

Päikesepatarei võimsuse ja kasuteguri määramine.

Koostas Irina Bichele, 2016

Päikese kiirgus

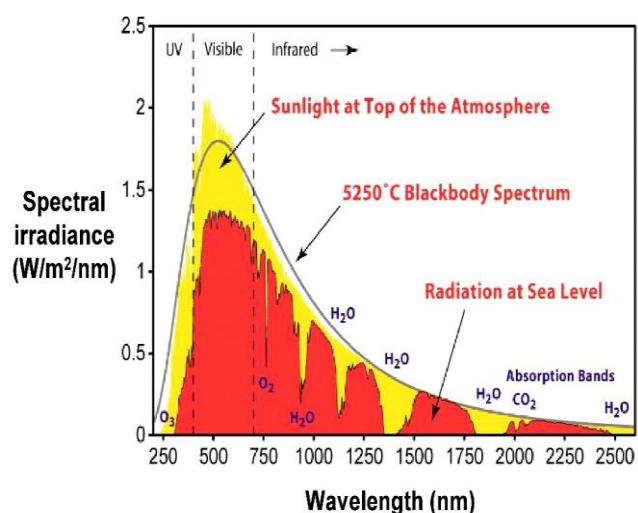
Päike on meie peamine energia allikas. Fotosünteesi käigus (kasutades sinist ja punast valgust) sünteesivad rohevetikad ja kõrgemad taimed anorgaanilistest ainetest orgaanilisi ühendeid, olles sellega kõikide toiduahelate esimene lüli. Kivisüsi, nafta, gaas ja põlevkivi on fossiilsetes taimedes salvestatud päikese energia.

Hajumise ja neeldumise tõttu nõrgeneb summaarne kiirgusvoog pilvitu atmosfääri puhul ligikaudu 20 %. Pilvisus nõrgendab summaarset kiirgust veel 20-30 %. Niimoodi jõuab maapinnale 50-60 % kiirgusest, mis oli atmosfääri ülemisel piiril. Keskpäeval on meie laiuskraadil Päikese kiirguse võimsus merepinnal keskmiselt: 600 W/m^2 – selge taeva korral (õliradiaatori võimsus), 400 W/m^2 – vahelduva pilvisuse korral, $50\text{-}100 \text{ W/m}^2$ – talvisel pilvisel päeval.

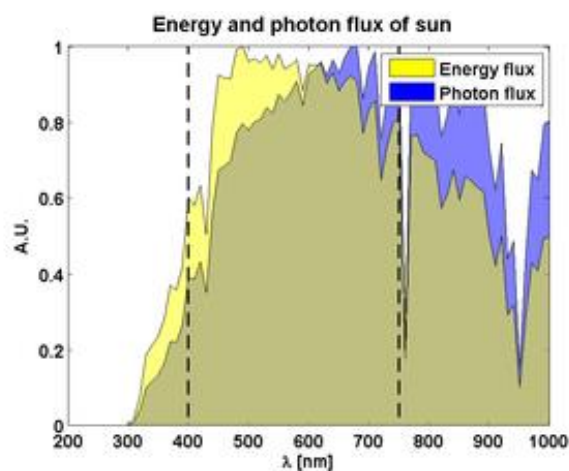
Päikese kiirgust (nagu ka teistest allikatest pärinevat kiirgust) iseloomustatakse spektriga. **Spektriiks nimetatakse** mistahes elektromagnetilise kiirgusega seotud suuruse (kiirguse intensiivsus, footonite voo tihedus) sõltuvust kiirguse lainepikkusest või sagedusest ja seda väljendatakse graafikuna, mille x-teljel on siis vastavalt lainepikkus või sagedus. Nähtavast kiirgusest (valgusest) rääkides võime ka öelda, et tegemist on sõltuvusega valguse värvusest. Kiirgust lainepikkuse vahemikus $0.7\text{...}10 \mu\text{m}$

nimetatakse soojuskiirguseks ehk infra-punaseks kiirguseks, **vahemikus $380\text{...}750 \text{ nm}$ nähtavaks kiirguseks ehk valguseks**, (vahemikku $700\text{...}750 \text{ nm}$ nimetatakse ka kaugpunaseks kiirguseks), vahemikus $100\text{...}380 \text{ nm}$ ultraviolettkiirguseks.

Kõige sagedamini esitatav Päikese kiirgusspekter on esitatud Joonisel 1. Tähelepanematule vaatajale jätab ta sageli eksitava mulje: kas Päike kiirgab peamiselt sinist ($\sim 450 \text{ nm}$) ja tunduvalt vähem punast ($\sim 650 \text{ nm}$) valgust? Kui uurida, mis füüsikaline suurus on y-teljel, siis ühikust Wm^{-2} ($W = \text{J}\cdot\text{s}^{-1}$) selgub, et see on kiirgusvoo tihedus erinevatel lainepikkustel (nm). Džaul (J) on energia ühik, seega joonisel olev spekter näitab, kui palju Päikese energiat toovad iga sekundi jooksul atmosfääri (Joonisel 1. kollane spekter) või maapinna (Joonisel 1. punane) ruutmeetrile langevad erinevate lainepikkustega footonid. Sellest energiast umbes 53% infrapunase kiirguse energiat, 42% - nähtava valguse ja 5% ultravioletti kiirguse energiat. Kui normeerida maapinnale jõudva kiirguse spekter footonite energia järgi (näit. sinise valguse footoni energia on keskmiselt 2.8 eV ja punase oma on vastavalt 1.8 eV) siis selgub, et



Joonis 1. Päikese kiirgusvoo tiheduse sõltuvus footonite lainepikkusest



Joonis 2. Suhteline Päikesekiirguse energia ja footonite voo sõltuvused kiirguse lainepikkusest

