

Aurinkokennomateriaalit ja -rakenteet

LuK-tutkielma
Kalle Rantamäula
Fysiikan tutkinto-ohjelma
Oulun yliopisto
Marraskuu 2020

Sisältö

Merkinnät ja lyhenteet	2
Tiivistelmä	4
1 Johdanto	5
2 Aurinkokennojen toimintaperiaate	6
3 Aurinkokennojen historia	9
4 Perinteiset aurinkokennot	10
4.1 Pii.....	12
4.1.1 Yksikiteinen pii.....	12
4.1.2 Monikiteinen pii.....	12
4.1.3 Amorfinen pii ja mikrokiteinen pii.....	12
4.2 Galliumarsenidi.....	14
4.3 Kadmiumsulfidi.....	14
4.4 Kadmiumtelluridi.....	14
4.5 CIS/CIGS.....	15
5 Modernit aurinkokennot	16
5.1 Väriaineherkistetyt aurinkokennot.....	16
5.2 Perovskiittiaurinkokennot.....	17
5.3 Orgaaniset aurinkokennot.....	18
5.4 Kvanttipisteaurinkokennot.....	20
5.4.1 Kvanttipistekerrosaurinkokennot.....	20
5.4.2 Kvanttipisteherkistetyt aurinkokennot.....	21
5.4.3 Polymeeri-quanttipiste hybridiaurinkokennot.....	21
6 Yhteenveto	22
Lähteet	25

Merkinät ja lyhenteet

Avoimen piirin jännite	Jännite kun resistanssi on ääretön
Oikosulkuvirta	Virta kun resistanssi on nolla
Pimeä virta	Valosähköisessä laitteessa kulkeva virta silloin kun siihen ei osu valoa
Wp	Huipputeho (Peak Watt) Aurinkokennon huipputeho standardi olosuhteissa
Si	Pii
GaAs	Galliumarsenidi
InP	Indiumfosfidi
c-Si	Yksikiteinen pii
mc-Si	Monikiteinen pii, Polypii
a-Si	Amorfinen pii
a-Si:H	Hydrattu amorfinen pii
μ c-Si	Mikrokiteinen pii
μ c-Si:H	Hydrattu mikrokiteinen pii
Ge	Germanium
AlGaAs	Alumiini Galliumarsenidi
GaInP	Gallium Indiumfosfidi
GaInAs	Gallium Indiumarsenidi
Cu ₂ S	Kuparisulfidi
CdS	Kadmiumsulfidi
CdTe	Kadmiumtelluridi
CIS	Kupari indiumdiselenidi (CuInSe ₂)
CIGS	Kupari indium gallium diselenidi (Cu(In,Ga)Se ₂) eli CuInSe ₂ sen ja CuGaSe ₂ seos
TiO ₂	Titaanidioksidi
Nb ₂ O ₅	Niobiumpentoksidi
DSSC	Väriaineherkistetyt aurinkokennot (Dye sensitized solar cells)
CH ₃ NH ₃ PbX ₃	Metyyliammonium lyijyhalogenidi
I	Jodi
Cl	Kloori
Br	Bromi

Å	Ångström, atomien mitoissa käytetty pituuden mittayksikkö 1 Å = 0,1nm
r_{Bohr}	Bohrin eksitonin säde
PbS	Lyijysulfidi
Bi ₂ S ₃	Vismuttisulfidi
PbSe	Lyijyselenidi
Sb ₂ S ₃	Antimonitrisulfidi
CdSe	Kadmiumselenidi
ZnO	Sinkkioksidi
SnO ₂	Tinadioksidi
CuInS ₂	Kupari indiumsulfidi

Tiivistelmä

Aurinkokennotutkimus on tulevaisuuden kannalta tärkeä tutkimusala, joka keskittyy nykyään pääasiassa löytämään halpoja ja ympäristöystävällisiä materiaaleja ja rakenteita, joilla voidaan saavuttaa kohtuullinen hyötysuhde.

Tässä tutkielmassa tarkastelen aurinkokennoteknologian kehitystä keskittyen aurinkokennoissa käytettyihin materiaaleihin ja rakenteisiin. Käyn aluksi läpi aurinkokennojen yleisen toimintaperiaatteen ja historian. Siirryn sitten tarkastelemaan eri aurinkokennotyyppejä. Käsittelen ensiksi ensimmäisen ja toisen sukupolven aurinkokennoja ja niissä käytettyjä materiaaleja. Sitten siirryn kolmannen sukupolven vielä kehitteillä oleviin aurinkokennotyyppeihin.

