

Nanoteknologia aurinkokennoissa

Helsingin yliopisto

Matemaattis-luonnontieteellinen tiedekunta

Kemian laitos

Kemian opettajankoulutus

Kandidaatintutkielma

Tekijä: Kati Kolehmainen

Pvm: 3.10.2011

Ohjaajat: Maija Aksela

Markku Leskelä

Sisältö

1 Johdanto	1
2 Nanoteknologian kehitys	3
3 Aurinkokennot	6
3.1 Ensimmäisen sukupolven aurinkokennot	6
3.2 Toimintaperiaate	7
3.3 Energiavyömalli	8
3.4 Toisen sukupolven aurinkokennot	11
3.4.1 Kadmiuntelluridiaurinkokenno	11
4 Väriaineherkistettyaurinkokenno	14
3.1 Grätzelin kennon rakenne	14
4.2 Kennojen toimintaperiaate	16
5 Yhteenveto	19
Lähteet	21

Lyhenneluettelo

AFM = Atomivoimamikroskooppi

CuGaSe_2 = CGS = kuparigalliumseleeni

CuInGaSe = CIGS= kupari-indiumgalliumseleeni

CuInSe_2 = CIS = kupari-indiumdiseleeni

CdS = kadmiunsulfidi

CdTe = kadmiuntelluridi

SEM = Pyyhkäisyelektronimikroskooppi

SnO_2 = tinaoksidi

STM = Tunnelointimikroskooppi

TEM = Läpivalaisumikroskooppi

TiO_2 = titaanioksidi

1 Johdanto

Nanoteknologia on tekniikka, jonka avulla valmistetaan nanometrin kokoisia rakenteita. Nanotiede on tieteen ala, joka tutkii nanopartikkeleita, eli hiukkasia, joiden koko on 1–100 nanometriä. Nanoteknologiassa käsiteltävä kokoluokka ymmärretään paremmin, kun verrataan sitä helpommin hahmotettavaan kokoon. Bakteerien läpimitta on noin 100–1000 nanometriä ja yhden hiuksen paksuus on 50 000 nanometriä. Asetettaessa kymmenen vetyatomia jonoon on jonon pituus yksi nanometri.¹

Nanotieteissä ja nanoteknologiassa kokoluokka voidaan määritellä eri tavoin. Yleisimmin puhutaan juuri 1–100 nanometristä. Mittauksien kannalta 1 nm soveltuu alarajaksi, sillä tässä kokoluokassa mittaukset ovat vielä mahdollisia. Ylärajaksi on valittu 100 nm, sillä tämän jälkeen materiaali alkaa menettää pieneen kokoon liittyviä ominaisuuksia. Tämän kokoluokan materiaaleilla on erilaisia ominaisuuksia kemian ja fysiikan kannalta, liittyen elektronirakenteeseen, lämmönjohtokykyyn, reaktiivisuuteen ja sulamislämpötilaan.^{2,3}

Perinteinen kemia tutkii molekyylitason ilmiöitä, mutta nykyään ollaan kiinnostuneita vielä pienemmistä atomitason ilmiöistä. Kiinnostus nanoteknologiaa kohtaan on valtava, ja on jopa puhuttu seuraavasta teollisesta vallankumouksesta. Kiinnostavaksi nanoteknologian tekevät sen erittäin pieni koko ja siihen liittyvien mekanismien ymmärtäminen ja hallinta.⁴

Suomessa toteutettiin vuosina 2005–2010 FinNano ohjelma, jossa kehitettiin suomalaista nanoteknologian osaamista. Tekesin FinNano ohjelman budjetti oli kokonaisuudessaan 70 miljoonaa euroa. Ohjelmaan kuului myös Suomen Akatemian nanotieteen tutkimusohjelma ja opetusministeriö panosti 19 miljoonaa euroa nanotieteen infrastruktuurin parantamiseen. Tästä voidaan päätellä Suomen panostavan merkittävästi nanomittakaavan ilmiöiden tutkimiseen. Nanoteknologian kehittyminen tuo uusia tutkimusmenetelmiä ja työvälineitä tutkijoille.⁵

Nanoteknologian ajankohtaisuus ja tutkimukseen käytettävät resurssit näkyvät myös yliopistojen tutkimushankkeissa. Helsingin yliopiston kemian laitoksen tutkimuksen tavoiteohjelmassa mainitaan nanokemia ja –teknologia yhtenä tärkeimmistä kehittämishankkeista. Tavoitteena on valmistaa ja karakterisoida uusia nanokokoisia rakenteita. Vihreän kemian kehittäminen koetaan myös tärkeäksi. Ohutkalvotekniikoiden avulla pyritään vähentämään kemikaali määriä ja kehittämään laitteista tehokkaampia.⁶ Jyväskylän yliopistoon on perustettu Nanotiedekeskus (Nano science center), joka tutkii molekyylitason nanosysteemejä. Yksi heidän keskeisistä tutkimuskohteista on väriaineilla herkistetyt aurinkokennot.⁷

Aurinkokennoja tutkitaan, jotta niiden hyötysuhdetta voitaisiin parantaa, valmistamiskustannuksia saataisiin alennettua ja voitaisiin käyttää materiaaleja, joita on helposti saatavilla eivätkä olisi haitallisia ihmisille ja ympäristölle. Tällä hetkellä suurin osa aurinkokennoista valmistetaan piistä, jonka valmistaminen ja muokkaaminen aurinkokennolle sopivaksi vie paljon energiaa. Hyvän hyötysuhteen takia piistä valmistetaan suurin osa aurinkokennoista. Väriaineherkistettyjen aurinkokennojen massatuotanto on myös aloitettu.⁸

Fossiiliset polttoaineet olisi pyrittävä korvaamaan uusiutuvilla energianlähteillä, kuten aurinkoenergia ja tuulivoima. Tällöin saataisiin vähennettyä päästöjen määrää ja ilmastoon vapautuvien kasvihuonekaasujen määrää. Kasvava energiantarve ja lisääntyvä väestön määrä pakottaa teollisuuden myös pohtimaan vaihtoehtoisia energian tuottamistapoja. Puhutaan myös fossiilisten polttoaineiden loppumisesta, mutta loppumista on vaikea ennustaa, sillä kaikkia maaöljyn ja maakaasun lähteet eivät ole vielä tiedossa.⁹

Työni jakautuu kolmeen osaan. Ensimmäisessä kappaleessa tutustutaan nanoteknologian tutkimuksen historiaan ja kiinnostaviin tutkimuskohteisiin. Kappaleessa kolme käsitellään ensimmäisen ja toisen sukupolven aurinkokennoja ja toimintaperiaatetta. Kappale neljä painottuu kolmannen sukupolven aurinkokennojen tutkimukseen ja siinä saavutettuihin tuloksiin.

2 Nanoteknologian kehitys

Nanoteknologia on saanut alkunsa 1970 luvulta Richard Feynmanin puheista ja fraasista ”There's plenty of room at the bottom.” Hänen mukaansa nanoteknologiassa on kyse siitä, että selvitetään aineiden atomirakenteita ja niitä hallitusti muokkaamalla saadaan aikaiseksi uusia tuotteita. Nanoteknologia on kehittynyt valtavasti uusien menetelmien kehittymisen myötä.

