

Yksikiteiset piiaurinkokennot

Kandidaatin tutkinto

Turun yliopisto

Fysiikka

2025

Otso Lauerma

Tarkastaja:

FT Pekka Laukkanen

Turun yliopiston laatujärjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck-järjestelmällä

TURUN YLIOPISTO
Fysiikan laitos

Lauerma, Otso Yksikiteiset piiaurinkokennot

Kandidaatintutkinto, 27 s.
Fysiikka
Kesäkuu 2025

Aurinkoenergia on uusiutuvan energian teollisuuden järeimpiä peruspilareita. Tämä tutkielma on kvalitatiivinen kirjallisuuskatsaus niiden rakenteeseen ja toimintaperiaatteisiin. Aurinkokennojen olennaisia piirteitä lähestytään olennaisesti yksikiteisen piin kautta, mutta peruseriaatteet fotonien absorptiosta sähköisen energian tuottamiseen yleistyvät miltein kaikkiin moderneihin aurinkokennoteknologioihin.

Asiasanat: yksikiteinen pii, puolijohteet, aurinkokenno

Sisällys

Johdanto	1
1 Aurinkokennon perustoiminta	1
1.1 Puolijohteiden ominaisuuksia	2
1.1.1 Puolijohteiden elektronien virittyminen	4
1.1.2 Sähköisen energian synty aurinkokennossa	5
1.2 Yksikiteisen piin ominaisuuksia	7
1.2.1 Elektronitilatiheys	8
1.2.2 Varauksenkuljettajien liike	11
1.3 Pn-liitos	12
1.4 Valosähköinen ilmiö	16
2 Pintojen merkitys kennon toiminnan kannalta	18
2.1 Valon heijastuksen pienentäminen	19
2.2 Sähköiset häviöt pinnoissa	20
2.3 Kehityskohteita	22
3 Yhteenveto	24

Johdanto

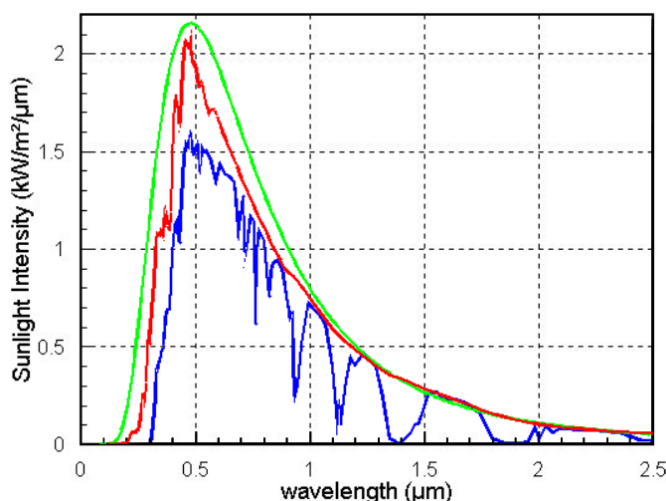
Aurinkokennot absorboivat auringonvalon energiaa ja tuottavat meille uusiutuvaa sähköä. Aurinkokennoteknologiaa on kehitetty 50-luvulta saakka [1] ja aurinkovoima on yksi hiilineutraalin maapallon kulmakivistä. Nykyään aurinkokennojen kuluttajahyötysuhteet ovat jo 23 %:n luokkaa ja tutkijat kehittelevät yli 40 %:n hyötysuhteiden laboratoriokennoja. Aurinkokennojen fysikaalinen teoria kertoo kehitystyölle kuitenkin olevan vielä lupausta. Tässä tutkielmassa tarkastelen piin ja muiden puolijohdeiden sähkökemiallisia ominaisuuksia, esittelen aurinkokennojen perustoiminnalle olennaiset ilmiöt, ja paneudun aurinkokennojen hyötysuhteiden optimointimenetelmiin.

1 Aurinkokennon perustoiminta

Auringonvaloa on helppo absorboida suurimpaan osaan luonnollisista materiaaleista — kenties juuri siksi kaikki elämä maan päällä pohjautuu siitä saatuun energiaan. Elolliset olennot kuitenkin hyödyntävät sitä hyvin erilaisilla mekanismeilla, kuin puolijohdepohjaiset aurinkopaneelit.

Aurinkomme vapauttaa energiaa n. $3,85 \cdot 10^{26}$ W teholla. Auringon emittoimasta säteilyenergiasta suurin osa kuitenkin kulkeutuu toisaalle avaruuteen. Maahan suuntautuva osa vaihtelee lähinnä etäisyyden funktiona, mutta on keskiarvoisesti n. $1\,367 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ [4]. Tästä määrästä vain ≈ 70 % kulkeutuu ilmakehän läpi maan pinnalle saakka [18]. Aurinkokennojen suunnittelussa käytetään yleisimmin merenpinnan tasolle lankeavaa säteily-spektriä. Kuvassa 1 on esitetty kolme intensiteettikäyrää: vihreällä auringon mustan kappaleen säteily, punaisella maan ilmakehän ulkoreunalle osuva säteily (AM0), ja sinisellä maan pinnalle keskieuropaan osuva säteily (AM1.5). Kaaviota silmäillessä voi heti huomata, että paljaalla ihmissilmällä ha-

vaihtava valo kattaa miltein koko alueen, jolla intensiteetti $I \geq 1 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2 \mu\text{m}}$. Aurinkokennotkin optimoidaan useimmiten samalle alueelle, sillä suurin osa auringon meille suomasta energiasta on juuri näillä aallonpituuksilla.



Kuva 1. Auringon säteily-spektri mustan kappaleen säteilyinä (vihreä), ilmakehän laidalla (AM0, punainen), ja merenpinnan tasolla (AM1.5, sininen). Kuva: [18]

Aurinkopaneeleita havaitaan useiden rakennusten katoilla. Aurinkopaneelit ovat mitoiltaan metrien suuruusluokkaa, ja ne koostuvat useista desimetrien suuruusluokan aurinkokennoista. Aurinkokenno on osa virtapiiriä, joka absorboi auringonvaloa ja muuttaa sitä sähköiseksi energiaksi. Aurinkokennot valmistetaan absorboimaan fotoneita, jotka virittävät materiaalikidettä siirtäen elektroneja johtavaan energiatiilaan. Sähköisen aurinkokennon tapauksessa absorptiokerros on tehty jostain puolijohteesta, ja puoliläpäisevät kalvot ovat diodeja. Tämä on perusta ja minimivaatimus laitteelle joka muuttaa auringon energiaa sähköpiirin energiaksi, joskaan se ei vielä takaa erityisen mielekäästä hyötysuhdetta.

1.1 Puolijohteiden ominaisuuksia

Aurinkokennoissa käytetään puolijohteita sekä niille ominaisen energia-aukon, että niiden sähköjohtavuuden muokattavuuden takia. Energia-aukko määrittelee ken-

non tuottaman jännitteen suuruuden, ja hidastaa energian spontaania purkautumista. Puolijohdemateriaaleihin voidaan niiden helposti muokkautuvan luonteen ansiosta myös esimerkiksi luoda sisäinen sähkökenttä, joka ohjaa varauksenkuljettajat erilleen toisistaan fotoniabsorption energian hyödyntämiseksi.

Puolijohhteita löytyy useasta jaksollisen järjestelmän ryhmästä. Niitä yhdistävä ominaisuus on sähkönjohtavuus; ne johtavat sähköä paremmin kuin eristeet, mutta huonommin kuin metallit. Siinä missä eristeillä on leveä energia-aukko, johtimilla ei sitä ole välttämättä lainkaan. Puolijohhteet muodostavat oman joukkonsa, joilla on kapea energia-aukko. Energia-aukko on monilla puolijohhteilla jo valmiiksi näkyvän valon fotonienergioiden suuruusluokkaa, mikä edesauttaa puolijohhteiden sovellettavuutta entisestään. Pii kuuluu jaksollisen järjestelmän ryhmään IV ja on yleisimmin käytetty puolijohde [19].

Puolijohhteiden energia-aukkoa ja sähkönjohtavuutta voidaan muokata sekoittamalla niihin pieniä määriä epäpuhtausatomeita. Harkittua ja kontrolloitua epäpuhtauksien lisäämistä materiaaliin kutsutaan puolijohteen *douppaukseksi*. Douppaus voi olla p-, tai n-tyyppistä (viitaten puolijohhteessa vapaasti liikkuvien varauksenkuljettajien varaukseen). N-tyyppinen puolijohde saadaan seostamalla piihin ryhmän V atomeja (kuten arseenia tai fosforia), joilla on piitä enemmän valenssielektroneja, jolloin johtavuusvyölle nousee elektroneita vapaina varauksenkuljettajina. P-tyyppinen puolijohde vuorostaan saadaan seostamalla piihin ryhmän III atomeja (kuten booria), joilla on piitä vähemmän valenssielektroneja, jolloin valenssivyölle jää elektroniaukkoja jotka vuorostaan liikkuvat vapaasti atomilta toiselle. Douppaamalla voidaan mm. hienosäätää puolijohteen resistanssia. Yhdistämällä douppattuja puolijohdekomponentteja voidaan materiaali saada esimerkiksi vastustamaan sähkövirran kulkua yhteen suuntaan, luoden puolijohdediodin. Puolijohhteita käytetään kaikessa elektroniikassa, ja pii on laajasta saatavuudestaan, ja hyvin tutkituista valmistusmenetelmistään johtuen eniten käytetty puolijohde.