1 Johdanto

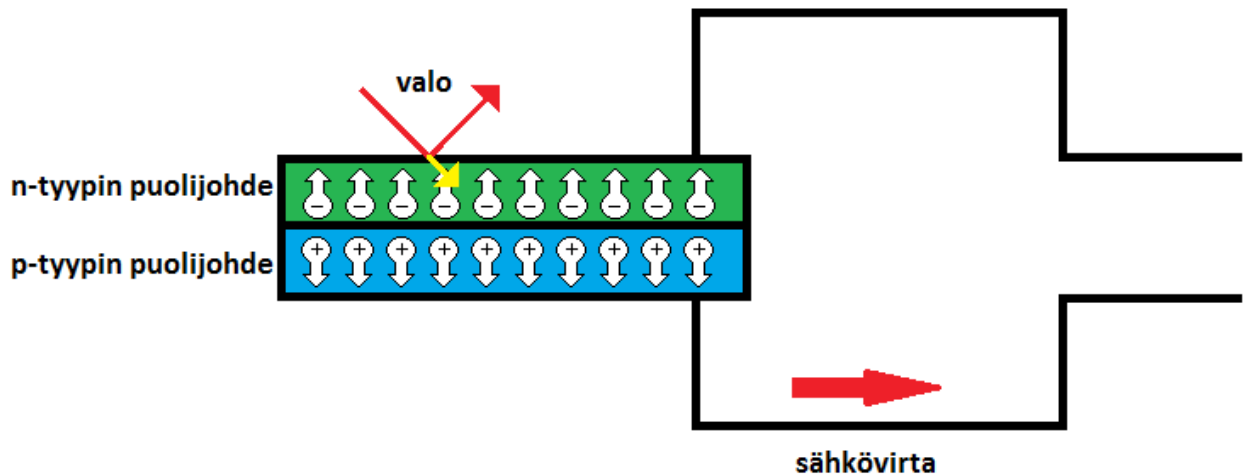
Uusiutuvat energianlähteet kuten aurinkovoima ovat tärkeitä ihmiskunnan tulevaisuuden kannalta ihmiskunnan energian kulutuksen jatkuvasti kasvaessa ja fossiilisten polttoaineiden ehtyessä. Lisäksi toisin kuin muita uusiutuvia energianlähteitä aurinkovoimaa voidaan helposti hyödyntää myös avaruudessa. Aurinkokennojen ainoa toimintavaatimus on, että paikalla on tarpeeksi valoa. Tämän ansiosta niillä on runsaasti käyttökohteita ja teknologian kehittyessä käytännöllisten käyttökohteiden määrä vain kasvaa.

Tässä tutkielmassa tarkastelen aurinkokennoteknologian kehitystä yleisluontoisesti keskittyen pääasiassa niissä käytettyihin materiaaleihin ja rakenteisiin. Käyn ensin läpi nopeasti aurinkokennojen yleisen toimintaperiaatteen ja historian. Siirryn sitten tarkastelemaan eri aurinkokennotyyppejä.

Aurinkokennot ovat päässeet jo lähelle teoreettista hyötysuhderajaansa, mutta tämä ei tarkoita, ettei niissä olisi vielä paljon tutkittavaa ja kehitysvaraa. Olen vakuuttunut, että aurinkokennot tulevat kehittymään vielä paljon tästä eteenpäin.

2 Aurinkokennojen toimintaperiaate

Suurin osa aurinkokennoista toimii samalla periaatteella. Aurinkokenno sisältää pn-liitoksen eli p-tyypin ja n-tyypin puolijohteen välisen rajapinnan. Kun kenno absorboi valoa syntyy elektroni-
aukkopareja, jotka riippuen kennon tyypistä joko jakaantuvat itsestään tai erotellaan pn-liitoksen rajapinnalla. Näiden elektronien ja aukkojen liike saa aikaan sähkövirran. Kuvassa 1. näemme tyypillisen aurinkokennon rakenteen. [1]



Kuva 1. Aurinkokennon rakenne

P-tyypin ja n-tyypin puolijohdeet ovat puolijohdeita, joihin on lisätty pieniä määriä halutunlaisia epäpuhtauksia. Tätä kutsutaan puolijohdeiden dopppaukseksi ja sillä pystytään vaikuttamaan puolijohteen sähköisiin ominaisuuksiin. N-tyypin puolijohdeisiin on lisätty atomeja, joilla on enemmän valenssielektroneja kuin itse puolijohdemateriaalin atomeilla. Näillä lisätyillä atomeilla on täten elektroneja, jotka eivät osallistu puolijohteen sidosrakenteeseen. Nämä elektronit ovat vain heikosti kiinni omissa atomeissaan, joten ne pääsevät helposti liikkumaan ympäri puolijohdettä. P-tyypin puolijohdeissa lisätyissä atomeissa on puolestaan vähemmän valenssielektroneja. Tällöin puolijohteen sidosrakenteeseen jää jokaisen lisätyn atomin jollekin naapurille pariton elektroni, joka ei pystynyt muodostamaan sidosta. Pariton elektroni voi kuitenkin muodostaa sidoksen kaappaamalla elektronin viereiseltä sidokselta, jolloin puuttuvan sidoksen paikka puolijohdeessa on vaihtunut. Tämä prosessi ei vaadi kovin paljon energiaa, joten nämä aukot pääsevät helposti liikkumaan ympäri puolijohdettä. Doppatut puolijohdeet ovat yhä kokonaisuudessaan sähköisesti neutraaleja. [2]

Jotta elektroni-aukkopari voisi muodostua, täytyy kennoon tulevan fotonin energian olla vähintään puolijohteen kaistarakoenergian(E_g) suuruinen. Jos fotonilla on tarpeeksi energiaa, se kykenee virittämään elektronin valenssivyöltä johtavuusvyölle jolloin elektroni-aukkopari muodostuu. Näitä elektroni-aukkopareja kutsutaan myös eksitoneiksi.