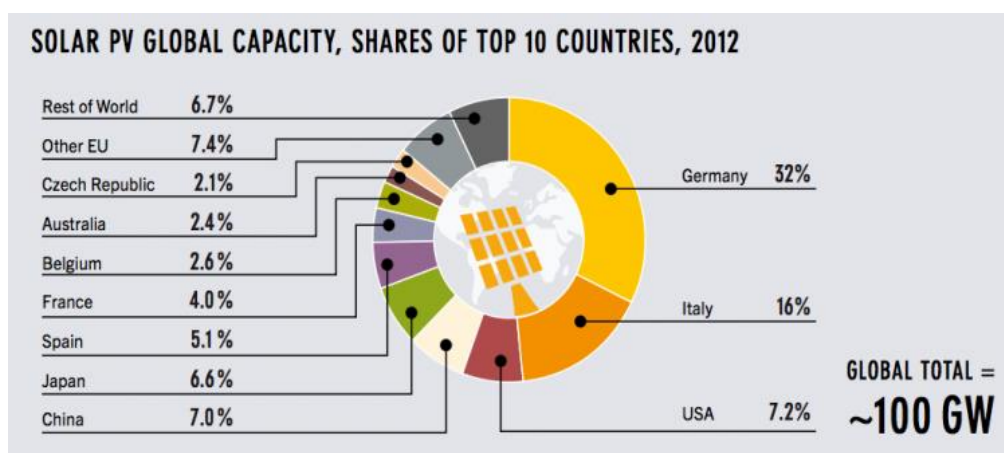
See on kiirgusvoo tihedus erinevatel lainepikkustel (nm). Džaul (J) on energia ühik, seega joonisel olev spekter näitab, kui palju Päikese energiat toovad iga sekundi jooksul atmosfääri (Joonisel 1. kollane spekter) või maapinna (Joonisel 1. punane) ruutmeetrile langevad erinevate lainepikkustega footonid. Sellest energiast umbes 53% infrapunase kiirguse energiat, 42% - nähtava valguse ja 5% ultravioletti kiirguse energiat. Kui normeerida maapinnale jõudva kiirguse spekter footonite energia järgi (näit. sinise valguse footoni energia on keskmiselt 2.8 eV ja punase oma on vastavalt 1.8 eV) siis selgub, et

lühilainelisi footoneid maapinnale jõuab isegi vähem kui punaseid ja kaugpunaseid (Joonis 2. sinine graafik).

Päikese poolt kiiratud ja maapinnale jõudnud energia ületab inimkonna vajadusi umbes 10 000 korda. Rohelised taimed ja vetikad kasutavad fotosünteesiks (ehk orgaanilise aine sünteesimiseks) 34% Maale langevast Päikese energiast (<http://galspace.spb.ru/index115.html>). Inimkond kataks kõik oma energia vajadused kui ta kasutaks ära ainult 2%. Ja siis võiksid kivisüsi, gaas ja nafta jääda maapõue. Tuleviku energeetika saab kindlalt olema seotud päikese- ehk fotogalvaaniliste elementidega (inglise keeles solar cell või photovoltaic cell, PVC), mis muundavad valgusenergia vahetult elektrienergiaks.

Fotogalvaanilist efekti (vabade laengute tekkimist valguse toimel) demonstreeris eksperimentaalselt prantsuse füüsik Alexandre-Edmond Becquerel 1839. aastal. Vene füüsik Aleksandr Stoletov ehitas 1888. aastal esimese fotoelektrilise elemendi. 1905. aastal seletas saksa füüsik Albert Einstein fotoefekti olemust – metalli pinnale langeva footoni energia kulub elektroni väljalöömise tööks ja sellele elektronile kineetilise energia andmiseks. A. Einstein sai selle eest 1921. aastal Nobeli füüsikaauhinna.

Esimene ränil põhinev päikeseelement konstrueeriti pärast Teist maailmasõda. Ja juba 1958 aastal olid päikeseplatadeid varustatud USA ja Nõukogude Liidu kosmoselaevad. Sellest ajast on räni puhastamise tehnoloogiad arenenud, päikeseplatade kasutegur on kasvanud 6%-lt (1958. a.) kuni 20%-ni (laborites saavutatud kuni 40%), nende tootmine kasvab järjest kiirenevas tempos, kuid siiski muundab inimkond tühiselt väikese osa päikese energiast elektriks. Joonisel 3. on märgitud riigid, kus Päikese energia kasutamine leiab kõige suuremat riigi ja rahva toetust.

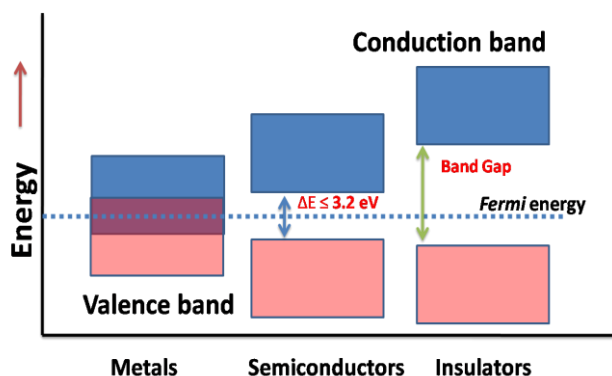


Joonis 3. Päikeseplatadeid abil toodetav energia erinevates riikides

Kuidas töötab päikeseplatarei

Selleks, et aru saada, kuidas muundab päikeseelement valgusenergia vahetult elektrienergiaks, tuleb tuletada meelde pooljuhtmaterjalide omadusi.