Gerard Binning ja Heinrich Rohrer kehittivät 1980-luvun alussa tunnelointimikroskoopin (Scanning tunneling microscope, STM), jonka avulla saadaan kolmiulotteista kuvaa näytteen pintarakenteesta ja ominaisuuksista atomitasolla. He saivat keksinnöstään vuonna 1986 Nobelin palkinnon. Atomivoimamikroskooppi (Atomic force microscope, AFM) on toinen mikroskooppi, joka on nopeuttanut nanoteknologian kehitystä. Se kehitettiin materiaalien pinnan kuvaamiseen sekä partikkelien välisten vuorovaikutusten mittaamiseen.⁴

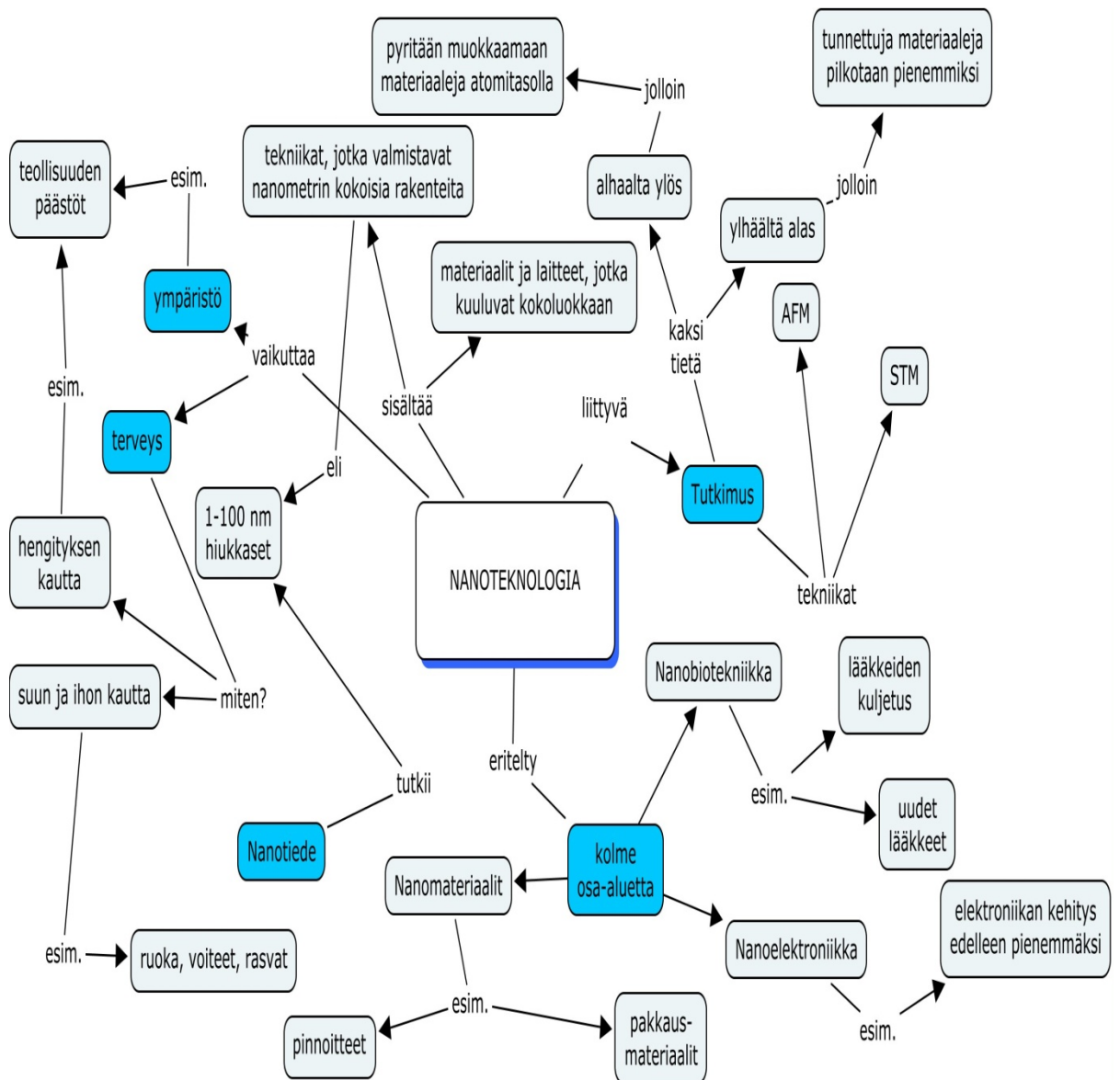
Nämä kaksi menetelmää eivät kuitenkaan olleet ensimmäisiä mikroskooppeja, joilla kuvaaminen oli mahdollista. Pyyhkäisyelektronimikroskooppia (Scanning electron microscope, SEM) ja läpivalaisuelektronimikroskooppia (Transmission electron microscope, TEM) oli käytetty jo 1950-luvun alusta. STM ja AFM ovat kuitenkin merkittävästi halvempia ja helpompia käyttää, lisäksi niiden avulla voidaan manipuloida materiaaleja atomitasolla. Usein mikroskooppeja käytetään kuitenkin yhdessä, jotta saadaan monipuolisempi kuva näytteestä ja näytteen analysointi tulee helpommaksi.⁴

Tiede nanoteknologian takana on uutta, vaikka nanokokoisia objekteja on aina ollut olemassa. Roomalaisten tiedetään jo antiikin aikana käyttäneen hyödykseen nanometalleja lasin valmistamisessa ja myöhemmin hopeapartikkeleja on käytetty valokuvauksessa pikseleiden luomiseen. Nykyaikana nanoteknologiaa hyödynnetään muun muassa materiaalien valmistuksessa, elektroniikan kehittämisessä ja lääketieteessä.¹⁰

Nanotieteiden tavoitteena on pyrkiä kontrolloimaan ja muokkaamaan materiaaleja molekyylitasolla, jolloin materiaalien ominaisuuksien muokkaaminen on mahdollista. Tällöin puhutaan bottom-up-tutkimuksesta eli alhaalta ylös -menetelmästä. Vastakohtana tälle menetelmälle pidetään top-down-menetelmää (ylhäältä alas), jossa materiaaleja pilkotaan pienemmiksi nanopartikkeleiksi. Tällä hetkellä tutkimus on painottunut top-down-menetelmään, erityisesti elektroniikassa.¹⁰

Nanoteknologia näkyy jo monin tavoin ihmisten arjessa. Nanoteknologian avulla on kehitetty uusia materiaaleja, kuten hiilinanoputket ja nanonuput. Nanonuppu on suomalainen keksintö, jota hyödynnetään elektroniikka- ja energiateknologiassa. Nanoteknologiaa on hyödynnetty maaleissa ja pinnoitteissa, esimerkkeinä likaantumattomat ja itsestään puhdistuvat materiaalit. Lääketiede käyttää hyödykseen nanoteknologiaa tutkiessaan nanopartikkeleiden kohdentamista tiettyihin soluihin.⁵

Käsitekarttaan (Kuva 1.) on koottu, mitä nanoteknologian tutkimus sisältää, ja minkä asioiden tutkimisesta ollaan nanoteknologian kannalta kiinnostuneita. Nanoteknologian tutkimuksen ja tuotteiden turvallisuus on myös yksi voimakkaasti esille noussut asia, jota tutkitaan.