1.1.1 Puolijohteiden elektronien virittyminen

Puhdas piikide ei sellaisenaan ole hyvä johtamaan sähköä. Sen kullakin atomilla on 4 valenssielektronia, jotka ne jakavat lähimmäisten atomien kanssa täyttäen valenssivyön. Kukin näistä elektroneista muodostaa kovalenttisen sidoksen yhden viereisen atomin valenssielektronin kanssa niin, että kullakin piillä on nyt 8 elektronia uloimmalla kuorellaan. Tämä tarkoittaa myös sitä, että kukin atomi on kiinnittynyt omalle paikalleen kiteessä ja että pienillä määrillä termistä energiaa se vain oskilloi tasapainopisteensä ympärillä. Koska sähkövirran kulkuun voivat osallistua vain ne elektronit jotka irtoavat kovalenttisistä sidoksistaan, mutta säilyvät kuitenkin Si-kiteessä, pii toimii eristeenä valenssivyön ollessa täysi ja johtavuusvyön ollessa tyhjä [12]. Perustilassa olevat elektronit eivät siis ole vapaita liikkumaan, vaan niiden täytyy ensin saada kylliksi energiaa voidakseen virittyä jollekin johtavuusvyön korkeammalle energialle. Mitä suurempi energia-aukko aineella on, sitä harvempi elektroni yltää johtavuusvyölle asti, ja sitä matalampi johtavuus aineella on. Toisaalta korkeilla lämpötiloilla useampi elektroni voi siirtyä johtavuusvyölle, jolloin sen liikkuvuus kasvaa, ja aineen johtavuus sen mukana [4, s. 79]. Pii on helppo havainnollistava esimerkki, mutta sama periaate sähköjohtavuudesta pätee puolijohteisiin yleisestikin.

Kiteen sisäenergia koostuu aineen hiukkasten välisestä sähköstaattisesta potentiaalienergiasta sekä hiukkasten liike-energiasta. Normaaliolosuhteissa liike-energia sisältää atomien satunnaisen värähtelyn tasapainopisteidensä ympärillä. Atomien kollektiivista oskillointia mallinnetaan kiteen värähtelynä, jonka värähtelykvantti on *fononi*. Fononien dimensio on eV, ja niiden energiat vaihtelevat 0 eV:sta 0,05 eV:iin [6, s. 41]. Fononeita käsitellään usein näennäishiukkasina. Puolijohteet toimivat eristeenä matalissa lämpötiloissa valenssivyön ollessa täysi, mutta tarpeeksi suurissa lämpötiloissa, monen fononin törmätessä elektroniin samanaikaisesti, elektronit voivat virittyä valenssivyöltä johtavuusvyölle.

Toinen tapa jolla kiteen valenssielektroni voi nousta johtavuusvyölle on fotoniabsorption kautta. Fotoniabsorptiossa kide saa fotonin aallonpituuteen verrannollisen energian $E_f = hf$. Jos kiteessä oleva energia on suurempi kuin energia-aukon leveys ε_G , kide voi virittää elektronin siirtäen sen johtavuusvyölle. Fotoniviritys on tavanomaisissa olosuhteissa aurinkokennoille paljon foniniviritystä todennäköisempi prosessi, koska aurinkokennojen puolijohteissa energia-aukon leveys on suuri verrattuna kiteen fononienergioihin.

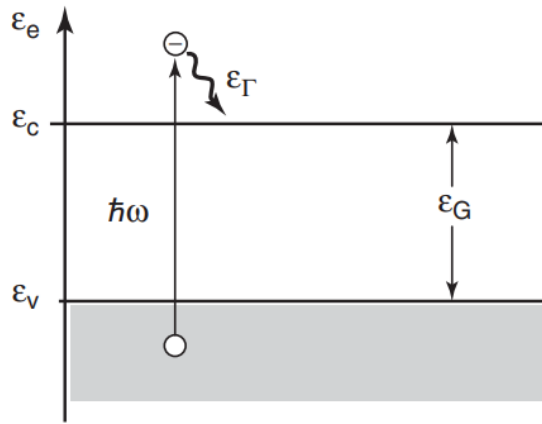
1.1.2 Sähköisen energian synty aurinkokennossa

Energiaa voidaan ajatella siirtyneen aurinkokennoon heti kun pii on virittynyt törmäyksessä fotonin kanssa. Energia-aukon leveys on olennainen parametri, sillä se määrittää mitkä fotonit voivat virittää kideä, ja samalla miten paljon hukkaenergiaa suurienergisimmistä virityksistä jää. Lyhytaallonpituiset fotonit ovat suurienergisiä, ja absorboituvat herkästi kiteen saavutettuaan. Suurin osa fotoneista absorboituu piikennossa vasta syvällä kiteessä, noin $1 - 100 \mu\text{m}$ syvyydessä. Erityisesti matalaenergiset NIR (eli *Near Infrared Spectrum*) -fotonit kulkevat helposti ylimmän pintakerroksen läpi, vuorovaikuttaen vasta verrattain syvällä [2, s. 165]. Luvussa 2 palataan matalaenergisien valon hyödyntämiseen tarkemmin.

Vaikka piikide olisi virittynyt, ei sen energiaa ole helppo hyödyntää sellaisenaan. Viritysendergia pitää käytännössä muuttaa sähköiseksi energiaksi erottamalla virittyneet elektronit ja -aukot toisistaan, ja ohjaamalla ne sähköiseen piiriin. Virittyneet elektronit ja niiden jättämät elektroniaukot kuitenkin *relaksoituvat* eli purkavat viritystilansa matalamman energiatason saavuttaessaan. Relaksaatio voi virityksen tavoin tapahtua muutamalla eri tavalla.

Jos miehitettyjä energiatiloja on tiheästi, kide voi purkaa viritystilansa generoimalla nopeasti fononeita. Fononeita ei tyypillisesti synny suoraan fotonien vuoro-

vaikutuksesta, vaan ne syntyvät erilaisissa relaksoitumisprosesseissa. Yksittäisen fononin energiamäärä riippuu saatavilla olevista energiatiloista, atomien välisistä voimista, sekä atomien välisistä etäisyyksistä, eli hilan kidevakioista. Piin viritystilan purkautumista on havainnollistettu kuvassa 2, jossa fotonivirityksen tuomasta energiasta $\hbar\omega$ johtavuusvyön alarajan ylittävä energia ε_{Γ} purkautuu kiteeseen fononeina. Fotonivirityksen systeemiin tuoman energian täysi purkautuminen voi vaatia usean fononin syntymistä, sillä auringonvalosta absorboitujen fotonien energiat ovat usein fononienergioita suurempia [6, s. 41].



Kuva 2. Fotoniviritys energia-aukon yli. Kuva: [6, s. 42]

Kuitenkaan virittyneen elektronin energiatason saavuttaessa johtavuusvyön alalaidan, elektronia ei voi kuljettaa energia-aukon ε_G yli yksittäisellä fononilla, sillä aukon leveys on liian suuri, eikä virheettömässä kiteessä sen keskellä ei ole sallittuja energiatiloja. Jotta viritys voisi purkautua valenssivyölle saakka, täytyy siis tapahtua joko suuren fononimäärän samanaikainen synty tai fotoniemissio. Kummatkin näistä ovat kuitenkin piille hyvin epätodennäköisiä verrattuna yksittäisen fononin syntyyn. [6, s. 42].

Elektronin ja aukon yhdistymistä kutsutaan *rekombinaatioksi*, ja aikaa jonka elektroni ja elektroniaukko viettävät vapaina varauksenkuljettajina kutsutaan *rekombinaatioajaksi*. Rekombinaation tapahduttua elektroni-aukkopari eli *eksitoni* on ka-

donnut, eikä vapaata negatiivista tai positiivista varauksenkuljettajaa enää ole; elektroni on jälleen sitoutunut paikoilleen kiteessä oleviin piiatomeihin. Aurinkokennoissa rekombinaatioaika pyritään maksimoimaan, jotta mahdollisimman moni varauksenkuljettaja ehtisi kulkemaan piirin läpi ja sähköiseksi muutettu energia voitaisiin hyödyntää.