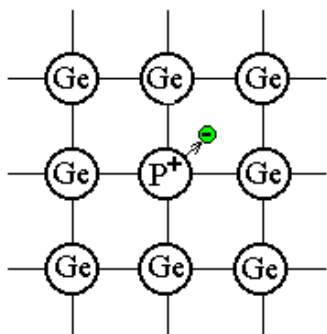
Pooljuhid on enamasti kristallstruktuuriga ained, st nende aatomid või molekulid paiknevad kindla korra kohaselt, moodustades kristallvõre. Nende hulka kuuluvad mõned lihtained (rän, germaanium, seleen, telluur, arseen, fosfor ja teised), palju oksiide, sulfiide, seleniide ja telluriide, mõned sulamid, paljud mineraalid jm. Elektrilised omadused teevad nad laialt levinuks tänapäeva tööstuses. Kõikides elektrijuhtides, pooljuhtides ja paljudes isolaatorites on domineeriv elektrooniline juhtivus.



Joonis 4. Metallides valents-(roosa) ja juhtivustsoon (sinine) võivad osaliselt kattuda, keelutsoon puudub. **Dielektrikutes** ehk isolaatorites puudub elektronidel liikumisvabadus, juhtivustsoon paikneb lootusetult laia (kuni 10 eV) keelutsooni taga. **Pooljuhtides** on keelutsoon palju kitsam (1-3 eV). Elektronid suudavad minna juhtivustsooni, valentsitsooni jäävad maha nn augud.

Tavaolekus pooljuhtmaterjalides ja isolaatorites puuduvad vabad laengukandjad, kõik olekud valentstsoonis (Joonisel 4. roosa) on täidetud ja puudub kattumine valents- ja juhtivustsooni (Joonisel 4. sinine) vahel. Valents ja juhtivustsoon on eraldatud teineteisest nn. keelatud tsooniga. Erinevus pooljuhtide ja isolaatorite vahel seisnebki vaid keelutsooni laiuses. Isolaatorites keelatud tsooni laius on sageli nii suur, et elektronid ei oma küllaldast energiat selle ületamiseks. Pooljuhtides on ta palju kitsam ja kiiruselt lisaenergiat saanud (ergastatud) elektron lahkuv valentstsoonist juhtivustsooni ja jätab enda järgi vakantse elektronoleku. Selline elektroni vakants valentstsoonis käitub kui positiivselt laetud osake ja seda nimetatakse auguks. Augu laeng on sama suur kui elektronil kuid vastupidise märgiga ($+1,6 \cdot 10^{-19}$ C). Seega augud ja elektronid liiguvad elektriväljas eri suundades. Elektrivälja mõjul võib see puuduva elektroni koht liikuda kristallvõres läbi tema täitumise teiste elektronidega. Sellist elektrijuhtivust **lihtainetest** pooljuhtides nim. **omajuhtivuseks**.

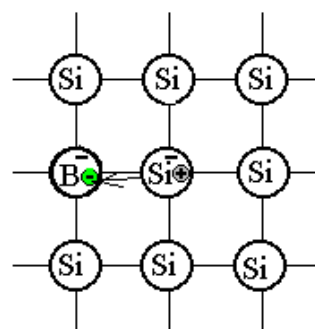
Sellest erinev on **lisandjuhtivus**, kus laengukandjaid tekitatakse kunstlikult, lisades lähteainele kõrgema või madalama valentsiga lisandeid. Lisandite sisseviimise protsessi materjali nimetatakse



Joonis 5. n - pooljuht

(elektronjuhtivusega pooljuht).

Kristallvõresse viidud nn. doonorlisandi fosfori üks elektron aatomil on üks elektron rohkem, see ülearune elektron jääbki kristallis vabalt liikuma.



Joonis 6. p- pooljuht

(aukjuhtivusega pooljuht).

Lisandi - boori aatomil on üks elektron vähem kui ränil - alumises täidetud tsoonis tekib vaba koht (nn. "auk"), kuhu võib sattuda naaberaatomi elektron

legeerimiseks. Lisandite kontrollitud sisestamisel pooljuhtmaterjalidesse kasutatakse termilise difusiooni ja ioonpommitamise meetodeid. Seejuures on määrava tähtsusega asjaolu, et juhtivuselektronide arvu oluliseks suurendamiseks on vaja väga väikest lisandikogust. Nii vähendab 1 mikrogramm fosforit 50 grammis ränis selle materjali eritakistust 100 000-kordselt.

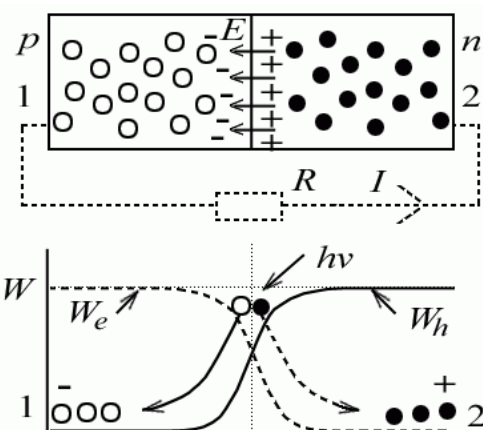
Lisandiatomite "sobitamisel" 4 valentsete Ge või Si kristallvõresse jääb elektrone "üle" (kui lisandiks on näit. 5 valentsed As või P), või tuleb puudu (kui valents on madalam: näit. 3 valentselektroniga Al või B). Esimesel juhul tekivad kristallis vabad elektronid, millele vastab elektronjuhtivusega ehk **n-pooljuht** (Joonis 5). Valentselektronide puudujääk seevastu tekitab