Kuva 1. Käsitekartta nanoteknologiasta

3 Aurinkokennot

Valosähköisen ilmiön keksi ensimmäisenä ranskalainen fyysikko Edmond Becquerel vuonna 1839. Aurinkokennojen toiminta perustuu valosähköisen ilmiöön, jossa valo saa materiaalissa aikaan elektroniaukkopareja. 1950-luvulla havaittiin piin puolijohde ominaisuudet, joka vauhditti ilmiön hyödyntämistä myös aurinkokennoissa. Aurinkokennojen energiantuotantoon liittyvät mahdollisuudet havaittiin pian. Aurinkokennojen tutkimus alkoi kehittyä 1970-luvulla, jolloin aurinkokennoja valmistettiin sekä kiteisestä että amorfisesta piistä.¹¹

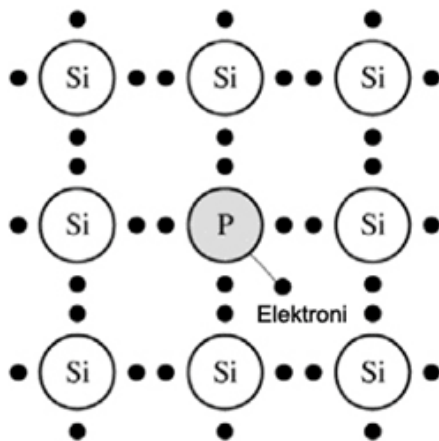
Suurin osa käytössä olevista aurinkokennoista valmistetaan edelleen samoja tekniikoita käyttäen. Kymmenen vuotta myöhemmin 1980-luvulla kasvoi myös ohutkalvotekniikalla valmistettujen kennojen tutkimus ja nämä ovat valtaamassa osuutta myös markkinoilla olevista aurinkokennoista. 1990-luvulla kasvava huoli ympäristöstä myös kasvatti edelleen aurinkokennojen tutkimusta ja haluttiin etsiä vaihtoehtoisia energian tuotantotapoja, joilla voidaan pienentää hiilidioksidipäästöjä sekä ehkäistä ilmaston lämpenemistä.¹¹

3.1 Ensimmäisen sukupolven aurinkokennot

Kiteiset piikennot ovat ensimmäisen sukupolven aurinkokennoja, joiden tuotanto on tällä hetkellä noin 80 prosenttia kaikkien aurinkokennojen tuotannosta. Kiteisillä piillä on epäsuora energia-aukko, jonka vuoksi sitä voidaan käyttää vain paksuina kerroksina, noin 100 mikrometriä. Materiaalina pii on kallis, koska aurinkokennoihin se on saatava puhtaana alkuaineena. Pii on toiseksi yleisin alkuaine maapallolla, mutta se ei koskaan esiinny puhtaana alkuaineena. Kiteisten piikennojen hyötysuhteet ovat tällä hetkellä korkeimpien joukossa ja siksi piitä edelleen käytetään aurinkokennojen valmistuksessa. Piin käsitteleminen aurinkokennolle soveltuvaksi vie kuitenkin paljon energiaa ja tämä nostaa tuotantokustannuksia.¹²

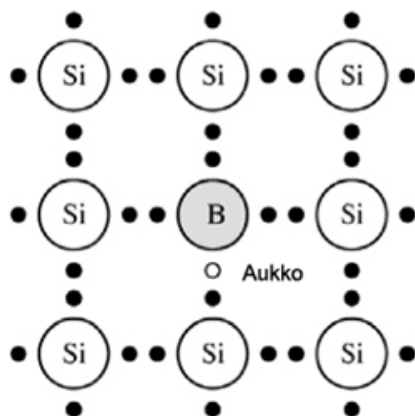
3.2 Toimintaperiaate

Piiaurinkokenno pohjautuu p- ja n-tyyppin puolijohdeiden liitokseen. Puhdas pii on eriste, mutta sen sähkönjohtavuutta kasvatetaan lisäämällä siihen muita atomeja. n-tyyppin puolijohde (Kuva 2.) saadaan lisäämällä piihin arseenia tai fosforia. Piillä (Si) on neljä ulkoelektronia ja arseenilla (As) ja fosforilla (P) on molemmilla 5 ulkoelektronia. Kiderakenteeseen saadaan yksi ylimääräinen elektroni.¹²



Kuva 2. n-tyyppin puolijohde¹³

p-tyyppin puolijohde (Kuva 3.) valmistetaan lisäämällä piihin booria tai alumiinia. Boorilla (B) ja alumiinilla (Al) on kolme ulkoelektronia, jolloin kiderakenteeseen jää elektroniaukkoja. Puolijohdeet absorpoivat auringon säteilyn fotoneja, joiden avulla puolijohteisiin saadaan elektroni-aukkopareja. Tapahtuma ilmennetään elektronien energiavyömallin avulla.¹²



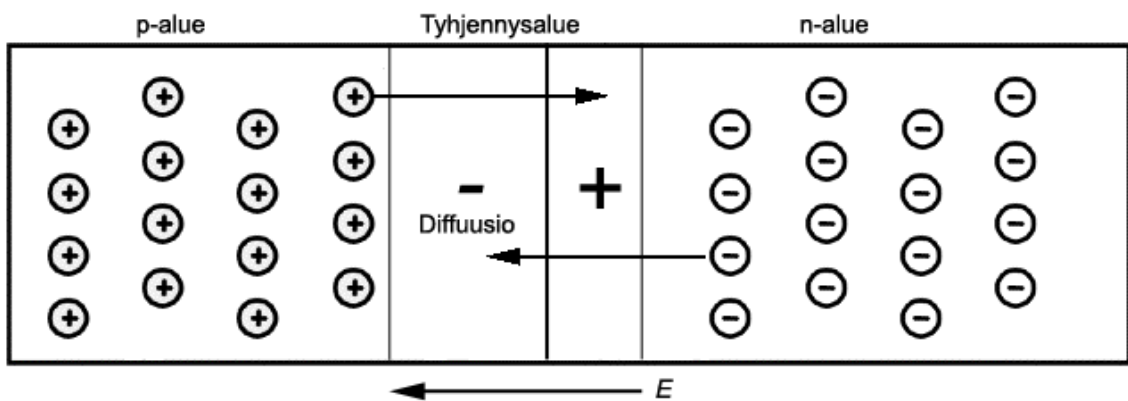
Kuva 3. p-tyyppin puolijohde¹³

3.3 Energiavyömalli

Atomit muodostavat kiderakenteita, joissa elektronien vuorovaikutukset muuttavat energiatasoja ja ne jakautuvat pienempiin energiatasoihin, erittäin lähekkäin. Kiderakenteessa atomit tuodaan lähelle toisiaan, jolloin energiatasot ovat hyvin tiheässä ja ne levittyvät energiavöiksi. Energiavyömallissa elektronit täyttävät vyöt järjestyksessä alimmasta vyöstä alkaen. Elektronien maksimienergiaa lämpötilassa 0 K kutsutaan Fermi-energiaksi. Valenssivyö on korkein täysin miehitetty vyö ja sijaitsee Fermi-energian alapuolella. Fermi-energian yläpuolella on johtavuusvyö, joka puolijohteilla on tyhjä. Valenssivyön ja johtavuusvyön välissä on kiellettyalue, energia-aukko. Puolijohteilla energia-aukko on pieni ja auringon valon fotonit voivat nostaa elektronit johtavuusvyölle.¹⁴