Rekombinaatiota havaitaan muutamassa eri muodossa. Säteilyrekombinaatiossa elektroni ja aukko emittoivat fotonin annihiloituessaan. Ilmiö on merkittävä suora-absorboiville puolijohteille, muttei epäsuora-absorboiville puolijohteille kuten piille. Auger'n rekombinaatiossa eksitoni siirtää energiansa toiselle hiukkaselle kiteessä, kohottaen tämän energiaa vastaavalla määrällä. *SRH-rekombinaatio*, eli Shockley-Read-Hall-rekombinaatio koostuu useasta relaksaatioaskeleesta energia-aukon läpi, ja on piiaurinkokennoille kaikkein merkittävin rekombinaation alatyyppejä. SRH-rekombinaatiota havaitaan silloin kun energia-aukon tilajakaumassa on kidevirheistä johtuvia välitiloja mahdollistamassa pienempiä energiatilatransitioita. Loukkutiloja syntyy kiteessä olevista epäpuhtausatomeista, kidevirheistä erilaisilla rajapinnoilla, sekä irrallisista atomisidoksista.

1.2 Yksikiteisen piin ominaisuuksia

Pii voidaan jaotella sen rakenteen mukaan yksikiteiseen (mono-Si), monikiteiseen (poly-Si) ja amorfiseen piihin (a-Si). Kiteisen piin (c-Si) markkinaosuus on vuonna 2023 ollut arvion mukaan 97 % [10], mutta amorfisen pii nauttii suosiota erityissovelluksissa sen suuren absorptio-omaisuutensa myötä. Amorfiselle piille jopa 10 – 1000 nm paksuus riittää absorboimaan merkittävän osan auringon säteilyenergiasta, mikä tekee siitä hyvin raaka-ainetehokkaan verrattuna kiteiseen piihin. Siinä ei kuitenkaan ole säännöllistä kiderakennetta, mikä vuoksi varauksenkuljettajien liikkuvuus on kehnoa ja eksitonien eliniät ovat lyhyitä. Monikiteistä piitä valmistetaan valamalla ultrapuh-

dasta piitä halutun mallisiin harkkoihin. Verrattuna yksikiteiseen piihin, monikiteisen piin valmistus on yksinkertaisempaa ja vähemmän energiaa vaativaa. Poly-Si:n tehokkuus kuitenkin kärsii kiderajoille muodostuvista epäjatkuvuuksista, jotka toimivat SRH-rekombinaatiokeskuksina.

Yksikiteistä piitä kasvatetaan Czochralski-menetelmällä, jossa sulaa ultrapuhdasta piitä kasvatetaan lähtökiteen ympärille yksittäiseksi virheettömäksi kiteeksi. Prosessi on hyvin hidas ja hintava, minkä takia monikiteistä piitä suosittiin pitkään kaupallisten aurinkokennojen johtavana puolijohdemateriaalina. Lisäksi pyöreäksi kasvaneesta kiteestä sahatut kennot pitää leikata neliskulmaisiksi, jotta niiden täyttöaste aurinkopaneeleissa saadaan riittävän suureksi. Yksikiteisestä piistä tehdyt kennot ovat kuitenkin tehokkaampia pinta-alaa kohden ja niillä on pitkä käyttöikä [8, s. 13]. Nykyään markkinat suosivatkin mono-Si-kennoja [17],[10].

Yksikiteisen piin hilarakenne perustuu kuutiolliseen yksikkökoppiin. Kideorientaatio vaikuttaa pinnan hilasymmetriaan, ja sen kautta pinnan sähkökemiallisiin sekä mekaanisiin ominaisuuksiin. Aurinkokennojen valmistusta varten yksikiteinen pii leikataan yleensä $\langle 100 \rangle$ -suunnan mukaisesti, jotta niiden pinta olisi helppo teksturoida [20]. Kennon pinta muodostuu siis hilatasosta $\{100\}$. Pintateksturointiin palataan tarkemmin luvussa 2.1.

1.2.1 Elektronitilatiheys

Elektronitilatiheys määrittelee kiteen mahdolliset elektronimiehitykset. Tilojen miehitys määrittää saavutettavat elektronitilat, ja sen kautta puolijohteen ominaisuudet. Kuitenkin Paulin kieltoäännön mukaisesti yhdessä kvanttitilassa voi olla vain yksi elektroni, ja tilojen miehityksen täytyy käyttää pienin mahdollinen vapaaenergia $F = E - TS$. Tällaisen tilajakauman määrittelee Fermijakauma:

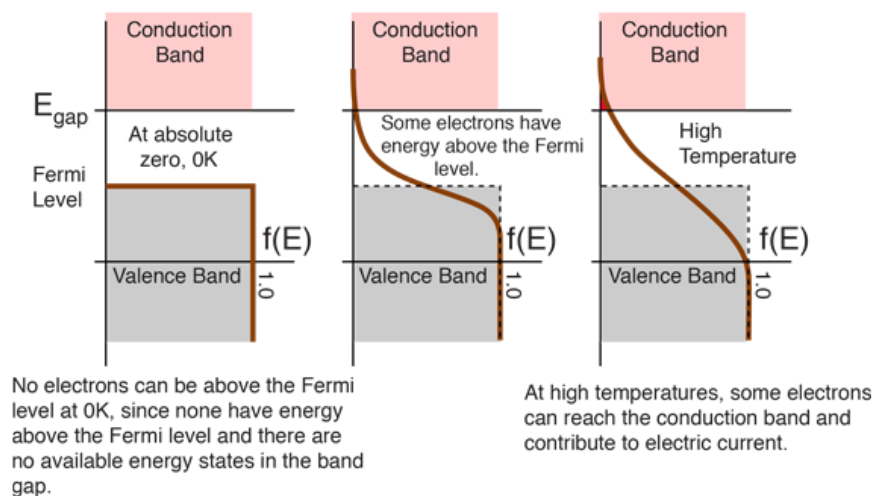
$$f_e(\varepsilon_e) = \frac{1}{e^{(\varepsilon_e - \varepsilon_F)/kT} + 1}, \quad (1)$$

jossa ε_F on kiteelle karakteristinen *Fermienergia*. Fermienergia tunnetaan myös nimellä Fermitaso, sillä se määrittää energiatason $\varepsilon_e = \varepsilon_F$, joka on täsmälleen Fermijakauman puolivälissä [6, s. 43].

Yksittäisten, irrallisten atomien energiatilat ovat diskreettejä. Kun joukko pii-atomeita muodostaa kiteen, niiden vuorovaikutus toistensa kanssa hajottaa uloimpien valenssitulojen energiat identtisistä arvoista vierekkäisiin arvoihin. Näin kiteeseen muodostuu diskreettien energiatasojen sijaan jatkuvia *energiavöitä*, joiden välille jää alueita vailla elektronitiloja, joita kutsutaan *energia-aukoiksi*. Vöiden leveys kasvaa atomien vuorovaikutuksen vahvuuden funktiona, joka on voimakkain uloimman kuoren valenssielektroneille. Tietyn energian yläpuolella energiavyöt ovat niin leveitä, ettei niiden väliin jää enää energia-aukkoja. Jos kiteellä on osittain täytetty energiavyö, sitä kutsutaan *johtavuusvyöksi*. Ylintä täytettyä energiavyötä taas kutsutaan *valenssivyöksi*. Puolijohteen energia-aukosta puhuttaessa tarkoitetaan näiden vöiden väliin Fermitasolle jäävää energia-aukkoa, sillä sen leveys pitkälti määrittää puolijohdemateriaalin sähkönjohtavuuden.

Jotta elektronit voisivat liikkua ulkoisen sähkökentän aiheuttaman voiman johdosta, täytyy niillä olla uusia elektronitiloja joille siirtyä. Tämän vuoksi nettovirtaa ei havaita piissä, jossa elektronien minimienergian täyttyessä valenssivyö on täysi ja johtavuusvyö tyhjä. Kaikilla puolijohdemateriaaleilla on 0 K lämpötiloissa hyvin samanlainen elektronitilamiehitys kuin eristeillä, mutta normaaliolosuhteita lähes työssä Fermijakauma levenee ja ylettyy energia-aukon yli johtavuusvyön lähelle [5, s. 67]. Tällöin todennäköisyys johtavuusvyön elektronitilojen miehittymiselle kasvaa. Kuvassa 3 on havainnollistettu Fermijakauman käyttäytymistä lämpötilan eri arvoilla, ja sen vaikutusta puolijohteen sähkönjohtavuuteen.