võres laengudefekti - nn. "augu". Elektriväljas selline "auk" nihkub ja võib haarata puuduva elektroni naaberaatomilt. Nii tekivad "triivivad augud", millele siis vastab aukjuhtivusega ehk **p-pooljuht** (Joonis 6). Pooljuhtide elektriliste omaduste mitmekesisus ning terav sõltuvus välistingimustest teeb neist ideaalse materjali elektrooniliste seadmete konstrueerimisel. Kombineerides omavahel p- ja n-pooljuhte saab luua erinevaid elektroonilisi seadmeid (pooljuhtdiodid, transistorid, türistorid, fotodiodid, valgusdiodid, pooljuhtlaserid jne)

p-n siire

Kui legerimisega tekitada pooljuhis kaks erineva juhtivusega osa, siis p- ja n-juhtivusega osade üleminekupiirkonda nimetatakse p-n siirdeks. Siirdel hakkab toimuma laengukandjate vahetus (Joonis 7). Doonorlisandiga n-osas on hulk elektrone, millel puudub kristallvõres sobiv koht. Need kohad on olemas aga kõrvalolevas p-osas. Elektronid hakkavad soojusliikumisest põhjustatud difusiooni toimel liikuma p-osas olevatele vabadele kohtadele, mille tulemusel enne neutraalne p-osa saab negatiivse laengu ja n-osa, kaotades elektrone, samasuguse positiivse laengu (Joonis 7). Laengukandjate difusioon toimub ainult siirdes, sest seda hakkab takistama tekkiv elektriväli E . See elektriväli soodustaks elektronide liikumist p-osast n-ossa ja aukude liikumist n-osast p-ossa. Kui juhtmega ühendada omavahel n- ja p-osad tekib (alalis)elektrivool. Keskkonna faktori, näiteks kiirguse või temperatuuri mõjul, vabade laengukandjate paaride arv kasvab, elektrivälja mõjul augud suunduvad p- ja elektronid n-ossa, vastavalt suureneb ka voolutugevus.

Päikeseelement ehk fotogalvaaniline element ongi p- ja n-pooljuhtidest koosnev seadis milles langev lühikese lainepikkusega kiirgus, näiteks päikesevalgus, suudab toota elektrivoolu ilma, et oleks ühendatud väliste energiaallikate külge.



Joonis 7. Laengute jaotumine, elektrivälja E ja potentsiaali barjääride W_e ja W_h tekkimine p-n siirde piirkonnas. Valguse toimel tekkinud laengud liiguvad potentsiaali alanemise suunas.

Päikeseplatari ehitus

Päikeseplatari koosneb paljudest päikeseelementidest, mis on omavahel ühendatud kas jadamisviisi või rööbiti, sõltuvalt sellest, kui suurt voolutugevust või pinget soovitakse saada.

Päikeseplatari elemente valmistatakse erinevatest materjalidest ja sellest on tingitud ka nende nimetused:

Kristalsed paneelid: (monokristalsed ja polükristalsed) on praegusel hetkel sagedamini kasutatavad. Efektiivsus 11–17%, 10 ruutmeetrisel pinnal paneel suudab toota kuni 1kW elektrienergiat, keskmine tööaeg kuni 30 aastat. Monokristalsed paneelid on musta, polükristalsed aga sinist värvi.

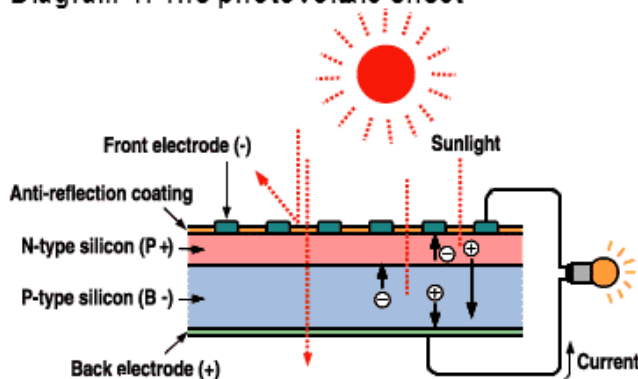
Amorfset paneelid: moodsam tehnoloogia, kus kihid aurutatakse või pritsitakse alusele nagu värviprinteris, võimaldab nii jäikade kui väga õhukeste ning painduvate paneelide tootmist. Efektiivsus 3–11%, 10 ruutmeetrisel paneel suudab toota kuni 500W elektrienergiat, keskmine tööaeg 10 aastat. Ühtlast halli värvi. Materjalidest kasutatakse näiteks kaadmium telluriidi (CdTe) või amorfset räni (a-Si).

Päikesepaneel on nagu kihtidena kokku laotud ja pressi all lamineeritud kaart. Kihid on järgmistest materjalidest:

- ❖ Katteklase või kattekile;
- ❖ Peegeldust vähendava pinnatöötlemisega materjal;
- ❖ Valgustatud poolel on elektrood võrgu või ribade kujul;
- ❖ Õhuke kiht (et valgus pääseks p-n siirdeni) n-pooljuhti
- ❖ Paksem kiht p-pooljuhti;
- ❖ Alumine plaat-elektrood.

Kui erinevad kihid on omavahel kokku lamineeritud, pannakse ümber alumiiniumist raam ja kinnitatakse kaablid. Tulemuseks ongi struktuur, kus valgustatud n-tüüpi pooljuht omandab negatiivse laengu ning p-pooljuht positiivse laengu (nagu patareis), tekitades potentsiaalide vahe. Kui ühendada erinevad päikesepatarei pooled juhtmetega, hakkavad elektronid liikuma valgustatud n-pooljuhilt p-pooljuhi suunas, kus rekombineeruvad aukudega. Tavaliselt on lisaks juhtmetele elektri ahelas ka elektrienergia tarbija ehk koormus (näiteks lamp, kütteelement). Elektrivool teeb sellel koormusel tööd eraldades võimsust. Valgusenergia praktiliseks kogumiseks koondatakse päikeseelemendid suurematesse moodulitesse.