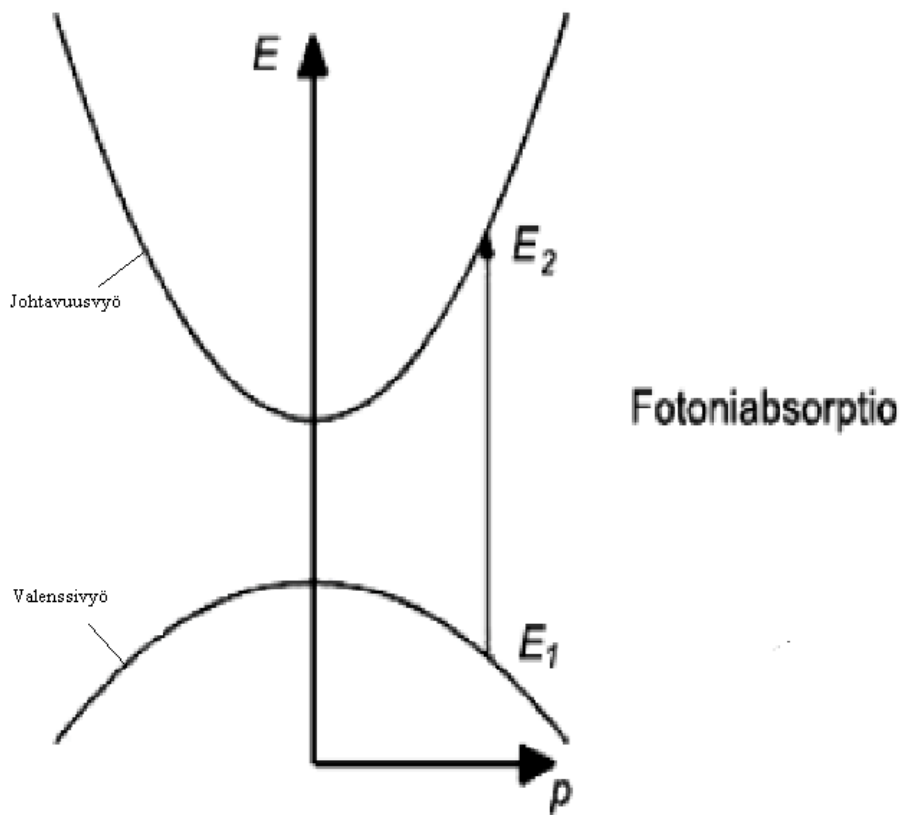
n-tyyppin puolijohteet on seostettu alkuaineilla, joiden avulla kiderakenteeseen jää ylimääräisiä elektroneja eli negatiivisia varauksia. p-tyyppin puolijohteet sisältävät aukkoja, jotka voivat kuljettaa varauksia. Kuvassa 2 on pii on seostettu fosforilla. Fosforilla seostettaessa kiderakenteessa on elektroneja, jotka eivät osallistu kovalenttisiin sidoksiin. Kuvassa 3 pii on seostettu boorilla, jolloin kiderakenteeseen jää elektroniaukkoja.¹⁴

p-tyyppin ja n-tyyppin puolijohteita liitetään toisiinsa ja saadaan puolijohdeliitos, pn-liitos (Kuva 4.). Liitoskohtaan syntyy tyhjennysalue, jossa n-puolen johtavuusvyölle siirtyneet elektronit diffundoituvat p-puolella ja p-puolen aukot vastaavasti n-puolelle. n-puolella on positiivisesti varautunut alue, sillä elektronit siirtyvät p-puolelle ja jättävät jälkeensä positiivisesti varautuneita ioneja. p-puolelle syntyy vastaavasti negatiivisesti varautunut alue, sillä aukkojen siirtyessä p-puolelle syntyy negatiivisia ioneja. Liitoskohdalle syntyy sähkökenttä n-puolelta p-puolelle. Tätä kohtaa kutsutaan tyhjennysalueeksi.¹⁴



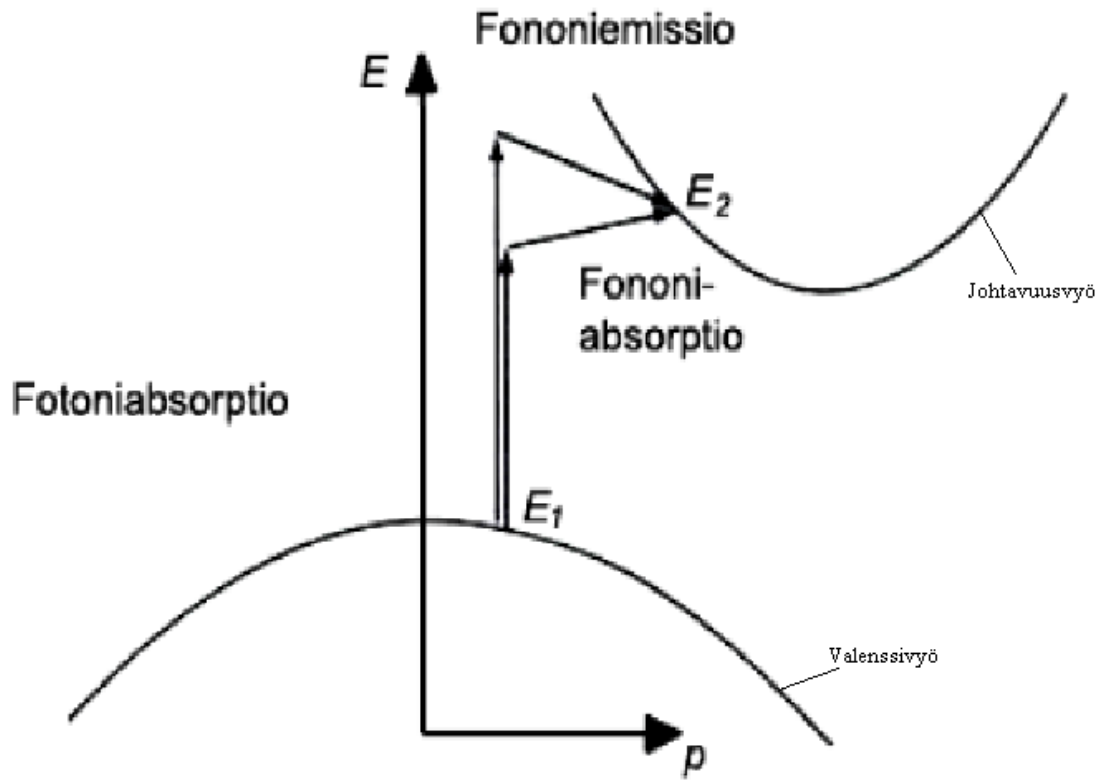
Kuva 4. Puolijohdeliitos¹⁵

Suoran energia-aukon puolijohteiksi kutsutaan puolijohteita, joiden johtavuusvyön energiaminimi sattuu samalle liikemäärän arvolle valenssivyön maksimienergian kanssa (Kuva 5.). Kuvassa on y-akselilla kuvattu energia E ja x-akselilla elektronien liikemäärä p .



Kuva 5. Suora energia-aukko. Kuva on muokattu lähteestä.¹⁶

Kuvassa 6 on kuvattu epäsuoran energia-aukon puolijohde, jolloin johtavuusvyön minimienergian arvo ja valenssivyön maksimin liikemäärän arvot eivät osu samalle liike-energian arvolle. Epäsuoran energia-aukon puolijohteet tarvitsevat välittäjähiukkasen, fononin, vapauttaakseen elektronin johtavuusvyölle.



Kuva 6. Epäsuora energia-aukko. Kuva on muokattu lähteestä.¹⁶

3.4 Toisen sukupolven aurinkokennot

Toisen sukupolven aurinkokennot valmistetaan ohutkalvotekniikalla. Ohutkalvokennoja valmistetaan amorfisesta piistä, jolloin piitä kennossa on ohuempi kerros kuin tavallisissa piikennoissa. Amorfisella piillä ei kuitenkaan ole saavutettu yhtäsuuria tehokkuusprosentteja kuin kiteistä piitä käytettäessä. Aurinkokennoista 10 %:a valmistetaan ohutkalvotekniikoita hyväksi käyttäen. Piin lisäksi ohutkalvokennoja valmistetaan kadmiuntelluurista (CdTe). Ohutkalvojen avulla aurinkokennojen tuotantokustannuksia yritetään laskea.¹⁷