Fotonin energia riippuu sen aallonpituudesta.

$$E (J) = h\nu = hc / \lambda$$

$$E (eV) = 1240 / \lambda (nm)$$

Kaistarakoenergia puolestaan on riippuvainen puolijohdemateriaalista. Siihen vaikuttavat myös puolijohteen rakenne ja sen sisältämät epäpuhtaudet. Taulukossa 1 näkyy aurinkokennoissa käytettyjen puolijohdeiden kaistarakoenergioita. [3]

Tauluko 1. Puolijohdemateriaalien kaistarakoenergioita [4]

Puolijohdemateriaali	Kaistarakoenergia(eV)
c-Si	1,12
GaAs	1,42
InP	1,35
a-Si	~1,8
CdTe	1,45 – 1,5
CuInSe ₂ (CIS)	0,96 – 1,04

Kaistarakoenergia vaikuttaa myös aurinkokennon virtaan ja jännitteeseen. Mitä suurempi kaistarakoenergia, sitä suurempi on saatu avoimen piirin jännite ja pienempi saatu oikosulkuvirta, kun taas kaistarakoenergian pienentyessä saatu avoimen piirin jännite myös vähenee ja saatu oikosulkuvirta kasvaa. [3]

Aurinkokennon hyötysuhde saadaan jakamalla kennon tuottama sähköteho siihen osuvan valon teholla. Hyötysuhteen teoreettiset rajat saadaan puolijohdemateriaalien ominaisuuksista ja etenkin kaistarakoenergiasta. Kaistarakoenergia määrittää kuinka suuri osa aurinkokennoon osuvasta valosta voidaan hyödyntää. Valoa, jonka aallonpituus on liian pitkä ei voida hyödyntää ollenkaan, koska sillä ei ole tarpeeksi energiaa elektronien virittämiseen valenssivyöltä johtavuusvyölle, kun taas lyhyt aallonpituuksisen valon tapauksessa kaistarakoenergian ylimenevä energia muuttuu lämmöksi ja menee hukkaan. Epäoptimaalisen aallonpituuden jälkeen suurin syy energiahäviöihin on jännitehäviö eli kaistarakoenergian ja avoimen piirin jännitteen välinen ero. Muita syitä energiahäviöihin ovat valon heijastuminen ja elektroni-aukkoparien rekombinaatio.

Heijastushäviöitä voidaan vähentää heijastamattomalla pinnoitteella ja rekombinaatiota voidaan vähentää passivoimalla kennon pinnat ja rakenneviat. Taulukossa 2 näkyy aurinkokennoteknologian hyötysuhteen teoreettinen yläraja. [3,4]

Tauluko 2. Aurinkokennojen teoreettiset hyötysuhterajat kennon alikennojen määrän mukaan yhden auringon valossa maan ilmakehän ulkopuolella ja valon teoreettisella maksimikeskityksellä. [4]

Valon keskitysmäärä	Kennojen määrä aurinkokennossa	Maksimi hyötysuhde (%)
1 aurinko	1	31,0
	2	49,9
	3	49,3
	∞	68,2
46,3 aurinkoa (teoreettinen maksimi)	1	40,8
	2	55,7
	3	63,9
	∞	86,8

Taulukon 2 lähteessä on nähtävästi virhe ja 1 auringon valossa 2 kennoisen aurinkokennon maksimi hyötysuhteen pitäisi uskoakseni olla ~42 %.

3 Aurinkokennojen historia

Valosähköisen ilmiön tutkimus lähti liikkeelle vuonna 1839, kun Edmond Becquerel havaitsi sähkövirran valon osuessa vesiliuokseen upotettuun platinaelektrodiin, joka oli päällystetty hopeakloridilla tai hopeabromidilla. Vuonna 1873 Willoughby Smith ja Joseph May huomasivat valon vaikuttavan kiinteän seleenin sähkönjohtavuuteen, ja tämä johti valosähköisen ilmiön löytämiseen täysin kiinteässä systeemissä Williams G. Adamsin ja Richard E. Dayn toimesta 1877, kun he tutkivat seleenitankoa, johon oli kytketty platinaliittimet. [1,2]

Ensimmäinen käytännöllinen valosähköinen laite oli Charles Frittsin vuonna 1883 rakentama valomittari, joka koostui ohuesta seleenikerroksesta rautaisen pohjalaatan ja läpikuultavan kultapäällysteen välissä. Näiden varhaisten aurinkokennojen hyötysuhde oli ~1 %. Tämän teknologian pohjalta kehitetyt valomittarit päätyivät kaupalliseen levitykseen Saksassa 1930 luvulla. [1,2]