Kun kenno on valaistu, tai jos sitä on doupattu, sen tilajakaumaa ei voi enää kuvailla vain sen intrinsisellä Fermijakaumalla, vaan sillä on sen sijaan kaksi erillistä, mutta lähekkäistä *kvasi-Fermienergiaa*: ε_{FV} valenssivyön tilajakaumalle f_V , ja ε_{FC}



Kuva 3. Fermi-jakauman muoto eri lämpötilan arvoilla. Kuva: [14]

johtavuusvyön tilajakaumalle f_C . Energioiden ε_{FV} ja ε_{FC} välille energia-aukkoon jää tilajakauma, jota kumpikaan näistä ei suoraan määrittele. Energia-aukon tilajakauma määrittyy molempien kvasi-Fermitasojen jakaumien, ja epäpuhtauksien tuomien loukkutilojen mukaisesti.

Tilatiheys määrittää myös transiitot energia-aukon yli. Puolijohdeiden energia-aukot kategorisoidaan suoriksi tai epäsuoriksi pienimmän energiaintransition mukaan. Jos pienimmän energian transiitio energia-aukon yli johtaa elektronin ja aukon liikemäärän muutokseen, puolijohdeiden energia-aukkoa kutsutaan *epäsuoraksi*, ja puolijohdetta *epäsuorasti absorboivaksi*. Muutoin puolijohde on *suora-absorboiva*. Tarkemmin ilmaistuna transiitio voidaan määritellä johtavuusvyön minimiä $\varepsilon_{C,min}$ ja valenssiyön maksimia $\varepsilon_{V,max}$ vastaavien aaltolukujen \vec{k}_C , \vec{k}_V avulla. Esimerkiksi GaAs-kiteessä nämä saavat saman arvon $\vec{k}_e = \vec{k}_h$, jolloin GaAs luokitellaan suora-absorboivaksi puolijohdeeksi, jossa fotoniemission todennäköisyys on suuri kuten luvussa 1.1.2 todettiin. Si-kide puolestaan luokitellaan epäsuorasti absorboivaksi puolijohdeeksi. Koska Si-kiteen energia-aukko on epäsuora, virittyneen elektronin pienienergiaisin relaksaatio ei voi tapahtua vain fotonigeneraation kautta, vaan se tyypillisesti vaatii loukkutilan toteutumiseen [5, s. 69]. Korkeammilla fotonienenergioilla

suora absorptio on mahdollinen epäsuorasta energia-aukosta huolimattakin. Tällöin rekombinaatio fotoniemission kautta on myös mahdollinen.

1.2.2 Varauksenkuljettajien liike

Kiteessä havaittavia ilmiöitä ohjaavat erinäiset intensiiviset ja ekstensiiviset suureet. Ekstensiiviset suureet, kuten entropia, tilavuus, atomikonsentraatiot ja varaus ovat aurinkokennon energiankuljettajia. Säilyvyyslait pätevät näistä kaikille, joskin entropia seuraa termodynamiikan toista pääsääntöä. Intensiiviset suureet, kuten lämpötila, paine, kemiallinen potentiaali ja jännite määrittelevät energian määrän, jota ekstensiiviset suureet kuljettavat mukanaan. Intensiivisten suureiden gradientit siis ajavat energiavirtoja kiteessä. Täten yhden intensiivisen suureen gradientin pudotessa nolnaan, myös kyseisen suureen liikuttaman energian on oltava nolla [6, s. 59]. Piiaurinkokennoissa hyödynnettävä energiaa kuljettava suure on varaus, joka kulkee vapaiden varauksenkuljettajien mukana.

Kaksi pääasiallista suuretta, jotka ajavat varauksenkuljettajia puolijohdekennoissa ovat kemiallinen potentiaali ja jännite, eli sähköinen potentiaali. Kiteen päiden välinen potentiaaliero luo kiteeseen sähkökentän $\vec{E} = -\nabla\varphi$, joka kohdistaa sähköstaattisen voiman varauksenkuljettajiin. Sähkökentän suuruus on likimain vakio silloin, kun varauksenkuljettajien liikkuvuus on suuri. Kemiallisen potentiaalin μ absoluuttinen arvo riippuu useasta tekijästä, mutta sen gradientti puolijohdekennoissa vaihtelee vain varauksenkuljettajien konsentraation funktiona. Hiukkaset pyrkivät minimoimaan kemiallisen potentiaalinsa *diffusoitumalla* matalan konsentraation suuntaan. Näiden kahden muodostama kokonaisvoima on *sähkökemiallisen potentiaal*in gradientti $\nabla\eta$, ja se aiheuttaa virran silloin kun varauksenkuljettajien konsentraatio, kemiallinen ympäristö, tai sähköinen potentiaaliero on epähomogeeninen [6, s. 109].

Varauksenkuljettajien keskimääräinen liike, eli sähkövirta voidaan ilmaista niihin kohdistuvien nettovoimien, sekä niiden liikkuvuuksien tulona. Puolijohdeaurinkokennojen eri osat on tarkoituksella doupattu niin, että elektroneilla ja aukoilla on erisuuret liikkuvuudet, joten molempien liikettä tulee käsitellä erillisinä kokonaiskuvan saavuttamiseksi. Virrantiheys voidaan lausua muodossa

$$j_Q = -ej_e + ej_h = \frac{\sigma_e}{e} \nabla \eta_e - \frac{\sigma_h}{e} \nabla \eta_h, \quad (2)$$

missä σ on varauksenkuljettajan liikkuvuus, ja e alkeisvaraus. Yhtälöön voidaan myös sijoittaa sähkökemiallisen potentiaalin sijasta johtavuus- ja valenssivöiden kvasi-Fermienergiat $\varepsilon_{FC} = \eta_e$ ja $\varepsilon_{FV} = -\eta_h$.

Vapaat varauksenkuljettajat ovat syntynsä jälkeen hyvin lähellä toisiaan, jolloin elektronin ja aukon on helppo rekombinoitua. Varauksenkuljettajat voidaan ajaa kauemmas toisistaan kiteen Fermienergioiden gradientteja manipuloimalla, mutta *rekombinaatioaika* eli varauksenkuljettajien elinaika muodostuu seuraavaksi rajoittavaksi tekijäksi. Varauksenkuljettajien liikettä voidaan jouduttaa muokkaamalla komponenttien johtavuuksia douppaamalla niitä.

1.3 Pn-liitos

N-tyyppisissä puolijohdeissa elektronit ovat enemmistövarauksenkuljettajia, ja liikkuvuus on suurta. P-tyyppisissä puolijohdeissa sama pätee elektroniaukoille. Vähemmistövarauksenkuljettajien liikkuvuus pienenee douppaustason kasvaessa. Mikäli haluamme siirtää kidevirityksestä saadun energian sähköpiiriin, meidän täytyy saada varauksenkuljettajat liikkumaan eri suuntiin kiteessä. Tämä tapahtuu kvasi-Fermienergioiden gradienttien suuntaan, mutta vaatii luonnollisesti potentiaaliviön, joka vastaa gradientin muutosta matkan yli. Piikenoissa kvasi-Fermienergioiden gradienttien suunnitteluun käytetään kahta vastakkaisesti doupattua komponenttia. Tätä kokonaisuutta kutsutaan *pn-liitokseksi*. Pn-liitosta kutsutaan *homoliitokseksi*

jos molempien komponenttien energia-aukot ovat yhtä leveitä, ja *heteroliitokseksi* jos ne ovat erisuuria.

Kun doupatut puolijohteet asetetaan kiinni toisiinsa, kummankin enemmistövarauksenkuljettajat alkavat diffusoitumaan liitosrajapinnan ylitse toiselle puolelle. Vaikka enemmistövarauksenkuljettajat ovat vapaita liikkumaan rajapinnan ylitse, niitä vastaavat douppausatomit eivät voi liikkua kiteessä. Diffuusion myötä p-puolijohteeseen jää siis negatiivisia ioneita, ja n-puolijohteeseen positiivisia ioneita. Nämä ionit luovat rajapinnan ylitse sähkökentän, jota kutsutaan *tyhjennysalueeksi*. Tämä sähkökenttä vastustaa enemmistövarauksenkuljettajien liikettä tyhjennysalueen halki. Toisaalta diffuusiovoima työntää enemmistövarauksenkuljettajia tyhjennysalueen halki. Voimien summa johtaa tilanteeseen, jossa enemmistövarauksenkuljettajia diffusoituu niiden suurten konsentraatioiden vuoksi pn-rajapinnan yli vaikka sähkökenttä vastustaakin niiden liikettä, ja rajapinnan lähellä olevat vähemmistövarauksenkuljettajat kulkeutuvat vaellusvirran mukana toiselle puolelle.