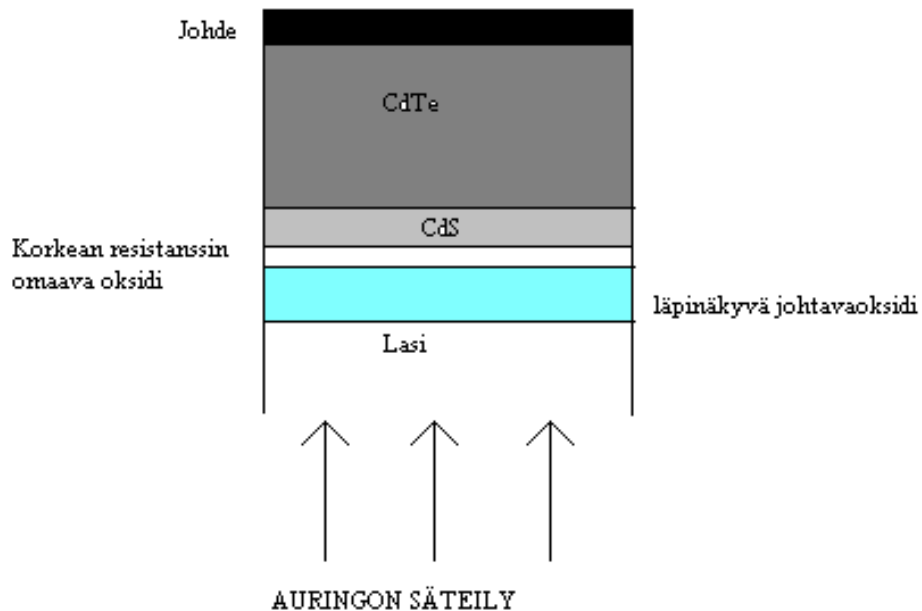
Toisen sukupolven aurinkokennojen etuja on myös mahdollisuus taipuvien ja valoa läpäisevien kennojen valmistukseen. Aurinkokennojen tutkimuksessa on tutkittu p-tyypin puolijohteita kupari-indiumdiseleni (CuInSe_2 , CIS) ja kuparigalliumdiseleni (CuGaSe_2 , CGS) sekä näiden yhdisteestä kupari-indiumgalliumseleniä (CuInGaSe , CIGS), joilla on suora energia-aukko.¹⁷

3.4.1 Kadmiuntelluridaurinkokenno

Toisen sukupolven aurinkokennot valmistetaan ohutkalvotekniikalla. Tekniikka kertoo, että niissä käytetään ohuempia kerroksia materiaaleja ja kerrokset voidaan valmistaa erilaisilla kasvatusmenetelmillä. Kadmiuntelluridin (CdTe) aurinkokennoissa kalvojen paksuus on noin 0,5 mikrometriä. Kadmiuntelluridin suora energia-aukko on ideaalinen auringon valon absorboimiseen. Lisäksi materiaalina kadmiuntelluridi on kemiallisesta stabiili. Kadmium on kuitenkin myrkyllinen¹⁸, mikä on hidastanut kennojen käyttöönottoa. Ympäristön näkökulmasta kennojen kierrätys on myös ongelmallista.¹⁹

Kadmiuntelluridi kenno koostuu kuudesta osasta (Kuva 7). Auringon säteily saavuttaa ensimmäisenä lasin, jonka jälkeen on läpinäkyvä kerros johtavaaoksidia, SnO_2 , joka toimii etupuolen johteena. Tätä seuraa korkean resistanssin omaava oksidi, kuten seostamaton SnO_2 . Tämä jälkeen tulee kerros kadmiunsulfidia ja kadmiuntelluridia, jotka muodostavat heteroliitoksen. Näiden jälkeen on takapuolen kontakti. Johteena käyteen usein metallikalvoa, kuten alumiinia.¹⁹

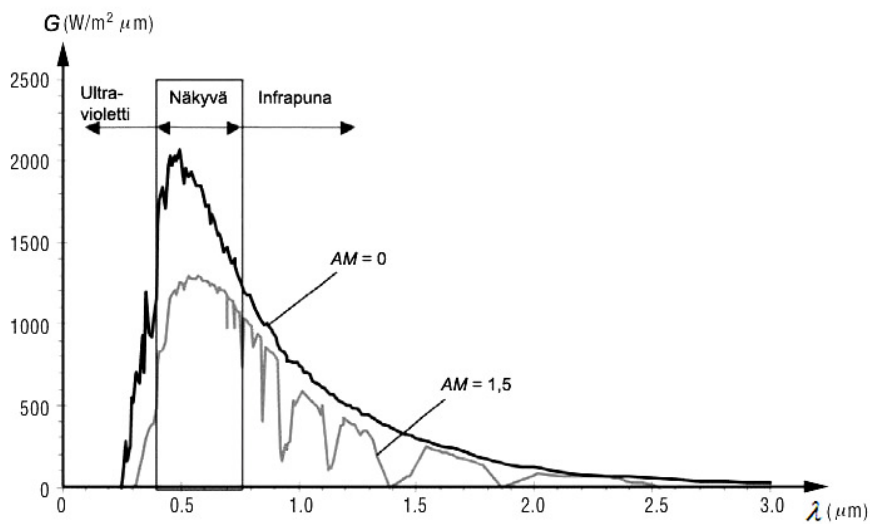
Kennojen etuihin kuuluu mm. matalat tuotantokustannukset. Kennojen käyttö tulevaisuudessa on kuitenkin epävarmaa kadmiumin myrkyllisyyden ja telluurin saatavuuden vuoksi. Kennojen hyötysuhteeksi standardi olotiloissa AM 1,5 on saatu 16,6 prosenttia.¹⁹



Kuva 7. Kadmiuntelluuri kennon rakenne

Kadmiumtelluridiaurinkokennoja on kaupallistettu, muun muassa First Solar valmistaa aurinkokennonsa tekniikkaa käyttäen. Alhaista hyötysuhdetta ei koeta haitaksi, koska tuotantokustannukset ovat paljon matalimmat ensimmäisen sukupolven aurinkokennoihin verrattuna.²⁰

Aurinkokennojen hyötysuhteet kertovat, kuinka tehokkaasti aurinkokenno hyödyntää aurinkoenergian pinta-alansa suhteen. Aurinkokennojen hyötysuhteet μ mitataan samoissa standardi olosuhteissa AM 1,5 ja lämpötilassa 25 °c. AM 1,5 spektri (Kuva 8.) on määritetty standardiksi määrittäessä aurinkokennojen hyötysuhteita ja näin mahdollistetaan hyötysuhteiden vertailu.²¹



Kuva 8. Auringonvalon spektrit ilmakehän ulkopuolella (AM0) ja maapallon pinnalla (AM1,5).²²

4 Väriaineherkistettyaurinkokenno

Michael Grätzel julkaisi vuonna 1991 artikkelinsa väriaineherkistetyistä aurinkokennoista eli Grätzelin kennoista. Tuolloin kennoille oli saavutettu 9 prosentin hyötysuhde. Tutkimus on tämän jälkeen edistynyt merkittävästi ja hyötysuhde on saatu korkeammaksi. Käänteen tekävää näissä kennoissa oli se, että materiaalina ei käytetty piitä vaan epäorgaanista halvemmin saatavaa materiaalia. Ensimmäisen ja toisen sukupolven aurinkokennoissa kennomateriaalit ovat kiinteästä aineesta, kun taas Grätzelin kennoissa parin muodostavat kiinteä ja neste faasit. Periaate kennoissa mukailee luonnossa tapahtuvaa fotosynteesiä. Vuonna 2010 Michael Grätzelille myönnettiin Millenium–teknologiapalkinto työstään väriaineherkistettyjen aurinkokennojen kehittämiseksi.²³

3.1 Grätzelin kennon rakenne

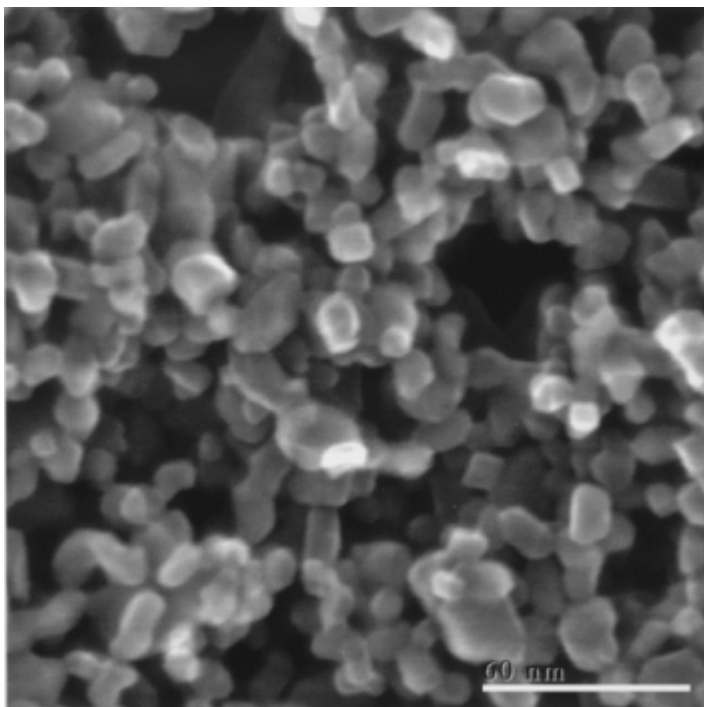


Kuva 9. Väriaineherkistetyn aurinkokennon rakenne.