Diagram 1. The photovoltaic effect

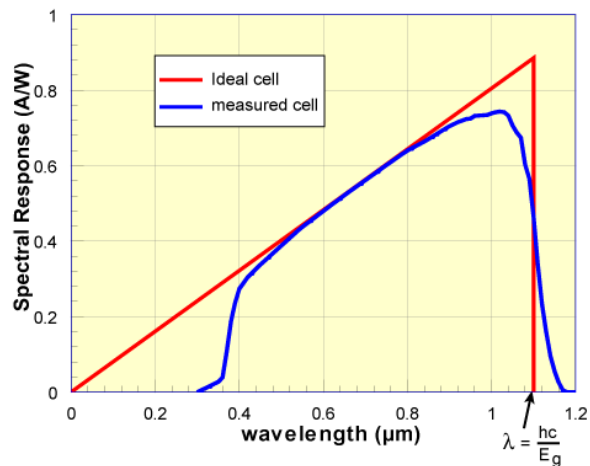


Joonis 8. Päikesepatarei kihiline ehitus.

Päikesepatarei efektiivsus

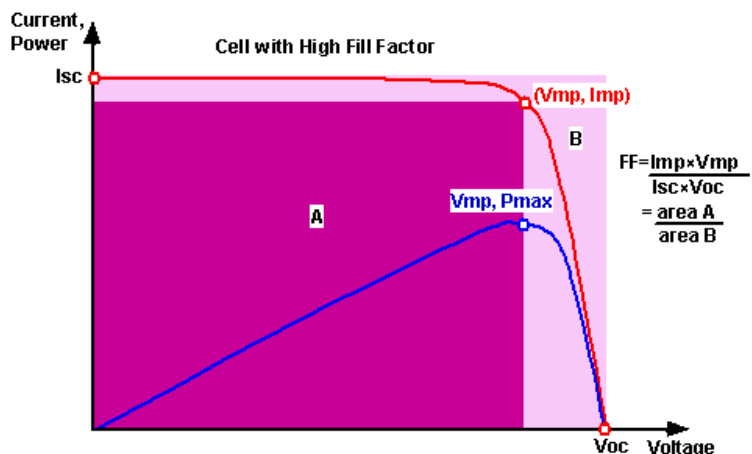
Iga üksiku päikeseelemendi kiirguse energia elektriks muundamise efektiivsus sõltub kristalse või amorfse materjali kvaliteedist, p-n siirde pindalast, peegeldumise kadude suurusest, temperatuurist, spektraalsest tundlikkusest ja kiirguse neeldumisest aines. Ränil baseeruva päikeseelemendi spektraalne tundlikkus (Joonis 9.) on suurem pikalainelises piirkonnas. Nähtava valguse piirkonnas on räni neeldumisspekter sarnane Päikese footonite voo tiheduse spektriga (vt. joonis 2).

Päikesepaneeli elektrilisi omadusi iseloomustatakse läbi voolu-pinge tunnusjoone ehk I-U kõvera, kus I on voolutugevus ja U – potentsiaalide vahe ehk pinge (Joonis 10.). Elektri ahelas, mis koosneb päikesepatareist, koormustakistusest, volt- ja ampermeetrist (Joonis 11.), registreeritakse voolu ja pinget muutes takistuse R suurust. Mõõtmisi tehakse konstantsel valgusel ja temperatuuril. Kui alustatakse mõõtmisi takistusest $R = 0 \Omega$ on voolutugevus maksimaalne ja seda nimetatakse lühisvooluks (I_{sc} , short-circuit). Sujuvalt takistust suurendades saadakse I-U kõver, mille teises otsas voolutugevus langeb nulli ja pinge väärtus (U_{oc} , open-circuit) on nn avatud ahela pinge, ehk maksimaalne päikesepatarei poolt tekitatav pinge elektrivoolu puudumisel. I_{sc} ja U_{oc} sõltuvad välistingimustest (Joonis 12.). Mida intensiivsem on päikesekiirgus seda rohkem tekib elektrivoolu paare ja seda suurem on vool I_{sc} . Päikeseelemendi kui pooljuhi elektrijuhtivus sõltub tugevalt temperatuurist. Soojusena lisaenergiat saanud elektronid lähevad küll kergemini valentstsoonist juhtivustsooni, kuid ka palju kergemini rekombineeruvad aukudega. Elektrivõlli kuul p-n siirdel

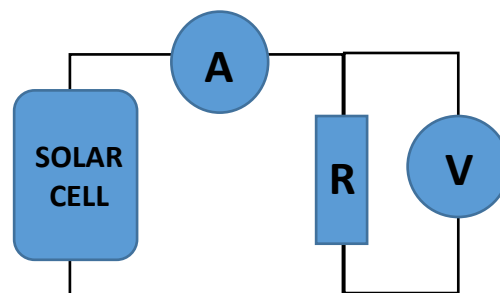


Joonis 9. Klaasiga kaetud räni elemendi spektraalne tundlikkus. Räni neelab sinist valgust vähem kui punast. UV-s neelab katteklase.

on nõrgem, vastavalt on väiksem ka potentsiaalide vahe patarei elektroodide vahel. Siit mida madalam on paneeli temperatuur seda kõrgem on pinge U_{oc} .

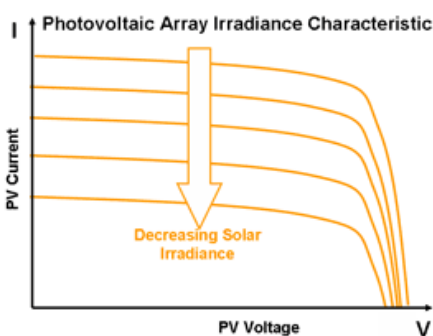
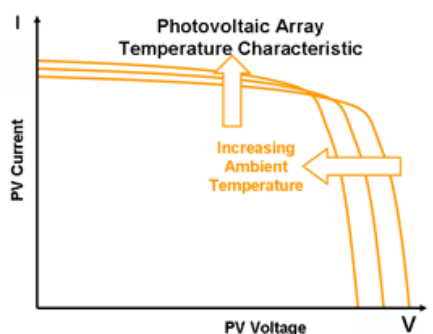


Joonis 10. Päikesepatarei voolu-pinge (punane) ja võimsuse –pinge (sinine) tunnusjooned.