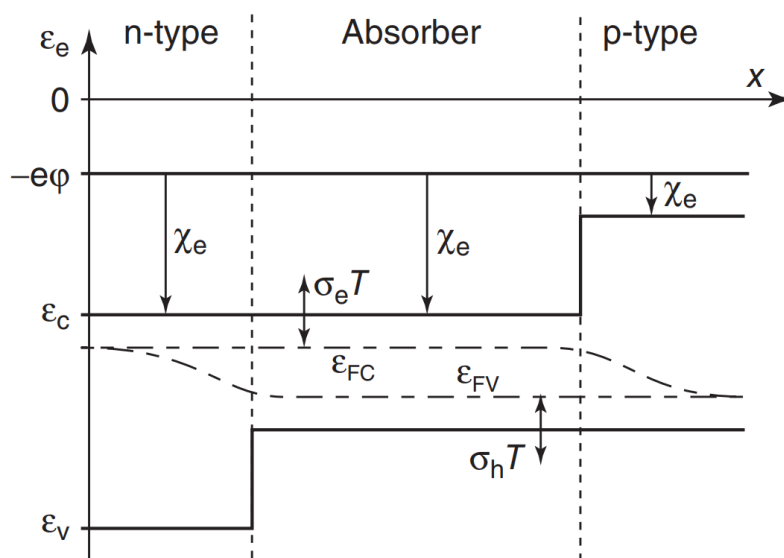
Kun pn-liitoksen muodostumisesta on hetki, ja vakaa tila on saavutettu, diffuusiovirta ja vaellusvirta ovat tasapainossa tyhjennysalueella sekä elektroneille että aukkoille, jolloin nettovirta tyhjennysalueella on nolla. Vaikka nettovirtaa ei havaita, normaalilämpötilassa osa varauksenkuljettajista voi kuitenkin saada kylliksi energiaa ylittääkseen tyhjennysalueen. Rajapinnan ylittävät enemmistövarauksenkuljettajat muuttuvat toisella puolella vähemmistövarauksenkuljettajiksi, jotka rekombinoituvat keskimäärin *diffuusio pituuden* päässä rajapinnasta. Rajapinnan ylittävät vähemmistövarauksenkuljettajat muuttuvat enemmistövarauksenkuljettajiksi. [15]

Pn-liitoksen tasapainoa voi horjuttaa *etujännite*, joka on sen päiden välille asetettu ulkoinen potentiaaliero. Etumerkistään riippuen etujännite joko kasvattaa tai pienentää tyhjennysalueen sisäistä jännitettä. Koska tyhjennysalueella on liitoksen suurin resistiivisyys, lähes koko etujännitettä vastaava jännitehäviö tapahtuu sen ylitse. Täten etujännite joko kasvattaa tai pienentää tyhjennysalueen jännite-eroa.

Tilanteessa, jossa pn-liitoksessa on etujännite, sen suuruus päättää määrääkö virran suuntaa diffuusiovirta, vai vaellusvirta. Myötäsuntainen etujännite (forward bias) luodaan heikentämällä tyhjennysalueen sähkökenttää, jolloin enemmistövarauksenkuljettajat liikkuvat diffuusiovirran mukana kohti tyhjennysaluetta, jonka toisella puolella ne muuttuvat vähemmistövarauksenkuljettajiksi. Vähemmistövarauksenkuljettajat rekombinoituvat keskimäärin diffuusiopituuden päässä rajapinnasta, kaventaen samalla tyhjennysaluetta ja pienentäen sen resistanssia. Myötäsuntainen etujännite luo tyypillisesti vahvasti jännitteen funktiona kasvavan virran, jonka kynnyksenä on pn-liitoksen sisäinen jännite. Tämän jännitteen arvoa suuremmilla etujännitteillä virta kasvaa eksponentiaalisesti. Vastakkaissuntainen etujännite (reverse bias) luodaan vahvistamalla tyhjennysalueen sähkökenttää, jolloin vähemmistövarauksenkuljettajat kulkeutuvat tyhjennysalueen ylitse, ja enemmistövarauksenkuljettajat liikkuvat kauemmas siitä. Tyhjennysalue levenee, ja virta koostuu vähemmistövarauksenkuljettajista, jotka ylittävät ylittämään tyhjennysalueen. Tällöin virran täytyy koostua sellaisista vähemmistövarauksenkuljettajista, jotka ovat generoituneet enintään diffuusiopituuden päässä pn-liitoksen rajapinnasta. Vastakkaissuntainen etujännite tuottaa *vastakkaissuntaisen saturaatiovirran*, jonka aiheuttaa diffuusio. Saturaatiovirta erii nopeasti nolasta mutta jää likimain riippumattomaksi etujännitteen suuruudesta. Etujännitettä varioimalla pn-liitosta voidaan käyttää myös transistorina, joka päästää läpi virtaa suhteessa etujännitteen merkkiin ja suuruuteen.

Aurinkokenno pimeässä ei tuota nettovirtaa, mutta koska valaistussa aurinkokennossa enemmistövarauksenkuljettajia syntyy jatkuvasti, rekombinaatio kasvaa, mikä kasvattaa diffuusiota ja sen myötä virtaa tyhjennysalueen läpi [11]. Tyypillisessä aurinkokennossa on kolme kerrosta siten, että pn-liitos on hyvin lähellä pintaa. Noin $1 \mu\text{m}$ paksuisen vahvasti n-dopatun ($n_D \approx 3 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$) pintakerroksen tärkein tehtävä on pienentää elektroniaukkojen liikkuvuutta, jotta pintarekombi-

naatio olisi minimissään. Käytännössä kaikki absorptio tapahtuu sen alla olevassa $\approx 300 \mu\text{m}$ paksuisessa kevyemmin p-doupatussa ($n_A \approx 1,5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$) kerroksessa. Koska tämän p-doupatun absorptiokerroksen kvasi-Fermienergia on suurempi, sen täytyy olla paljon paksumpi, jotta mahdollisimman suuri osa valosta absorboituisi. P-puolijohteessa vähemmistövarauksenkuljettajat ovat elektroneita, joiden diffuusio on aukkoja nopeampaa, mikä kasvattaa diffuusiopituutta ja vähentää rekombinaatiotodennäköisyyttä [9]. Yksikiteisen piin diffuusiopituus on $L_e \approx [100 - 300] \mu\text{m}$ [13], ja se pienenee douppauskonsentraation funktiona. Absorptiokerroksen douppauskonsentraatio täytyy valita tarpeeksi korkeaksi jotta pn-liitoksen jännite-ero on mahdollisimman suuri ja tyhjennysalue kapenee, mutta tarpeeksi pieneksi jotta vähemmistövarauksenkuljettajien eliniät ovat pitkiä.



Kuva 4. Pn-liitoksen energiakaavio. Kuva: [6, s. 129]

Kuvassa 4 on havainnollistettu pn-heteroliitoksen toimintaa varauksenkuljettajia valikoivana rakenteena. Vahvasti doupatujen päätyjen energia-aukot ja energiatasot on valittu niin, että johtavuus- ja valenssivöiden laidat ovat vakiot varauksenkuljijoille haluttuun suuntaan, ja kasvavat voimakkaasti vastakkaiseen suuntaan. Täten kummallekin varauksenkuljettajalle liikkuvuus yhden rajapinnan yli on suuri ja toi-

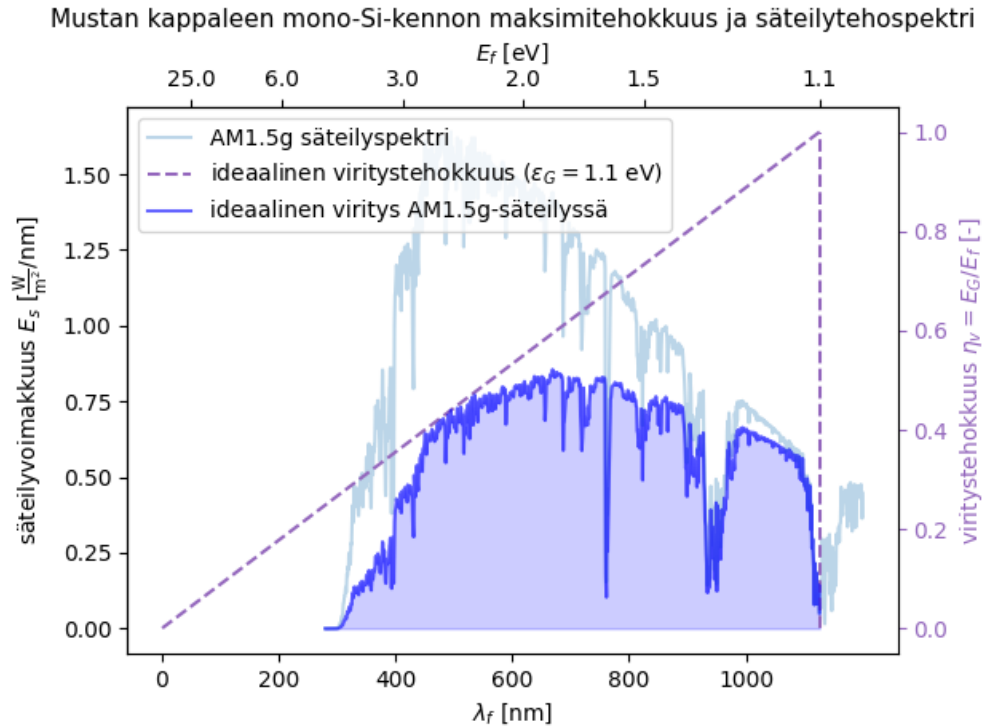
sen yli pieni. Elektronien liikettä ajaa hyvin pieni gradientti $\nabla - \varepsilon_{FC}$, ja aukkojen liikettä $\nabla \varepsilon_{FV}$. Vaikka kvasi-Fermienergiat ajaisivatkin varauksenkuljettajia väärään suuntaan, ne eivät pääse rajapinnan ylitse. Tuloksena on liki-ideaali pn-liitos, jossa varauksenkuljettajat säilyttävät likimain kaiken energiansa siirtyessään kohti pinta-kontakteja.