Väriaineherkistettyaurinkokenno koostuu neljästä osasta (Kuva 9).

- 1) Anodi
- 2) Aktiivinen elektrodi (Puolijohdekalvo)
- 3) Elektrolyytti
- 4) Vastaelektrodi

Aurinkokennon ensimmäinen osa on johtava alusta. Aurinkokennoissa tämä osa on lasia, sillä se läpäisee auringon valoa. Lasin toinen pinta on pinnoitettu sähköä johtavalla aineella kuten platinalla, Pt. Aktiivinen elektrodi valmistetaan yleensä huokoisesta titaanioksidista TiO_2 . Titaanioksidin rakenne kuvattuna tunnelointimikroskoopin (Kuva 10.) avulla kertoo, että materiaali on mesohuokoinen. Titaanioksidin pintaan kiinnitetään väriainemolekyylejä. TiO_2 pinta on huokoinen, koska silloin pintaan saadaan kiinnitettyä enemmän väriainemolekyylejä kuin pinnan ollessa tasainen. Väriaine lisätään, koska titaanioksidin oma energia-aukko on liian leveä ja auringon valon energia ei ole riittävä muodostamaan elektroniaukkopareja.⁸



Kuva 10. STM kuva TiO_2 rakenteesta.²⁴

Valon absorptio tapahtuu väriainemolekyyleissä, jonka seurauksena väriainemolekyyleistä siirtyy elektroneja puolijohteeseen. Titaanioksidin muodostaman verkoston kautta elektronit siirtyvät johtavalle alustalle ja piirin kautta vastaelektrodille. Aurinkokennon välissä on elektrolyyttiliuos, joka muodostuu jodidi/trijodidi hapetus-pelkistys parista. Vastaelektrodilta elektronit siirtyvät elektrolyyttiliuokseen. Elektrolyyttiltä elektronit siirtyvät jälleen väriainemolekyyleille palauttaen ne perustilaansa. Uusimmissa kennorakenteissa ja tutkimuksessa I_2/I_3 -elektrolyytti on korvattu ionisilla nesteillä^{24, 8}.

4.2 Kennojen toimintaperiaate

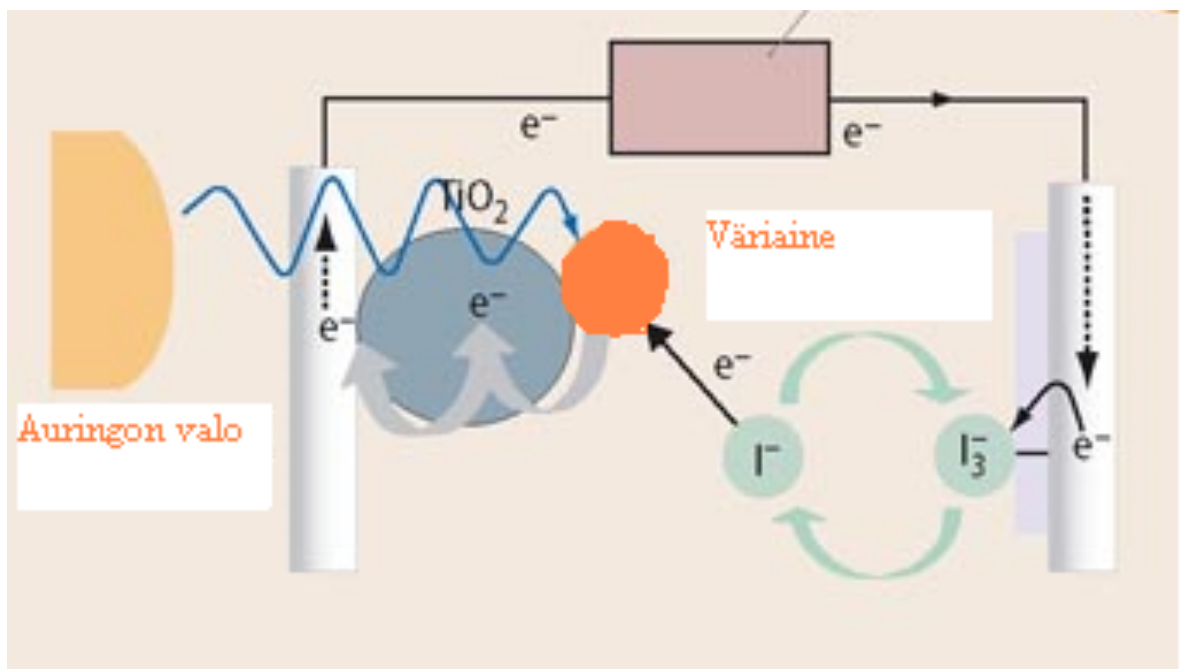
□

Auringon energia eli valon fotonit $h\nu$ saavuttavat kennon. Energia aiheuttaa väriainemolekyylien S molekyyliorbitaalilla elektronien virittymisen (reaktio 1). Virittynyt elektroni pääsee irtoamaan väriainemolekyylistä (reaktio 2). Titaanioksidin johtavuusvyöllä elektroni pääsee kulkemaan eteenpäin puolijohteessa. Titaanioksidin kautta elektronit kulkevat anodille ja sieltä sähkövirtana vasta elektrodille. Elektrolyyttiliuoksen sisältämät jodiatomit saavat elektroneja katodilta (reaktio 3). Väriainemolekyylit saavat luovuttamiensa elektronien tilalle uudet elektronit elektrolyyttiliuoksen jodiatomeilta (4). Tämä täydentää virtapiirin.⁸

Reaktioyhtälöt



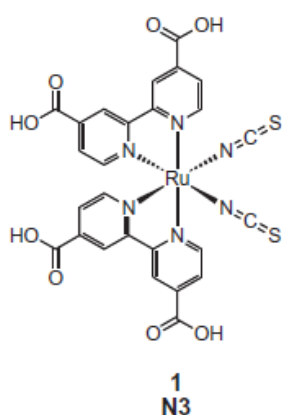
Reaktioyhtälöiden lisäksi Kuvassa 11 on esitetty elektronien siirtyminen kennon sisällä.