Vuonna 1930 Bruno Lange ennusti aurinkokennojen saavuttavan hyötysuhteen, joka mahdollistaa sähköntuotannon valosähköisen ilmiön avulla. Hän uskoi, että tämä saavutettaisiin valitsemalla soveliaampi liitinmateriaali ja saatavilla olevalle valon aallonpituusalueelle soveltuvampi puolijohdemateriaali. Metallipuolijohdeliitoksella, johon nämä aikaiset aurinkokennot perustuivat, on huono hyötysuhde, johtuen sen verrattaen suuresta pimeästä virrasta, joka heikentää valosähköistä reaktiota. [1]

Russel Ohlin havainnot puhdistetun piisulan kiteytymisestä vuonna 1941 aloittivat yksikiteisten piikennojen kehityksen ja loivat pohjan nykyaikaisille aurinkokennoille. Tässä piin kiteytymisessä syntyi pn-liitos epäpuhtauksien epätasaisen jakautumisen seurauksena. Vuoteen 1953 mennessä nämä yksikiteiset piikennot olivat saavuttaneet 6 % hyötysuhteen. [1,5]

4 Perinteiset aurinkokennot

Tarkastellaan ensin perinteisiä aurinkokennorakenteita ja niissä käytettyjä materiaaleja. Näihin kuuluu ensimmäisen sukupolven yksiliitoksiset ja moniliitoksiset aurinkokennot ja toisen sukupolven ohutkalvoaurinkokennot. [4]

Yksi aurinkokennojen erikoistyyppi on myös keskittävä aurinkokenno, jossa auringonvaloa keskitetään aurinkokennoon peilien ja linssien avulla. Täten ne tehostavat aurinkokennojen toimintaa lisäämällä saatavilla olevaa valoa. Keskittävät aurinkokennot luokitellaan sen mukaan moneenko aurinkoon verrattavan valomäärän ne keskittävät aurinkokennoon. Niillä voidaan saavuttaa jopa 1000 aurinkoon verrattava valomäärä. Tässä tapauksessa auringolla tarkoitetaan maanpinnalle asti tulevan auringonvalon määrää. Valon keskittämiseen käytettävät optiset rakenteet nostavat aurinkokennosysteemin hintaa ja monimutkaisuutta varsinkin, jos tarkoituksena on keskittää suuria määriä auringonvaloa. [1]

Yksiliitoksinen aurinkokenno on yleisin aurinkokennotyyppi ja sisältää nimensä mukaisesti yhden pn-liitoksen. Moniliitoksisessa aurinkokennossa puolestaan on useita aurinkokennoja ja täten pn-liitoksia peräkkäin. Kennot on kytketty toisiinsa tunneliliitoksilla, jotka pyrkivät minimoimaan kennojen välissä tapahtuvan valo- ja sähköhäviön. Moniliitoksisia aurinkokennoja alettiin tutkimaan jo vuonna 1955, mutta hyvän hyötysuhteen omaavia moniliitosaurinkokennoja onnistuttiin valmistamaan vasta 1980 luvulla, johtuen hyvälaatuisten tunneliliitoksien valmistamisen vaikeudesta. Moniliitoksisilla aurinkokennoilla on aurinkokennotyypeistä paras hyötysuhde, mutta niiden korkea hinta rajoittaa niiden käyttöä. Niitä käytetään enimmäkseen aurinkovoiman lähteenä avaruudessa ja keskittämissä aurinkokennoissa. [1]

Moniliitoksisissa aurinkokennoissa kennot ovat kaistarakoenergian mukaisessa järjestyksessä siten että suurimman kaistarakoenergian omaava kenno on ulommaisena. Tällöin jokainen kenno soveltuu absorboimaan valoa, jonka energia ei riittänyt elektronien virittämiseen ulompana olevissa kennoissa. Tämän ansiosta moniliitoksiset aurinkokennot, voivat hyödyntää valoa tehokkaasti yksiliitoksisia aurinkokennoja laajemmalla aallonpituusalueella. Moniliitoksisissa aurinkokennoissa pyritään siihen, että jokainen aurinkokenno absorboisi yhtä suuren osan sisään tulevasta valosta täten tuottaen yhtä suuren virran. Jos alikennojen virrat eroavat toisistaan, koko kennon virta rajoittuu pienimpään alikennoista saatuun virtaan. Moniliitoksisen aurinkokennon jännite on summa

sen alikennojen jännitteistä. [1,4]

Ohutkalvoaurinkokennoissa on nimensä mukaisesti puolijohdemateriaalia vain erittäin ohut kerros ja täten ne ovat materiaalihintansa puolesta tavallisia aurinkokennoja huomattavasti halvempia. Puolijohdekerroksen paksuus on pienempi kuin 0,1 mm, kun taas tavallisissa kennoissa puolijohdekerroksen paksuus on noin 0,3 mm. Alun perin niitä alettiin tutkimaan hyvän tehopainosuhteen takia avaruuskäyttöön. Ohutkalvoaurinkokennoissa valolla on puolijohdekerroksen ohuuden takia vähemmän mahdollisuuksia virittää elektroni kuin saman materiaalin tavallisilla kennoilla, mikä johtaa huonompaan hyötysuhteeseen ohutkalvoaurinkokennoissa. Tämän takia ohutkalvoaurinkokennot hyötyvät paljon valoa vangitsevista rakenteista, joissa valo jää kimpoilemaan kennon sisään tarjoten lisää viritymismahdollisuuksia. Valon vangitseminen tehdään puolijohdekerroksen pinnanmuodoilla, jotka heijastavat valoa takaisin kennon sisälle, kun se on poistumassa kennosta. [1,4]