1.4 Valosähköinen ilmiö

Valosähköisessä ilmiössä fotonin siirtää energiansa Si-kiteelle, jolloin kiteen sisäenergia nousee piin elektronitilojen miehityksen muuttuessa korkeaenergisemmäksi. Ilmiö havaitaan vain silloin, kun fotonin energia on vähintään yhtäsuuri kuin kiteen kahden energiatilan välinen ero

$$E_f = hf = \frac{hc}{\lambda} \geq \varepsilon_e \quad (3)$$

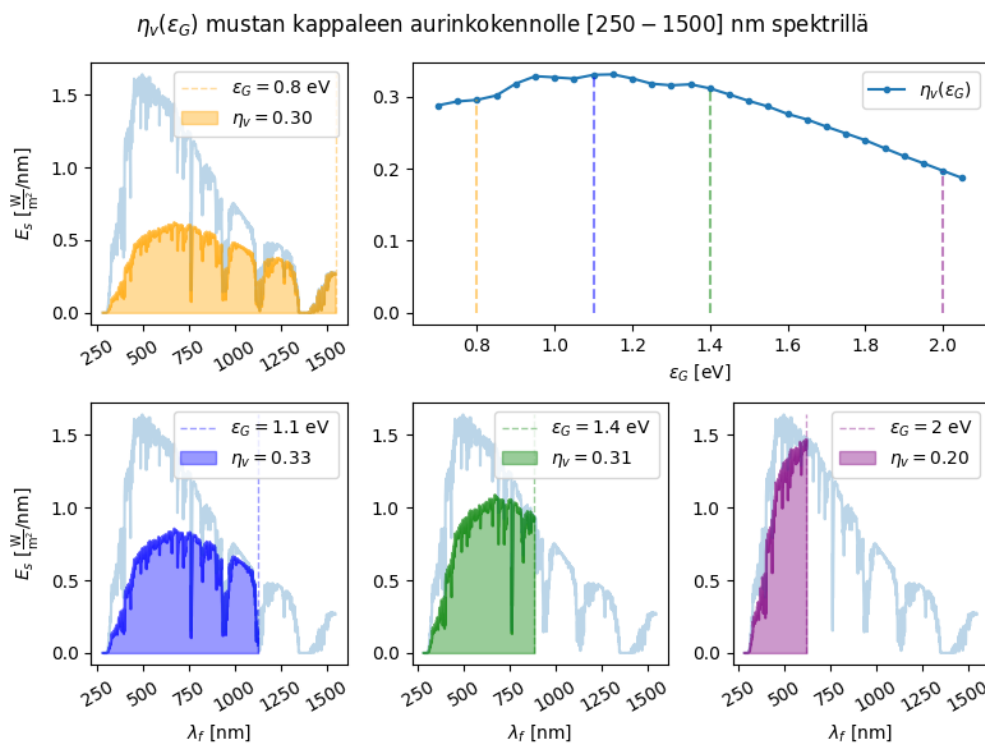
Kuten luvussa 1.2.1 todettiin, puolijohteen miehitys minimoi aina vapaaenergian F , ja kuten luvusta 1 tiedämme, että suurin osa auringon säteilyn intensiteetistä maan pinnalla koostuu näkyvän valon spektristä. Ultraviolettispektri absorboituu melkein täysin ilmakehään, ja mikroaaltospektrin säteilyteho on pientä verrattuna näkyvään valoon ja IR-valoon. Koska kiteisen piin energia-aukko on $\varepsilon_G \approx 1.1$ eV, se hyödyntää koko näkyvän valon spektrin ja infrapunaspektrin. Energia-aukko määrittelee kuitenkin myös kennon virityksestä saatavan maksimienergian, koska kennon tuottama jännite on suoraan verrannollinen energia-aukon suuruuteen. Energia-aukko tulisi ideaalisti valita siis sekä korkeaksi, jotta virityksestä saatava energia olisi suuri, että pieneksi, jotta virityksiä tapahtuisi mahdollisimman paljon. Kuvassa 5 on esitetty aiemmin mainitun AM1.5-säteilyspektrin säteilyvoimakkuus, sekä energia-aukosta riippuva ideaalinen viritystehokkuussuora, joka on teoreettinen yläraja kennon hyötysuhteelle aallonpituutta kohden. Virityshyötysuhde η_v eritellään kokonaishyötysuhteesta $\eta_{kok} < \eta_v$, koska sähköisiä häviöitä kiteessä tai virtapiirissä



Kuva 5. Kiteisestä piistä tehdyn aurinkokennon mustan kappaleen absorptio AM1.5g-säteilyspektriltä[3]. AM1.5-spektri on realistinen arvio 48.2° zenittikulmassa ilmakehän läpi kulkeneesta valosta. AM1.5g sisältää suoran säteilyn lisäksi ilmakehässä diffusoitunutta ja sironnutta valoa.

ei ole huomioitu. Kolmantena käyränä kuvaan on piirretty näiden tulo, joka muodostaa ylärajan piikidekennon viritystehokkuudelle AM1.5-säteilyspektrillä. Tämän käyrän alle jäävä pinta-ala vastaa mustan kappaleen absorboimaa tehoa.

Energia-aukon valinnan vaikutusta on havainnollistettu kuvassa 6, johon on merkitty kennon tuottaman tehon osuus AM1.5-spektristä, eli sen hyötysuhde. Energia-aukon suuruus on suoraan verrannollinen tehokkuuteen aallonpituuden funktiona, mutta rajaa matalaenergisää aallonpituuksia pois. Suurinta hyötysuhdetta vastaavan energia-aukon määrittelee lopulta säteilytehospektri. Oikean ylälaidan hyötysuhdekuvaajasta nähdään, että kiteisen piin 1.1 eV energia-aukko on likimain täydellinen aurinkokennoja ajatellen.



Kuva 6. Mustan kappaleen aurinkokennojen virityshyötysuhteita energia-aukon leveyden funktiona. Hyötysuhteen kuvaaja on kennon absoluuttisen tehon ja AM1.5g-säteily-spektrin osamäärä, joka tunnetaan yleisesti Shockley-Queisser-rajana. AM1.5g-spektrin rajaus vaikuttaa kokonaissäteilytehon arvoon ja siten myös hyötysuhteen absoluuttisiin arvoihin.

2 Pintojen merkitys kennon toiminnan kannalta

Kennon aurinkoa kohti suunnattu pinta on omiaan absorboimaan fotoneita ja luomaan siten vapaita varauksenkuljettajia johtavuus- ja valenssivöille. Tyypillisesti *absorptiopintaan* on kiinnitetty toiselle puolelle n-tyypin puolijohde ja toiselle p-tyypin puolijohde. Elektronit pyritään ohjaamaan n-tyypin puolijohteeseen ja aukot p-tyypin puolijohteeseen. Aurinkokennojen pintoja suunniteltaessa näiden eri kerrosten paksuus on hyvin olennaista, sillä eksitonien generaatioaste on suurin aivan kennon valaistulla pinnalla, ja se putoaa eksponentiaalisesti etäisyyden funktiona syvemmällä kiteessä [2, s. 144].

Lisäksi pinnoilla tapahtuu sähköisiä häviöitä varauksenkuljettajien rekombinoi-

tuessa. Erityisesti käsittelemätön piipinta ja metalliset pintakontaktit ovat korkean rekombinaationopeuden pisteitä [2, s. 143].

2.1 Valon heijastuksen pienentäminen

Kennon pinta absorboi sen osan säteilystä, joka ei heijastu pinnasta, ja joka ei kulje kennon läpi. Transmittanssi eli läpisäteily riippuu kennon paksuudesta, ja kiteen ominaisuuksista. Reflektanssi taas on hyvin riippuvainen pinnan ominaisuuksista, ja sen minimoiminen on olennainen osa aurinkokennojen hyötysuhteen optimointia.