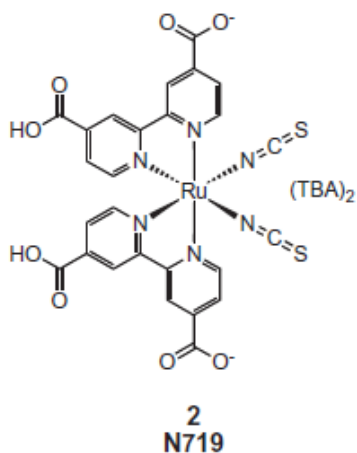
Kuva 11. Väriaineherkistettyjenaurinkokennojen toimintaperiaate. Kuva on muokattu lähteestä.²⁶

Ideaalisen väriaineen tulisi absorboida kaikilla auringon säteilyssä olevilla aallonpituuksilla. Erityisesti tulisi kattaa koko näkyvän valon ja lähi-infrapuna-alueet eli aallonpituudet alle 900 nm:ä, joilla auringon säteily on erityisen voimakasta. Tehokkuuden kannalta on tarpeellista, että väriaineet sisältävät kemiallisia ryhmiä, joiden avulla ne voivat muodostaa sidoksia puolijohteen kanssa. Väriainemolekyylien tulee myös olla stabiileja valolle ja lämmölle. Väriaineiden tutkimus on keskittynyt metallikomplekseihin ja erityisesti ruteenikomplekseihin.⁸

N3 (Kuva 12) väriainemolekyylin kemiallinen kaava on $\text{RuL}_2(\text{NCS})_2$, jossa L= 4,4'-dikarboksyyl-2,2'-dipyridyyl. Karboksyyli-ryhmien avulla väriaine kiinnittyy puolijohdekalvoon ja tiotsyanaattiryhmät lisäävät molekyylin absorptiota. Samankaltaisia ruteenikomplekseihin perustuvia väriainemolekyyliä on tutkittu useita. N719 molekyyli (Kuva 13.) on samankaltainen N3 molekyylin kanssa.⁸

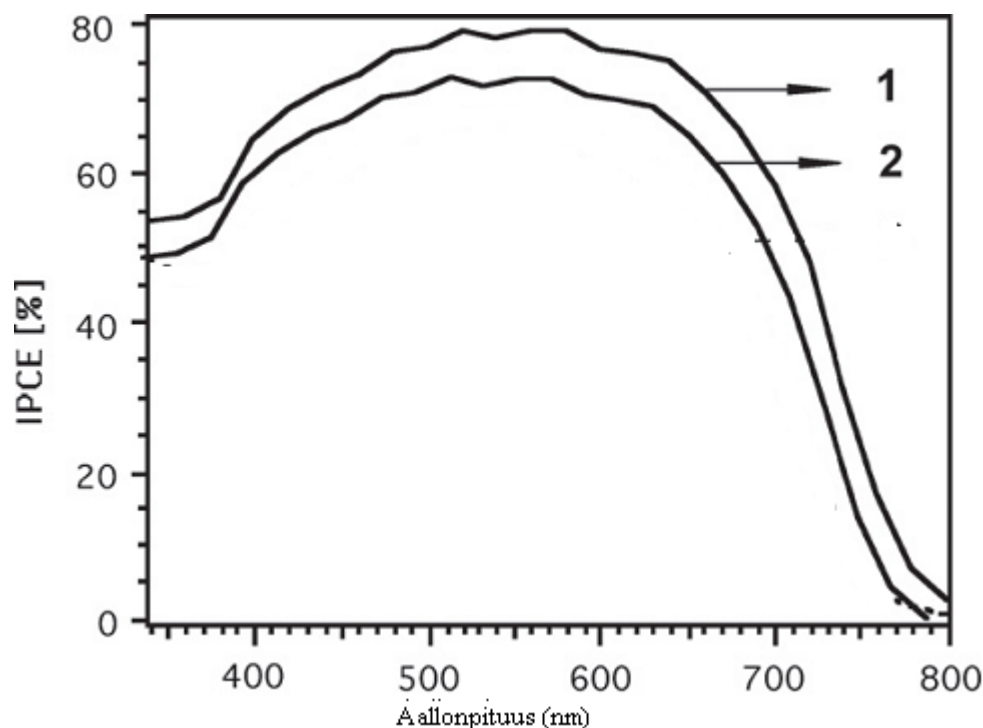


Kuva 12. N3 väriainemolekyylin rakenne.⁸



Kuva 13. N719 väriainemolekyylin rakenne.⁸

Kuvassa 14 esitetään fotonien virraksi muuttumistehokkuutta eri aallonpituus alueilla eräissä Grätzelin kennoissa. IPCE on varauksenkuljettajien ja fotonien suhde, jonka avulla saadaan tietoa, kuinka hyvin väriainemolekyylit soveltuvat aurinkokennoihin. N3 (1) ja N719 (2) väriainemolekyyleillä on tutkimuksissa saatu hyviä tuloksia. Näkyvän valon aallonpituuden välillä 350 nm-700 nm väriaineiden N3 ja N719 tehokkuus on suurimmillaan.



Kuva 14. Väriaineiden N3 (1) ja N719 (2) tehokkuus eri aallonpituus alueilla. Kuva on muokattu lähteestä.⁸

Väriaineherkistettyjen kennojen teollinen tuotanto on aloitettu ja tällä hetkellä niitä on käytössä muun muassa selkärepuissa. Niissä olevien taipuisien ja keveiden aurinkokennojen avulla voidaan ladata matkapuhelimia ja muita pieniä laitteita.²⁷

Väriaineherkistetyillä aurinkokennoissa löytyy vielä paljon kehitettävää. Kennoissa käytettävä lasi on kallista. Minna Toivola on tutkinut voidaanko se korvata edullisemmille muovikalvoille ja metallilevyille. Metallilevyille siirrettäessä on tutkittu mahdollisuutta rakentaa kattorakenteita aurinkokennoista.²⁸

5 Yhteenveto

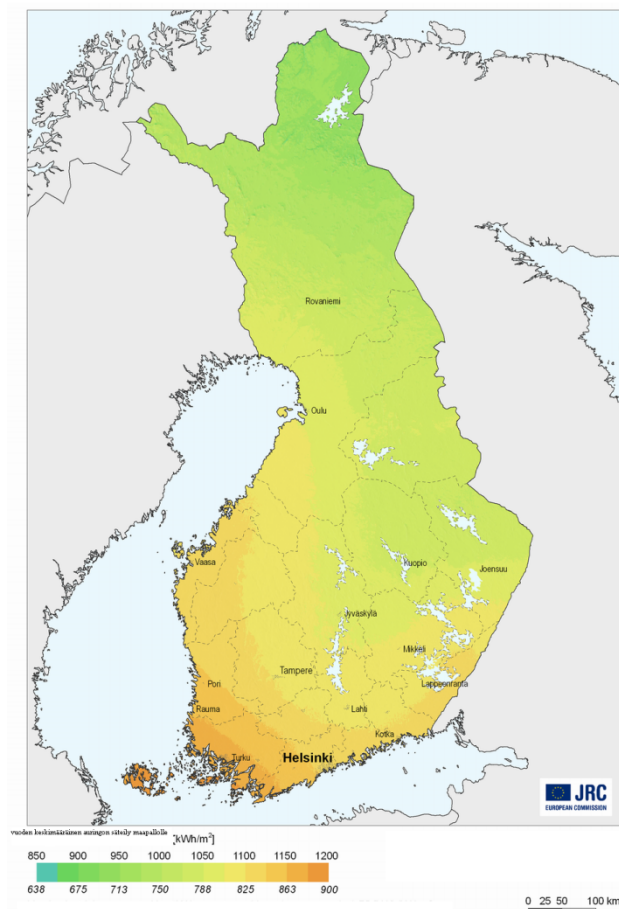
Tällä hetkellä 80 prosenttia aurinkokennoista valmistetaan edelleen piistä. Pii on kuitenkin raaka-aineena kallis ja kennojen valmistuskustannukset vievät paljon energiaa. Piikennoilla on kuitenkin tähän mennessä saavutettu paras hyötysuhde 25,0 prosenttia. CdTe kennoilla on saavutettu 16,6 prosentin hyötysuhde, CIGS kennoilla 19,6 prosentin hyötysuhde ja väriaineherkistetyillä kennoilla 10,4 prosentin hyötysuhde.²⁹

Toisen sukupolven aurinkokennojen hyötysuhteet ovat matalammat ensimmäisen sukupolven pii kennoihin verrattuna. Toisen sukupolven aurinkokennoilla on muita etuja, kuten matalammat tuotantokustannukset ja kennoista on mahdollista rakentaa taipuisia, kuten Grätzelin kennot repuissa. Nanoteknologian avulla kehitetään myös tekniikka, jolla aurinkokennoja pystytettäisiin painamaan laitoksissa massatuotantona halvalla ja nopeasti.