Myös pn-liitoksia joihin aurinkokennojen toiminta perustuu, on useamman tyyppisiä. Yksinkertaisin ja yleisin pn-liitos on pn-homoliitos, jossa p- ja n-tyyppin puolijohteet ovat samaa materiaalia. Homoliitos voidaan muodostaa lähes virheettömänä yksikiteisessä rakenteessa tai monikiteisen rakenteen yhdessä kiteessä, mutta puolijohteita kuten Si, GaAs ja InP jotka voidaan douppata sekä p-että n-tyyppin puolijohteeksi ei ole monta. [1]

Pin-liitoksessa p- ja n-tyyppin puolijohteiden välissä on kerros samaa puolijohdetta douppaamattomana. Pin-liitoksen nimen i tulee tämän kerroksen englanninkielisestä nimestä intrinsic layer. Tämä liitoksen jatkeena oleva i-kerros venyttää liitoksen sähkökentän kattamaan myös i-kerroksen. Suurin osa valon absorptiosta tapahtuu tässä i-kerroksessa ja i-kerroksen yli jatkettu sähkökenttä tehostaa varauksenkuljettajien liikettä sen alueella. Pin-liitoksessa douppatut puolijohdekerrokset ovat hyvin ohuita. [1,4]

Heteroliitos on kahden eri puolijohteen välinen liitos. Heteroliitoksissa voidaan hyödyntää puolijohteita, joilla on hyvät valon absorptio- ja varauksenkuljettajaominaisuudet, mutta ne soveltuvat vain p- tai n-tyyppin douppaukseen. Eroavuudet puolijohteiden hilarakenteissa johtavat helposti vikoihin liitoksen rakenteessa ja täten heikentävät liitoksen toimintaa. Myös puolijohteiden energiavöiden yhteensopimattomuus voi heikentää liitoksen toimintaa. [1]

Haudatussa homoliitoksessa homoliitoksen päällä on kerros hyvin sähköä johtavaa kennon muita

puolijohdteita suuremman kaistarakoenergian omaavaa puolijohdetta ikkunakerroksena. Tämä ikkunakerros toimii varauksen kerääjänä kennon yläosassa, passivoi kennon pinnan ja vähentää elektroni-aukkoparien rekombinaatiota kennon yläosassa. [1]

4.1 Pii

Pii on yleisin aurinkokennoissa käytetty puolijohde. Sen hyviä ominaisuuksia ovat yleisyys, pii on maankuoren yleisin kiinteä alkuaine, ja se että pii ei ole myrkyllistä tai ympäristölle haitallista. [6]

4.1.1 Yksikiteinen pii

Yksikiteisten piikentöjen hyötysuhde kasvoi nopeasti ja vuonna 1958 oli saavutettu jo 14 % hyötysuhde. 18 % hyötysuhde ylitettiin vuonna 1985 ja 24,8 % hyötysuhde saavutettiin vuonna 1998. Näiden kentöjen hinta on myös pudonnut 1970 luvun \$20/Wp:stä \$10/Wp:hen 1980 luvulla ja \$5/Wp:hen 1990 luvun alkupuolella. Yksikiteisen piin pääasiallinen valmistustapa on Czochralski-menetelmä, jossa yksikiteinen piitanko kasvatetaan monikiteisestä piisulasta otetusta siemenkiteestä. Pitkän aikaa yksikiteinen pii valmistettiin elektroniikkateollisuuden huonolaatuisesta ja monikiteisestä hukkapiistä. Vuonna 2011 yksikiteisen piin hinta alkoi romahtamaan johtuen markkinoiden ylitarjonnasta, mikä vähensi kiinnostusta muihin aurinkokennomateriaaleihin. [1,5]

4.1.2 Monikiteinen pii

Monikiteisillä piikentöillä on niiden epäsäännöllisen rakenteen takia yksikiteisiä piikentöjä huonompi teho, mutta niiden valmistus on halvempaa. Ne valmistetaan piisulasta kovettamalla se poistaen siitä lämpö tasaisesti pohjasta alkaen. Monikiteiset piikentöt alkoivat leviämään 1981 ja niiden käyttö on lisääntynyt niiden hyötysuhteen kasvaessa aikaisempien mallien 10 % hyötysuhteesta nykyaikaisempien mallien 18 % hyötysuhteeseen. [1,4]

4.1.3 Amorfinen pii ja mikrokiteinen pii

Aurinkokennoissa käytetty amorfinen pii ja mikrokiteinen pii on käsitelty siten että ne sisältävät 5-15 % vetyatomeja. Tämä hydraus on tärkeää puolijohdteiden toiminnan kannalta, koska vetyatomit passivoivat suuren osan niiden rakennevioista. 1980 luvulla a-Si:H-ohutkalvoaurinkokennot saavuttivat ~4 % hyötysuhteen ja niitä alettiin käyttää pienissä sähkölaitteissa kuten kelloissa ja laskimissa. Yksiliitoksiset amorfiset piikentöt ovat saavuttaneet jo vakaan 8 % hyötysuhteen. [1,4]