Heijastuksenestopinnoitteet ovat yksinkertainen tapa kehittää kennon tehokkuutta muokkaamalla pintaa bulkin sijasta. Neljännesaallon heijastuksenestopinnoite pyrkii pienentämään heijastusta interferenssin kautta: kaksi heijastavaa pintaa asetetaan neljännesaallonpituuden päähän toisistaan tarkkaan valitulla taitekertoimella, jotta toisesta heijastuva aalto kohtaa ensimmäisestä heijastuneen aallon $\Delta\phi = \pi$ vaihe-erolla ja interferoi sen kanssa destruktiivisesti. Pinnoitteen taitekerroin pitää tällöin valita niin, että se on substraatin ja sitä ympäröivän aineen geometrinen keskiarvo [2, s. 162]. Optimaalinen pinnoitteen taitekertoimen arvo piikidekennon ja ilman väliin on siis $n_{\text{opt}} \approx \frac{3.8}{2}$. Kennot koteloidaan usein lasiin, tai johonkin lasia vastaavaan materiaaliin, sillä taitekertoimen lisäksi läpinäkyvyys on olennaista hyötysuhteen säilyttämiseksi. Koska pinnoitteen paksuus riippuu aallonpituudesta, voi yksinkertaisen pinnoitteen optimoida vain yhdelle fotonienenergialle. Monikerroksisten pinnoitteiden käyttö mahdollistaa laajemman optimoinnin, mutta on luonnollisesti haastavampaa suunnitella ja toteuttaa.

Pintoja voidaan myös teksturoida reflektanssin minimoimiseksi. Teksturointi tehdään tyypillisesti etsaamalla piitä anisotrooppisesti niin, että kide etsautuu nopeammin eri suuntiin kiteessä. Tällöin eri hilatasot korostuvat pintarakenteessa mikrometriluokan pyramidimaisina rakenteina. Piikennon pinta suunnataan usein (100)-

tason suntaisesti, jolloin pyramidit muodostuvat (111)-tasojen leikkauskohtiin. [2, s. 164]. Pinnalle muodostuvien rakenteiden välinen kulma mahdollistaa fotonille kaksi mahdollisuutta läpäistä pinta. Siinä missä puhdas, pinnoittamaton pii heijastaa noin 33 % näkyvästä valosta, yksinkertainenkin etsaus voi pienentää tämän noin $(33\%)^2 \approx 11\%$:iin [2, s. 165].

Anisotrooppista etsausta voidaan tehdä märkäetsauksena, plasmaetsauksena tai ionietsauksena. Pintateksturointi monimutkaistaa valmistusprosessia, ja sen tuottama pintarakenne vaatii huolellisuutta jälkikäsitteilyn osalta. Pintateksturointi ei ole yhtä aallonpituusriippuvaista, kuin heijastuksenestopinnoitteet, mutta se kasvattaa erityisesti NIR-fotonien (Near Infrared Spectrum) absorptiotodennäköisyyttä, mikä voi johtaa kennojen lämpenemiseen. Kuten luvussa 1.1.1 todettiin, kiteen viritysen energia riippuu energia-aukon valinnasta. Kaikkein matalaenergisiä fotoneita ei siis voida yksinkertaisissa kennoissa hyödyntää lainkaan, jolloin niiden absorptio suurissa määrin vain kohottaa kennon lämpötilaa.

2.2 Sähköiset häviöt pinnoissa

Pintakontakteja tarvitaan keräämään aurinkokennossa virittyneet varauksenkuljettajat, ja johtamaan ne ulkoiseen sähköpiiriin. Etukontakti on tyypillisesti löyhä metallihila, kun taas takakontakti toimii sen vastakontaktina. Tarpeellisuudesta huolimatta pintakontaktit vähentävät kennon tehoa: etukontaktit varjostavat kennon pintaa, pintakontaktien resistanssi pudottaa jännitettä, ja kontaktit vähentävät lateraalista sähkövirtaa kennon ylimmässä diffusoidussa kerroksessa [2, s. 153]. Pintakontaktit vetävät myös niin elektroneja, kuin aukkojakin puoleensa, sillä metalleista löytyy paljon miehittämättömiä tiloja Fermienergian molemmiin puolin. Metallissa elektroni ja aukot termalisoituvat spontaanisti ja toisistaan riippumattomasti kohti Fermienergiaa. Koska pintakontaktit ovat täynnä miehittämättömiä elektronitilo-

ja, ainoa niiden rekombinaatioastetta rajoittava tekijä on vähemmistövarauksenkuljettajien virrantiheys. Rekombinaatiota voi oikeastaan välttää metallikontakteissa ainoastaan rajoittamalla toisen varauksenkuljettajatyypin liikkuvuutta [6, s. 84].

Toinen suuri häviölähde on pintarekombinaatio. Piikiteen pinnassa rekombinaatiota tapahtuu kidereunoille jääneiden atomisidosten, tai sinne muodostuneiden epäpuhtausatomisidosten myötä SRH-rekombinaationa. Nämä kiteen reunoille jääneiden piiatomien eroavat sidokset luovat bulkista eroavia sidosenergioita, jolloin pintaan muodostuu helposti loukkutiloja suurissa konsentraatioissa. Suurilla konsentraatioilla tämä muodostaa liki jatkuvan tilajakauman energia-aukon yli, ja rekombinaationopeus kasvaa.

Pintojen passivointi on tapa sitoa kidereunojen atomisidokset siten ettei reunoille muodostuisi loukkutiloja. Ilmalle altistunut piipinta on altis adsorboimaan H_2O ja O_2 molekyyliä ja reagoimaan niiden kanssa kemiallisesti. Tällöin rekombinaationopeudet ovat suhteellisen korkeita, jopa $v_R \leq 10^6 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$ suuruusluokkaa. [6, s. 83]. Käytännössä pintarekombinaatiota on hyvin vaikea estää; usein helpompaa on estää varauksenkuljettajien kulku pinnalle asti.

Pintoja passivoidaan peittämällä ne eristeillä, jotka estävät varauksenkuljettajia kulkeutumasta kennon pinnalle asti. Passivointitavat voidaan jakaa karkeasti kahden tyyppisiin toimintaperiaatteisiin. Suuren varaustiheyden eristeet rajoittavat toista varauksenkuljettajaa, laskien sen liikkuvuutta pinnan lähellä. Tällöin pintarekombinaatioasteelle muodostuu pullonkaula pienen virran ansiosta, vaikka kidepinnan tilatiheys olisi suurikin. Piin kanssa yhteensopivia yhdisteitä ovat esimerkiksi piinitridi ja alumiinioksidi. Hilarakenteellisesti yhteensopivat eristeet välttävät täyttymättömiä sidoksia, jolloin puolijohde-eriste-rajapinnalle jää matala tilatiheys, jos se tehdään huolellisesti puhdistilaolosuhteissa. Kerros piioksidia SiO_2 on tyypillinen toteutus. Si/ SiO_2 -rajapinnoilla rekombinaationopeudet ovat $v_R \leq 10^1 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$ luokkaa [6, s. 85]. Näin tehokas pintapassivointi on mahdollista vain muutamilla ryhmien

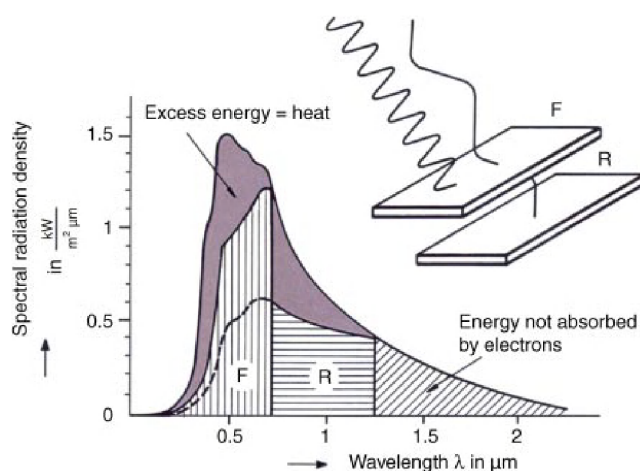
III-V yhdisteillä, joiden hilavakiot ovat samat kuin piillä. Passivoinnin voi kuitenkin toteuttaa myös puolijohteella jolla on kyllin suuri energia-aukko, jotta se ei varjosta absorboivaa kidettä.