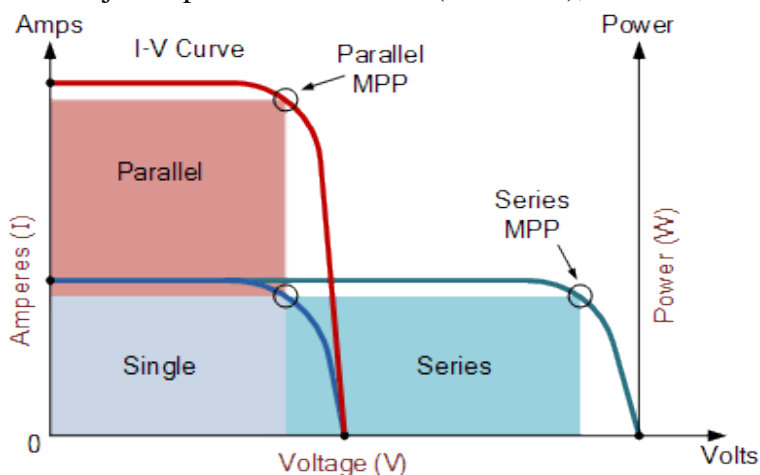
Joonis 11. Elektriskeem päikesepatarei voolu-pinge tunnusjoone mõõtmiseks.

Lühisvool ja avatud ahela pinge on maksimaalsed voolu ja pinge väärtused, mida päikesepatarei välja annab. Kuid nendes I-U kõvera punktides võimsus ($P = I \cdot U$) võrdub nulliga. Aga tarbija on huvitatud just võimsusest. Teoreetiliselt võrduks maksimaalne päikesepatarei võimsus $P_{max} = I_{sc} \cdot U_{oc}$, mis on joonisel 10. helerooa risküliku **B** pindala. Kui I-U kõvera andmetest arvutada elektrivoolu võimsus, selgub, et P on maksimaalne kõvera nn „põlve“ kohal (Joonis 10, sinine kõver) ja tegelik $P_{mp} = I_{mp} \cdot U_{mp}$ (mp – lühend maximal power, joonisel P_{mp} tähistatud kui P_{max}) võrdub tumeroosa risküliku **A** pindalaga ja on umbes 80% teoreetilisest väärtusest.



Joonis 12. I-U kõvera kuju sõltuvus temperatuurist ja kiirguse intensiivsusest

Kui ühendada koordinaatide alguspunkt punktiga (U_{mp}, I_{mp}) siis sirge tõusu väärtus (I_{mp}/U_{mp}) võrdub päikesepatarei sisejuhtivusega ehk on sisetakistuse pöördväärtusega. Siit tähtis järeldus: **kui koormustakistus R võrdub päikesepatarei sisetakistusega, on eralduv võimsus maksimaalne** antud valguse ja temperatuuri tingimustes. Kui aga kiirguse intensiivsus ja temperatuur muutuvad (Joonis 12), muutuvad ka



Joonis 13. I-U kõvera kuju sõltuvus elementide ühendamise viisist.

I-U kõvera kuju, I_{sc} , U_{sc} , I_{mp} , U_{mp} ja koormustakistus maksimaalsel võimsusel (R_{mp}). Vastavalt vajadusele päikeseelemendid ühendatakse patareiks jadamisi või rööbiti. Jadamisi ühendatud elemendid annavad suurema avatud ahela pinge, rööbiti ühendatud – suurema lühisvoolu (Joonis 13.)

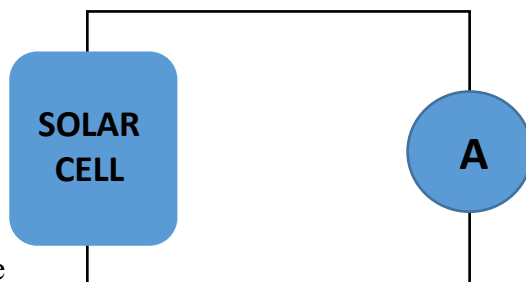
Praktiline osa

Vahendid: päikesepatarei, statiivile kinnitatud diod-valgusti, luksmeeter (mõõteriist valgustustiheduse mõõtmiseks luksides), 2 multimeetrit, takistussalv, juhtmed.

Praktiline töö 1. Päikesepatarei lühisvoolu sõltuvus kiirguse intensiivsusest

ETTEVAATUST! Diodlambi valgus on väga ere, ärge vaadake otse lambi suunas!

1. Mõõtke ja märkige protokollis päikesepatarei pindala.
2. Ühendage päikesepatarei multimeetriga, mille valige alalisvoolu (DC) voolutugevuse mõõtepiirkond, 20 mA (kontaktid COM ja mA);
3. Valgusallikas tõstke statiivil maksimaalsele kõrgusele;
4. Asetage päikesepatarei lambi alla, pange kõrvale luksmeetri andur;



Joonis 14. Skeem lühisvoolu mõõtmiseks.