Amorfisten piiaurinkokennojen teho laskee pitkäaikaisen valolle altistumisen seurauksena. Tämä tunnetaan Staebler-Wronski-vaikutuksena ja se johtuu pitkäaikaisen valolle altistumisen aiheuttamista rakennevioloista puolijohdemateriaalissa. Staebler-Wronski-vaikutus tasaantuu ajan kanssa ja aurinkokennojen teho vakaantuu alemmalle tasolle. Tämän takia puhutaan amorfisten piiaurinkokennojen vakaasta hyötysuhteesta. Staebler-Wronski-vaikutusta ei osata estää, mutta sen vaikutuksia voidaan minimoida pitämällä aurinkokennot hyvin ohuina ja se voidaan kumota usean tunnin 150°C lämpökäsittelyllä. Staebler-Wronski-vaikutus on huomattavasti heikompi mikrokiteisestä piistä tehdyissä aurinkokennoissa, mutta johtuen mikrokiteisen piin huokoisesta rakenteesta sen sisään voi päästä happea ja muita epäpuhtauksia, jotka heikentävät kennon toimintaa. Epäpuhtauksien vaikutukset voidaan kumota usean tunnin yli 130°C lämpökäsittelyllä tyhjiössä tai inertissä kaasussa ja niitä voidaan ehkäistä kapseloimalla aurinkokenno. [4]

Amorfisissa piiaurinkokennoissa käytetään pin-rakennetta johtuen doupatun amorfisen piin huonosta laadusta ja varauksenkuljettajien huonosta liikkuvuudesta amorfisessa piissä.

Doupattu mikrokiteinen pii on huomattavasti parempilaatuista kuin doupattu amorfisen pii, mutta mikrokiteisissä piikennoissa käytetään silti pin-rakennetta huonon varauksenkuljettajien liikkuvuuden takia. [4]

Amorfista piitä käytetään myös moniliitoksissa aurinkokennoissa, kuten kaksiliitoksissa a-Si:H/a-Si:H-kennoissa, kolmiliitoksissa a-Si:H/a-Si,Ge:H/a-Si,Ge:H-kennoissa ja mikrokiteisissä amorfisissa aurinkokennoissa. Kaksiliitoksissa a-Si:H/a-Si:H-kennoissa liitoksilla on melkein sama kaistarakoenergia. Rakenteen hyöty verrattuna yhteen paksumpaan kennoon on siinä, että Staebler-Wronski-vaikutus on heikompi ohuissa kennoissa. Tällaiset kennot ylittivät 7 % vakaan hyötysuhteen vuoteen 2008 mennessä. Kolmiliitoksiset a-Si:H/a-Si,Ge:H/a-Si,Ge:H-kennot perustuvat kaistarakoenergian säätelyyn amorfisen piin ja germaniumin seoksella, tällaiset kennot saavuttivat 13 % vakaan hyötysuhteen vuoteen 1997 mennessä. Niitä rajoittaa germaniumin korkea hinta ja harvinaisuus verrattuna piihin ja se että jos germaniumpitoisuus ylittää 40 %, materiaaliin muodostuu suuri määrä rakennevikoja. Mikrokiteinen amorfisen aurinkokenno $\mu\text{c-Si:H/a-Si:H}$ on erittäin lupaava kennorakenne johtuen sen lähes ideaalista kaistarakoenergiaparista 1,1eV/1,75eV. Ne saavuttivat vuonna 2010 vakaan 11,9 % hyötysuhteen 0,5 EUR/Wp hinta-tehosuhteella. [1,4]

4.2 Galliumarsenidi

Galliumarsenidi ja sen sukuiset materiaalit soveltuvat hyvin aurinkokennoihin ominaisuuksiensa ansiosta. Niillä on korkea varauksenkuljettajien liikkuvuus, ja ne absorboivat valoa tehokkaasti selvärajaisella alueella. Lisäksi ne voidaan doupata sekä n- että p-tyyppin puolijohteiksi ja niistä voidaan valmistaa seoksia rikkomatta hilayhteensopivuutta, joka mahdollistaa kaistarakoenergian säätelyn. Tämän kaistarakoenergian muokkaamisen ansiosta ne soveltuvat hyvin moniliitoksisiin aurinkokennoihin, joissa se mahdollistaa alikennojen kaistarakoenergian optimoinnin seosrakenteen muokkaamisen kautta. Galliumarsenidia käytetäänkin suuressa osassa moniliitoksisia aurinkokennoja. [1]

Aikaisilla galliumarsenidikennoilla oli huono hyötysuhde johtuen galliumarsenidin suuresta pinta rekombinaatio nopeudesta. Haudattu homoliitosrakenne ratkaisi tämän ongelman ja vuonna 1977 AlGaAs/p-GaAs/n-GaAs-kenno saavutti ajallensa ennätysmäisen hyötysuhteen 21,9 %. 30 % hyötysuhteraja ylitettiin vuonna 1997 InGaP/GaAs-kaksiliitosaurinkokennolla ja vuonna 2006 saavutettiin 40,7 % hyötysuhde GaInP/GaInAs/Ge 240 auringon valon keskittävässä kolmiliitosaurinkokennossa. [1]