Tutkimus aurinkokennojen ympärillä jatkuu ja hyötysuhteita yritetään saada nostettua tekemällä muutoksia kennojen rakenteisiin, esimerkiksi uusia hyödynnettäviä materiaaleja kehittämällä. Tärkeää on myös kehittää aurinkokennoja ympäristöystävälliseksi ja saada pidennettyä kennojen käyttöikää.

Väriaineherkistettyjen aurinkokennojen tutkimuksessa kehitetään uusia orgaanisia väriaineita, sillä raaka-aineena rutenium on kallis. Aurinkokennoissa käytettäviä elektrolyyttiliuoksia tutkitaan ja kehitetään kennoille sopivammiksi. Jodidi/trijodidi elektrolyyttiliuos edistää nopeasti korroosiota kennon sisällä ja vähentää sen käyttöaikaa. Tällä hetkellä kennoissa käytetään jo ionisia nesteitä ja tämän lisäksi tutkitaan liuoksen korvaavuutta kiinteällä aineella.

Aurinkokennojen tutkimus etenee tällä hetkellä nopeasti ja puhutaan jo neljännen sukupolven aurinkokennoista, jotka valmistetaan orgaanisista materiaaleista. Auringon säteilyvoimakkuus maanpinnalla on keskimäärin 1360 W/m^2 . Säteilyn voimakkuus jakautuu kuitenkin sijainnin, vuorokauden ja vuodenajan suhteen. Kuvassa 15 nähdään Suomeen tulevan säteilyvoimakkuuden, joka jakautuu $900\text{--}1200 \text{ W/m}^2$ välille. Voimakkainta säteilyä on etelä Suomessa ja rannikoilla. Suomessa aurinkokennojen avulla saadaan energiaa ja pieniä aurinkokennoja on jo käytössä.



Kuva 15. Suomeen tuleva keskimääräinen auringonsäteily (W/m^2).³⁰

Lähteet

- 1 Ernst, J.V. *Jots.* **35** (2009) 3-8.
- 2 Poole Jr, C. P. ja Owens, F. J. *Introduction to Nanotechnology*. John Wiley & Sons, USA, 2003.
- 3 Vida-Simiti, I. Jumate, N., Chicinas, I., ja Batin, G. *Rom. Journ. Phys.* **49** (2004) 955-965.
- 4 Shew, A. *BSTS.* **28** (2008) 390-399.
- 5 Raivio, T., Pessala, P., Aho, J., Pursula, T., Pathan, A., Teräs, J., ja Hämeri teoksessa *From Spearheads to hunting: Evaluation of Nano Programmes in Finland*. Tekes Programme report 2010.
- 6 Helsingin yliopiston kemian laitoksen tutkimuksen tavoiteohjelma, Helsingin yliopisto, Helsinki,
http://www.helsinki.fi/kemia/hallinto/vuosikertomukset/Annualreport_2008.pdf,
23.8.2011.
- 7 Matemaattis-luonnontieteellisen tiedekunnan tutkimusstrategia, Jyväskylän yliopisto, Jyväskylä, <https://www.jyu.fi/science/tutkimus/Tutkimusstrategia>,
23.8.2011.
- 8 Nazeeruddin, M.K., Baranoff, E. ja Graetzel, M. *Sol. Energy.* **85** (2011) 1172-1178.
- 9 Li, B., Wang, L., Kang, B., Wang, P. ja Qiu, Y. *Solar Energy Mater.Sol. Cells.* **90** (2006) 549-573.
- 10 Sobolev, K. ja Gutiérrez, M. F. *Am. Ceram. Soc. Bull.* **84** (2005) 14-18.
- 11 Shah, A., Torres, P., Tscharnner, R., Wyrsh, N. ja Keppner, H. *Science* **285** (1999) 692-698.
- 12 Catchpole, K.R. *Phil. Trans. R. Soc. A* **364** (2006) 3493-3503.
- 13 Lapp, Tuomas. *Aurinkovoimalan käyttö lisäenergian lähteenä Kiilto Oy:ssä*. Diplomotyö, Tampereen teknillinen yliopisto, Tampere. 2009 s.14
http://webhotel2.tut.fi/units/set/opetus/pdf%20julkiset%20dtyot/Lapp_Tuomas_julk.pdf, 23.8.2011.
- 14 Katz, E.A. teoksessa *Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology*, toim. Nalwa H.S., American Scientific Publishers, USA, 2004, luku 3 s.661.
- 15 Viite 13 s.18
- 16 Viite 13 s.16
- 17 Aberle, A.G. *Thin solid films* **517** (2009) 4706-4710.

- 18 Kadmiun kemikaalikortti www-sivustossa Kansainväliset kemikaalikortit, <http://kappa.ttl.fi/kemikaalikortit/khtml/nfin0020.htm>, 28.8.2011.
- 19 Birkmire, R.W. ja McCandless, B.E. *Curr. Opin. Solid State Mater. Sci.* **14** (2010) 139-142.
- 20 Lincot, D. Summary Report Enviromental, Health, and Safety (EHS) Aspects of First Solar Cadmiun Telluride (CdTe) Photovoltaic (PV) Systems www-First Solar, http://www.firstsolar.com/Downloads/pdf/SummaryReport_French_EHS_Aspects_CdTe_PV_NA.pdf, luettu 28.8.2011.
- 21 Riordan, C. & Hulstrom, R. Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference. 2, 1990, 1085-1088.
- 22 Viite 13 s.9
- 23 Miljoonan euron Millenium-palkinto. Joka Kodin aurinkokenno marjamehusta? www-sivustossa Suomenkuvalehti, <http://suomenkuvalehti.fi/jutut/talous/miljoonan-euron-millennium-palkinto-joka-kodin-aurinkokenno-marjamehusta>, 23.8.2011.
- 24 Kuang, D., Pascal, C., Zakeeruddin, S.M., Hagberg, D.P. Karlsson, K.M., Licheng, S., Zazeeruddin, M.K. ja Grätzel, M. *Sol. Energy* **85** (2011) 1189-1194.
- 25 Grätzel, M. *J. Photochem. Photobiol. C* **4** (2003) 145-153.
- 26 Mortimer, R.J. ja Worrall, D.R. Harnessing solar energy with Grätzel cells www-sivustossa Advancing the Chemical Sciences., RSC, 2007, <http://www.rsc.org/Education/EiC/issues/2007Sept/HarnessingSolarEnergyGratzelCells.asp>, 23.8.2011.
- 27 Patel, R. (2009). Dye-Sensitized Solar to Go www-sivustossa *Technology review*, MIT, 2009. <http://www.technologyreview.com/energy/23775/?a=f>, 23.8.2011.
- 28 Toivola, M. *Dye-sensitized solar cells on alternative substrates*, väitöskirja, Aalto yliopisto, Espoo, 2010, <http://lib.tkk.fi/Diss/2010/isbn9789526030708/isbn9789526030708.pdf>, 23.8.2011.
- 29 Green, M.A., Emery, K., Hishikawa, Y. ja Warta, W. *Prog. Photovolt. Res. Appl.* **19** (2011) 84-92.
- 30 Photovoltaic Geograpfical Information System (PVGIS) www-sivustossa *Joint Research Centre*, European Comission, 2011. http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/cmapi/eu_opt/pvgis_solar_optimum_FI.png, 23.8.2011.