5. Lülitage sisse luksmeeter (alumine lüliti, keskmine positsioon), nõrga valguse mõõtmiseks valige kõige väiksem mõõtepiirkond 2000 (ülemine lüliti, alumine positsioon), ekraani alumises servas näete kirja „x1“ ja tehke esimene lühisvoolu mõõtmine nõrgal toa valgusel.
6. Ühendage vooluvõrku lambi adapter ning jätkake valgustustiheduse **E** ja vastava voolutugevuse **I** registreerimist lastes lampi statiivil järjest allapoole sammuga umbes 6-7 cm. Vahepeal tuleb valida luksmeetril suuremat mõõtepiirkonda. Kui ekraani alumises servas on kiri „x10“, tähendab see, et ekraanil oleva näidu tuleb 10-ga korrutada, kui on kiri „x100“, siis korrutada 100-ga.



Joonis 15. Luksmeeter.

7. **Ärge asetage lampi liiga patarei lähedale (lähemale kui 15 cm)!**
8. Täitke tabel:

Päikesepatarei pindala $S = \dots\dots\dots \text{cm}^2$

Tabel 1.

| Valgustustihedus E , lx (mõõdetakse) | Valguse võimsus P_v , W (arvutatakse, valem (2)) | Lühisvoolu tugevus, mA (mõõdetakse) |
|---|---|--|
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |

9. Katse lõpus lülitage lamp ja luksmeeter välja.

Praktiline töö 2. Päikesepatarei voolu-pinge tunnusjoon ja kasutegur

1. Koostage elektriskeem vastavalt joonisele **11**. Ühel multimeetril (töötab kui ampermeeter, **A**) valige alalisvoolu (DC) voolutugevuse mõõtepiirkond, 20 mA (ühendusjuhtmete kontaktid COM ja mA) ja teisel (töötab kui voltmeeter, **V**) alalisvoolu (DC) pinge mõõtepiirkond 2V (hiljem 20 V) (ühendusjuhtmete kontaktid COM ja V);

- Takistussalvel valige alguses takistus $R = 0$ (kontrollige, et kõik lülitid näitavad nulli);
- Valgusallikas tõstke statiivil sellisele kõrgusele, et valgustatus lambi all oleks **umbes 3000 lx**. Märkige üles täpne valgustustihedus (on tähtis kasuteguri arvutamisel!). Asetage luksmeetri anduri kohale päikeseptareid ja jälgige, et katse ajal ptareid asuks sama koha peal ja valgustatus ei muutuks;
- Registreerige lühisvool ($R = 0$).
- Takistussalve piikonnal „x10“ valige 5 (sellega olete valinud $5 \times 10 = 50 \Omega$) ja tehke järgmine mõõtmine. Suurendades takistust (valides järjest suuremaid piirkondi) mõõtke I-U kõver kuni voolutugevus muutub väga väikeseks $< 0.1 \text{ mA}$.
- Täitke tabel:

Valgustustihedus lx = W

Tabel 1.

| Takistus R, Ω (antakse ette) | Pinge U, V (mõõdetakse) | Vool I, mA (mõõdetakse) | Võimsus $P_e = I \cdot U$, W (arvutatakse) | Kasutegur P_e/P_v (arvutatakse) |
|--|----------------------------|----------------------------|--|--------------------------------------|
| 0 | | | | |
| 50 | | | | |
| 100 | | | | |
| 500 | | | | |
| 1000 | | | | |
| 1500 | | | | |
| 2000 | | | | |
| 3000 | | | | |
| 5000 | | | | |
| 8000 | | | | |
| 10000 | | | | |
| 20000 | | | | |
| 50000 | | | | |

Praktiline töö 3 (grupitöö). Päikeseptareide ühendamise moodulisse

Moodustage grupi naabritega (kes on samaaegselt lõpetanud eelnevad eksperimendid)

- Ühendage oma rühma päikeseptareid (2 tk) kord jadamisi, kord rööbiti ning mõõtke I-U kõverad samal valgusel nagu tegite seda ühe ptareiga (**umbes 3000 lx**). **Pidage meeles, et kaks ptareid neelavad 2 korda rohkem valgust kui üks.**
- Tulemused kandke kahte eraldi tabelisse:

Päikeseptareide arv

Ptareide ühendamise viis ... (jadamisi/rööbiti).....

Valgustustihedus lx = W

Tabel 2.

| Takistus R, Ω (antakse ette) | Pinge U, V (mõõdetakse) | Vool I, mA (mõõdetakse) | Võimsus $P_e = I \cdot U$, W (arvutatakse) | Kasutegur P_e/P_v (arvutatakse) |
|--|----------------------------|----------------------------|--|--------------------------------------|
| 0 | | | | |
| 50 | | | | |
| 100 | | | | |
| 500 | | | | |
| 700 | | | | |
| 1000 | | | | |
| 1500 | | | | |
| 2000 | | | | |
| 3000 | | | | |
| 5000 | | | | |

| | | | | |
|-------|--|--|--|--|
| 8000 | | | | |
| 10000 | | | | |
| 15000 | | | | |
| 20000 | | | | |
| 30000 | | | | |
| 50000 | | | | |
| 70000 | | | | |

Päikeseplatade arv

Platade ühendamise viis ... (jadamisi/rööbiti)

Valgustustihedus lx = W

Tabel 3.

| Takistus R, Ω (antakse ette) | Pinge U, V (mõõdetakse) | Vool I, mA (mõõdetakse) | Võimsus Pe=I·U, W (arvutatakse) | Kasutegur Pe/Pv (arvutatakse) |
|---------------------------------|----------------------------|----------------------------|------------------------------------|----------------------------------|
| 0 | | | | |
| 50 | | | | |
| 100 | | | | |
| 500 | | | | |
| 700 | | | | |
| 1000 | | | | |
| 1500 | | | | |
| 2000 | | | | |
| 3000 | | | | |
| 5000 | | | | |
| 8000 | | | | |
| 10000 | | | | |
| 15000 | | | | |
| 20000 | | | | |
| 30000 | | | | |
| 50000 | | | | |
| 70000 | | | | |

Arvutused

Valguse võimsuse Pv (W) arvutamine valgustustiheduse andmetest luksides.