4.3 Kadmiumsulfidi

p-Cu₂S/n-CdS-kenno oli ensimmäisiä kaupalliseen käyttöön kehitettyjä ohutkalvoaurinkokennoja. Se herätti kiinnostusta halvan hintansa ja sen sisältämän pn-liitoksen muodostamisen helppouden takia. Nämä kennot onnistuivat ylittämään 10 % hyötysuhteen vuonna 1985, mutta ne osoittautuivat epävakaisiksi ja ohmisten liitosten luonnissa kuparisulfidiin oli vakavia ongelmia. Kadmiumsulfidia käytetään useissa heteroliitosaurinkokennoissa, mutta sille etsitään korvaajaa johtuen sen myrkyllisyydestä. [1,4]

4.4 Kadmiumtelluridi

Kadmiumtelluridi voidaan doupata sekä n- että p-tyyppin puolijohteeksi, mutta siitä on vaikea tehdä tehokas homoliitosaurinkokenno johtuen sen suuresta pintarekombinaationopeudesta. Ratkaisu tähän ongelmaan oli heteroliitos kadmiumsulfidin kanssa. Nämä n-CdS/p-CdTe-kennot saavuttivat 8 % hyötysuhteen 1970 luvulla. D. Bonnet ja H. Rabenhorst onnistuivat valmistamaan ensimmäisen täysin ohutkalvo n-CdS/p-CdTe-aurinkokennon vuonna 1972. Kadmiumtelluridikennot olivat ensimmäiset aurinkokennot, jotka alittivat US\$1/Wp hinnan vuonna 2013, mutta sen jälkeen piin hinnan romahtaminen on heikentänyt niiden asemaa. Kadmiumtelluridikennot saavuttivat 18,7 %

hyötysuhteen vuonna 2013. Kadmiumtelluridin kaistarakoenergia on 1.44 eV, joka on melkein ideaalinen auringonvalolle maan pinnalla. Lisäksi kadmiumin ja telluridin välisen vahvan sidoksen (sidosenergia 5,75 eV) ansiosta kadmiumtelluridilla on erittäin suuri kemiallinen vakaus ja lämpövakaus. Kadmiumtelluridin huonoja puolia ovat telluurin harvinaisuus ja se että telluuri on myrkyllistä ja kadmium on erittäin myrkyllistä, mutta on osoitettu, että moduulien lasiin kapselointi estää kadmiumtelluridin pääsyn luontoon. [1,4]

4.5 CIS/CIGS

Kupari indiumdiselenidi (CIS), kupari indium gallium diselenidi (CIGS) ja niiden sukuiset materiaalit soveltuvat hyvin ohutkalvoaurinkokennoihin hyvän absorptiotehonsa ansiosta. Ne kattavat suuren kaistarakoenergia-alueen 1,04 eV:sta 2,4eV:iin, mikä kattaa lähes kokonaan näkyvän valon aallonpituusalueen. Ne voidaan doupata sekä n- että p-tyypin puolijohteiksi, mutta ne toimivat paremmin p-tyypin puolijohteina heteroliitoksessa n-CdS-pintakerroksen kanssa. CIGS-kennot ovat hyvin vakaita pitkäaikaisessa käytössä. Tosin ne ovat herkkiä kosteudelle, jonka takia ne täytyy sinetöidä hyvin ja kapseloida. Ne soveltuvat hyvin avaruuskäyttöön niiden erittäin hyvän säteilykestävyyden ansiosta. Yksikiteiset n-CdS/p-CuInSe₂-kennot saavuttivat 12 % hyötysuhteen vuonna 1974 ja ohutkalvo n-CdS/p-CuInSe₂-kennot saavuttivat 5 % hyötysuhteen vuonna 1976. Vuonna 2013 oli saavutettu jo 20,8 % hyötysuhde. [1,4]

5 Modernit aurinkokennot

Tarkastellaan seuraavaksi kolmannen sukupolven aurinkokennoja. Ne ovat uusia kehityksen alla olevia aurinkokennoteknologioita. Niiden kehityksen taustalla on pyrkimys tehdä halpoja ja ympäristöystävällisiä aurinkokennoja uusiin käyttötarkoituksiin. Yleinen ongelma niillä on se, että ympäristöystävällisten materiaalien käyttö johtaa usein huonompaan hyötysuhteeseen kuin ympäristölle myrkyllisten aineiden käyttö. [4]

5.1 Väriaineherkistetyt aurinkokennot

Väriaineherkistetyt aurinkokennot (DSSC), jotka tunnetaan myös Grätzel-kennoina ovat herättäneet kiinnostusta halpana ja ympäristöystävällisenä vaihtoehtona perinteisille aurinkokennoille.

