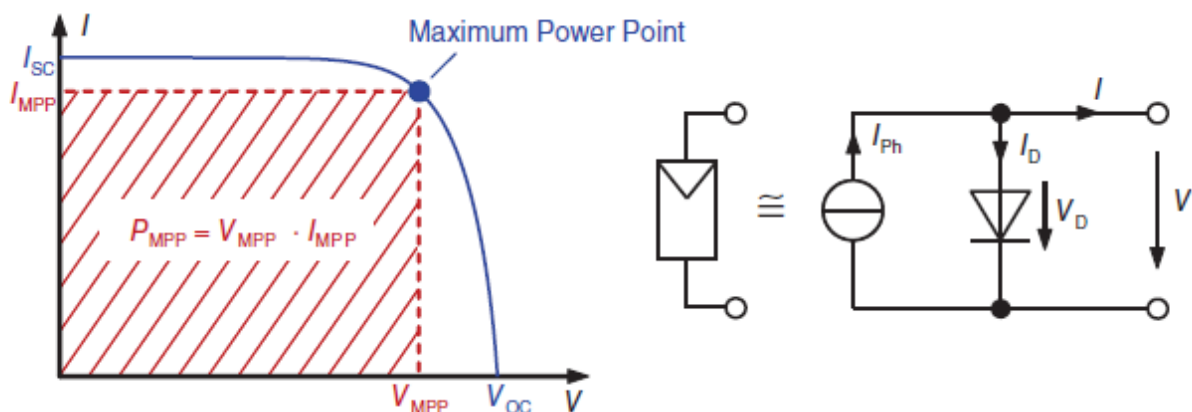
Characteristic curve:



Solar cell symbol:



Сурет 5.3 - Генератордың анықтамалық-көрсеткі жүйесіндегі күн батареясының сипаттамалық қисықтары



Сурет 5.4 - Күн батареясының сипаттамалық қисығы және онымен байланысты жеңілдетілген эквиваленттік схема

*Қысқа тұйықталу тогы  $I_{SC}$*

Қысқа тұйықталу тогы  $I_{SC}$  оның қосылымдарында қысқа тұйықталу кезінде күн батареялары арқылы жеткізіледі; кернеу  $V$  осылайша 0 болады.

$$I_{SC} = I(V=0) = I_{Ph} - I_S \cdot (e^0 - 1) = I_{Ph}$$

*Ашық тізбектегі кернеу  $V_{OC}$*

Екінші төтенше жағдай ток нөлге айналғанда орын алады. Бұл жағдайда алынған кернеу  $V_{OC}$  - Open Circuit Voltage деп аталады.

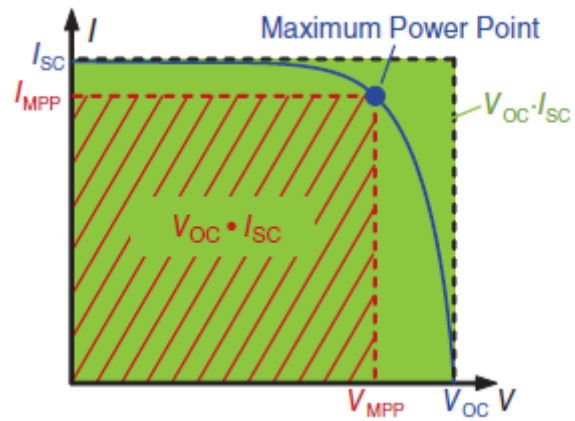
Ашық тізбектегі кернеуді анықтау үшін жоғарыдағы теңдеуді  $V$  бойынша шешеміз және  $I=0$  орнатамыз. Нәтиже  $I_{Ph}=I_{SC}$ :

$$V_{OC} = V(I=0) = m \cdot V_T \cdot \ln\left(\frac{I_{SC}}{I_S} + 1\right)$$

$$V_{OC} = m \cdot V_T \cdot \ln\left(\frac{I_{SC}}{I_S}\right)$$

*Максималды қуат нүктесі (MPP)*

Күн батареясы ол жұмыс істейтін нақты жұмыс нүктесіне байланысты әртүрлі қуаттарды қамтамасыз етеді. Максималды қуат берілетін жұмыс нүктесі Максималды қуат нүктесі (MPP) деп аталады. Жұмыс нүктесінің қуаты әрқашан  $V \cdot I$  бетіне сәйкес келетіндіктен бұл аймақ MPP жағдайында максималды болуы керек. Бұл жағдай 4.11-суретте көрсетілген. MPP-мен байланысты ток және кернеу мәндері  $I_{MPP}$  деп аталады және  $V_{MPP}$ .



Сурет 5.5 - Толтыру коэффициенті көлеңкеленгеннің сұр фон бетіне қатынасын береді

$$FF = \frac{1 + \ln\left(\frac{V_{oc}}{V_T} + 0.72\right)}{\frac{V_{oc}}{V_T} + 1}$$