Valgustustihedus e. valgustatus luksides (lx) näitab pinnauhikule (m²) langevat valgusvoogu lumenites (lm). Luksmeeter sisaldab silma tundlikkuse kõverat imiteerivat filtrit ja seega mõõdab silmale nähtavat kiirgust, lainepikkustega vahemikus 380-780 nm.

Kasutatava LED lambi jaoks kasutame järgmist empiirilist teisendusvalemit:

$$1 \text{ lx} = 3,5 \cdot 10^{-7} \text{ W/cm}^2 \quad (1)$$

Päikeseplatadele pinnaga S (cm²) langeva valguse võimsus Wattides võrdub:

$$P_v \text{ (W)} = E \text{ (lx)} \cdot 3,5 \cdot 10^{-7} \text{ (W/cm}^2) \cdot S \text{ (cm}^2) \quad (2)$$

Kasuteguri arvutamine

Kasutegur näitab, kui suure osa pealelangeva kiirguse energiast suudab päikeseplatarei muuta elektrienergiaks. Kasutegurit väljendame protsentides kasutades valemit:

$$\eta = \frac{P_e}{P_v} \cdot 100\% \quad (3)$$

Aruande vormistamine (vt. näidisaruanne)

Iga praktilise töö aruanne peab sisaldama töö pealkirja, autori nime, katsete elektriskeeme, tabelleid andmetega ja arvutustega, arvutusvalemeid, graafikuid. Tähtsad tulemused peavad olema eraldi tabelina välja toodud ja kommenteeritud (järeldused).

Graafikud. Tabelite andmete põhjal tehke järgmised graafikud:

1. Lühisvoolu tugevuse sõltuvus valguse võimsusest (x-teljel valguse võimsus P_v (W), y-teljel lühisvool I (mA)). Lähendage saadud graafik sirgega. Kirjutage graafikule ka sirge võrrand.
2. **Voolu-pinge** sõltuvused (3000 lx) ühe patarei jaoks ja erinevatel patareide ühendamise viisil kandke samale graafikule, sarnaselt graafikuga Joonisel 13. (x-teljel pinge U (V), y-teljel voolutugevus I (mA)).
3. Elektrivoolu **võimsuse-pinge** sõltuvused (3000 lx) ühe patarei jaoks ja erinevatel patareide ühendamise viisil kandke samale graafikule (x-teljel pinge U (V), y-teljel vooluvõimsus P_e (W)).
4. Päikeseatarei **kasuteguri-pinge** sõltuvused (3000 lx) ühe patarei jaoks ja erinevatel patareide ühendamise viisil kandke samale graafikule (x-teljel pinge U (V), y-teljel kasutegur (%)).

Graafikud võivad olla tehtud arvutis (saab printida praktikumiruumis või võib saata juhendaja meilile irina.bichele@ut.ee) või millimeeterpaberil (küsi juhendajalt).

Tulemused

Leidke tabelitest/grafikutest järgmised päikeseatareid iseloomustavad parameetrid (vt. ka joonis 10.):

| Patareide arv | Patareide ühendus | Valguse võimsus | Lühisvool I_{sc} | Avatud ahela pinge U_{oc} | Teoreetiline patarei võimsus $P_{max} = I_{sc} \cdot U_{oc}$ | Elektrivoolu kasulik võimsus P_{mp} | $\eta = \frac{P_e}{P_v} \cdot 100\%$ | Kasuliku ja teoreetilise võimsuste suhe P_{mp}/P_{max} |
|---------------|-------------------|-----------------|--------------------|-----------------------------|--|---------------------------------------|--------------------------------------|--|
| | | | | | | | Maksimaalne kasutegur η | |
| tk. | | mW | mA | V | mW | mW | % | % |
| 1 | | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 2 | rööbiti | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 2 | jadamisi | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |

Järeldused

Kommenteeri saadud tulemusi (kas võimsus sõltub patareide arvust või ühendamise viisist? Kas ühendamine moodulisse mõjutab kasutegurit?....)

Kasutatud allikad

Joonised:

wikipedia.org/wiki/Päikesekiirgus

http://2012.igem.org/Team:ETH_Zurich/Modeling/Photoinduction

<http://www.pveducation.org/pvcdrom>

<http://www.abb-conversations.com/2013/12/7-impressive-solar-energy-facts-charts/>

http://www.bls.gov/green/solar_power/

<http://www.pveducation.org/pvcdrom/4-solar-cell-operation/fill-factor>

<http://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/spectral-response>

http://fn.bmstu.ru/data-physics/library/physbook/tom6/ch4/texthtml/ch4_5.htm

http://www.mpoweruk.com/solar_power.htm

<http://www.obs.ee/~jaak/loengud/teine/teine/kaksteist.html#pool>

[https://et.wikipedia.org/wiki/Luksmeeter#/media/File:ELV_LM_1302_\(Lux_Meter_LX1010BS\).jpg](https://et.wikipedia.org/wiki/Luksmeeter#/media/File:ELV_LM_1302_(Lux_Meter_LX1010BS).jpg)

<http://www.alternative-energy-tutorials.com/energy-articles/solar-cell-i-v-characteristic.html>

Tekst

<http://www.obs.ee/~jaak/loengud/teine/teine/kaksteist.html#pool>

<http://www.päikeseküte.ee/artiklid/paikesenergia-eesis/>

<http://www.tehnikamaailm.ee/paikesepatareide-tulevik/>

http://b-eco.ru/articles/mono_poly_amorphous/

Materjalide elektrilised omadused staff.ttu.ee/~enmm/MFK11/MTA5.doc