2.3 Kehityskohteita

Musta pii, eli b-Si on eräs lupaava pintarakennetyyppi, joka perustuu syvään kolmiulotteiseen nanoskaalan rakenteeseen. ja kasvattaa fotonin kulkeman optisen polun pituutta. Pintaa mustutetaan erilaisilla etsausmenetelmillä, tai lasersäteilytyksellä [16]. Koska mustan piin pinnan rakenneosaset ovat näkyvän valon aallonpituuden mittaluokkaa, ne eivät luo yhtä diskreettiä rajapintaa vaan taitekerroin muuttuu tasaisesti ilman taitekertoimesta piin taitekertoimeen. Mustan piin pintakerroksessa kunkin ohuen kerroksen taitekerroin riippuu siinä olevan ilman ja piin suhteesta, jolloin heijastukset minimoituvat laajalla aallonpituus- ja tulokulma-alueilla [16]. Lisäksi mustan piin pinnasta heijastunut valo siroaa, jolloin optinen polku kasvaa pidemmäksi, ja NIR-fotonien absorptiodennäköisyys kasvaa [16].

Mustaa piitä valmistetaan usein *RIE-menetelmällä* (Reactive Ion Etching), joka nostaa kennon tehokkuutta erityisesti suurilla tulokulmilla pinnan normaalista mitattuna [7], on riippumaton kideorientaatiosta, eikä sisällä metalleja jotka voisivat kontaminoida piikiekon pintaa. Lisäksi prosessi on suhteellisen nopea, ja siitä syntyvän rakenteen morfologiaa voidaan kontrolloida hyvin. Kokeellisesti absorptanssi on kyetty kohottamaan $> 99\%$ niin kryogeenisillä lämpötiloilla, kuin korkeaenergisillä plasma-reaktiivisella ionietsauksella [16, s. 9]. RIE-menetelmä luo satunnaisen kokoisia nanorakenteita materiaalin pinnalle. Satunnainen jakauma pieniä ja suuria nanopiikejä mahdollistaa sekä valon vangitsemisen, sekä matalan reflektanssin. Induktiivisesti kytketty plasmareaktiivinen ionietsaus saavuttaa noin 97 – 99% absorptanssin [7, s. 9].

Kennojen hyötysuhde laskettiin aiemmin yksinkertaiselle aurinkokennolle. *Tandem-kennot* ovat keino tehostaa kennon absorptiotehoa, kasaamalla se kahdesta erilaisesta absorboivasta puolijohdeesta, joilla on keskenään erisuuret energia-aukot. Leveämmän energia-aukon puolijohde asetetaan säteilyn tulosuuntaan. Se absorboi suurien energisten fotonien kiittävällä viritystehokkuudella ja on läpinäkyvä matalaenergisille fotoneille. Taaimmainen kerros viritetään hyödyntämään infrapunasektri. Kuvassa 7 on esitetty kaksikerroksinen tandem-kenno viritystehokkuuksineen.



Kuva 7. Tandem-kenno, joka on muodostettu a-Si ja CIGS-kerroksista. Energia-aukot $\varepsilon_{g,F} \approx 1,75$ eV ja $\varepsilon_{g,R} \approx 1$ eV. Kuva: [4, s. 106]

Taustakontaktit ovat tyypillisesti metallikontaktin peittämiä, joten niiden passivointi on olennainen osa aurinkokennojen tehostamista. Vahvasti dopattu alue lähellä taustakontaktia kasvattaa suljetun piirin virtaa kasvattamalla keräystodennäköisyyttä taustakontaktin lähellä, ja kasvattaa suljetun piirin jännitettä pienentämällä saturaatiovirtaa. [2, s. 150] *PERC* (Passive Emitter and Rear Cell) on taustapinnan passivointimenetelmä, joka perustuu dielektriseen eristävään kerrokseen. PERC-kennoista on tullut markkinastandardi helppovalmisteisuudensa ja edullisuutensa vuoksi. *TOPCon* (Tunnel Oxide Passivated Contact) on n-dopattuun piiabsorptiokerrokseen perustuva passivointiteknologia, jossa ohut oksidikerros poly-Si:n päällä muodostaa TOPCon-rakenteen kennon taustapintaan, tehostaen varauksen-

kuljettajien kulkua piiriin ja pienentäen rekombinaatiota.

3 Yhteenveto

Aurinkovoima on olennainen teknologia uusiutuvan energiatalouden kasvattamisessa. Globaalin kapasiteetin kasvattaminen vaatii kehitystä kautta linjan kennojen suunnittelusta valmistukseen ja asennuksiin saakka. Yksikiteisestä piistä valmistetut aurinkokennot eivät tule yksin pelastamaan globaalia energiataloutta, mutta niiden ymmärtäminen luo pohjan modernille aurinkovoimateollisuudelle. Aurinkokennojen ominaisuuksia ja valmistusmenetelmiä tutkitaan ja kehitetään jatkuvasti niiden energiatehokkuuden, kestävyiden ja ympäristöystävällisyyden parantamiseksi.

Viitteet

- [1] D. M. Chapin, C. S. Fuller ja G. L. Pearson. ”A New Silicon P - n Junction Photocell for Converting Solar Radiation into Electrical Power”. *Journal of Applied Physics* 25.5 (1. toukokuuta 1954), s. 676–677. ISSN: 0021-8979, 1089-7550. DOI: 10.1063/1.1721711. URL: <https://pubs.aip.org/jap/article/25/5/676/160783/A-New-Silicon-p-n-Junction-Photocell-for> (viitattu 24.04.2025).
- [2] Martin A. Green. ”Solar Cells—Operating Principles, Technology and System Applications”. *Solar Energy* 28.5 (1982), s. 447. ISSN: 0038092X. DOI: 10.1016/0038-092X(82)90265-1. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0038092X82902651> (viitattu 25.05.2025).
- [3] Christian Gueymard. *SMART2, a Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine: Algorithms and Performance Assessment*. Florida Solar Energy Center, 1. tammikuuta 1995.
- [4] Heinrich Haberlin ja Herbert Eppel. *Photovoltaics: System Design and Practice*. Hoboken, N.J: Wiley, 2012. 1 s. ISBN: 978-1-119-99285-1 978-1-119-97699-8 978-1-119-97700-1 978-1-283-42542-1. DOI: 10.1002/9781119976998.
- [5] Ben G. Streetman ja Sanjay Banerjee. *Solid State Electronic Devices*. 6th ed., [eastern economy ed.] Dehli: PHI Learning, 2013. ISBN: 978-81-203-3020-7.
- [6] Peter Würfel ja Uli Würfel. *Physics of Solar Cells: From Basic Principles to Advanced Concepts*. 3. Auflage. Weinheim: Wiley-VCH, 2016. 1 s. ISBN: 978-3-527-41311-9.
- [7] Mikko A. Juntunen. ”Mustan piin hyödyntäminen aurinkokennoissa”. 10. joulukuuta 2018.
- [8] Sami Porkola. ”Aurinkosähkösuunnitelma kotitalouskäyttöön”. Lapin AMK, 2019.

- [9] Kwang Su Choe. "Simulation on Optimum Doping Levels in Si Solar Cells". *Korean Journal of Materials Research* 30.10 (lokakuu 2020), s. 509–514. ISSN: 1225-0562, 2287-7258. DOI: 10.3740/MRSK.2020.30.10.509. URL: <https://journal.mrs-k.or.kr/articles/xml/9LXv/journal.mrs-k.or.kr/articles/article/9LXv/> (viitattu 10.06.2025).
- [10] *International Technology Roadmap for Photovoltaics for 2023*. 15. VDMA, 1. toukokuuta 2024.
- [11] *Bias of PN Junctions | PVEducation*. URL: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/pn-junctions/bias-of-pn-junctions> (viitattu 06.06.2025).
- [12] *Conduction in Semiconductors | PVEducation*. URL: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/conduction-in-semiconductors> (viitattu 25.04.2025).
- [13] *Diffusion Length | PVEducation*. URL: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/pn-junctions/diffusion-length> (viitattu 10.06.2025).
- [14] *Fermi Level and Fermi Function*. hyperphysics. URL: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Solids/Fermi.html#c1> (viitattu 04.06.2025).
- [15] *Formation of a PN-Junction | PVEducation*. URL: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/pn-junctions/formation-of-a-pn-junction> (viitattu 25.04.2025).
- [16] Juha Heinonen. "High Sensitivity Photodiodes Using Black Silicon and Induced Junction".
- [17] *Multi Crystalline Silicon | PVEdu*. PVEducation. URL: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/manufacturing-si-cells/multi-crystalline-silicon> (viitattu 04.06.2025).
- [18] *Properties of Sunlight*. PVEducation. URL: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/atmospheric-effects> (viitattu 06.02.2025).

- [19] *Semiconductor Materials* / *PVEducation*. URL: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/pn-junctions/semiconductor-materials> (viitattu 25.04.2025).
- [20] *Single Crystalline Silicon* / *PVEducation*. URL: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/manufacturing-si-cells/single-crystalline-silicon> (viitattu 03.06.2025).