Niitä tutkittiin jo 1977, mutta ensimmäinen tehokas väriaineherkistetty aurinkokenno valmistettiin vasta vuonna 1991 Brian O'Reganin ja Michael Grätzelin toimesta. Niillä on eri toimintaperiaate kuin perinteisillä aurinkokennoilla. Niiden toiminta perustuu fotosynteesin imitointiin. Niissä on valoa absorboiva orgaaninen väriainekerros ohuen nanokiteisen puolijohdekerroksen päällä. Tämä puolijohde on kytketty anodiin ja väriaine puolestaan on yhteydessä pelkistimeen, joka on kytketty katodiin. Kun väriaine absorboi fotonin, vapautunut elektroni välittyy puolijohteen kautta anodille ja väriaine pelkistyy välittäen aukon pelkistäjälle, josta se puolestaan välittyy katodille. [7]

Väriaineherkistettyjen aurinkokennojen hyviä puolia ovat tehon nousu lämpötilan noustessa, hyvä säteilyn sietokyky ja kyky absorboida valoa riippumatta siitä missä kulmassa se osuu kennoon. Lisäksi ne ovat halpoja valmistaa, johtuen niiden materiaalien yleisyydestä ja hyvästä saatavuudesta. Niillä on myös hyvä hinta-pinta-alasuhde. Toisin kuin perinteisissä aurinkokennoissa, missä kaikki tapahtuu puolijohdeiden pn-liitoksessa DSSC-kennoissa eri prosessit kuten valon absorptio, varauksen syntyminen ja siirto on hajautettu eri komponentteihin ja täten niitä voidaan optimoida toisistaan riippumatta. [7]

Yksiliitoksisten väriaineherkistettyjen aurinkokennojen on arvioitu kykenevän noin 20 % hyötysuhteeseen, mutta sen saavuttamiseen on vielä pitkä matka. Alkuperäisen kennon 7 % hyötysuhteesta päästiin nopeasti 10 % hyötysuhteeseen pienikokoisissa kennoissa 1990 luvun loppuun mennessä, mutta kasvu on ollut hidasta siitä eteenpäin. 11,9 % hyötysuhde saavutettiin vuonna 2012, mutta samaan aikaan isompien kennojen hyötysuhde oli vielä alle 5 %. Suurilla väriaineherkistetyillä aurinkokennoilla on huomattavasti huonompi hyötysuhde, kuin saman

rakenteen omaavilla pienemmillä kennoilla. Pääsyy suurien kennojen huonoon hyötysuhteeseen on se, että väriaineherkistettyjen aurinkokennojen aktiivinen alue on vain pieni osa koko kennosta. Vuonna 2014 suurin saavutettu aktiivinen alue oli 48 % koko kennosta. Väriaineherkistettyjen aurinkokennojen tehoa rajoittaa myös niiden epävakaus, joka on seurausta kennoissa käytetyistä materiaaleista ja niiden välisistä vuorovaikutuksista. [7]

Tutkimus on keskittynyt etsimään materiaaleja, jotka parantaisivat kennojen hyötysuhdetta, vakautta ja elinikää, mutta edistys on ollut hidasta. Väriaineherkistetyt aurinkokennot ovat jo päässeet kaupalliseen levitykseen pienissä sähkölaitteissa ja kannettavissa laitteissa. Tulevaisuuden käyttökohteita niille ovat aurinkokennoikkunat, rakennusten aurinkokennoseinät ja -katot. Kunhan ne saavuttaisivat yli 10 % vakaan hyötysuhteen niillä olisi hyvä asema kilpailla ohutkalvoaurinkokennojen kanssa. [7]

Yleisin väriaineherkistetyissä aurinkokennoissa käytetty puolijohde on TiO_2 se soveltuu kennoihin valokemiallisen vakautensa ansiosta. Suuren kaistarakoenergiansa vuoksi se kykenee itse absorboimaan vain UV-valoa, mutta tämä ei ole ongelma koska valon absorptio tapahtuu väriaineessa eikä puolijohdeessa. TiO_2 :sen lisäksi materiaaleja kuten sinkki-, tina-, magnesium- ja alumiinioksidit on kokeiltu. Myös puolijohdeseoksia ja dopattuja puolijohdeita on tutkittu. Varsinkin Nb_2O_5 on tuottanut hyötysuhteen kannalta lupaavia tuloksia. [7]

Käytetyn väriaineen täytyy kyetä absorboimaan valoa laajalta aallonpituusalueelta tehokkaasti, kiinnittyä puolijohdeeseen pintaan hyvin ja sillä olisi hyvä olla pitkä vakaa toiminta-aika. Monia eri väriainetyyppejä kuten metallikompleksit, porfyriinit, ftalosyaniinit ja orgaaniset väriaineet on testattu. On havaittu, että metallikompleksipohjaiset väriaineet ja etenkin ruteniumkompleksipohjaiset väriaineet soveltuvat erittäin hyvin DSSC-aurinkokennoihin. Niillä on verrattaen hyvä vakaus ja hyvä hyötysuhde normaaliolosuhteissa, mutta niillä on myös huonoja ominaisuuksia kuten niiden vaikea puhdistaminen, valmistamisen kalleus, harvinaisuus ja verrattaen huono valon absorptioteho. Tämän takia luonnollisia ja synteettisiä orgaanisia väriaineita on alettu tutkimaan enemmän. [7]

5.2 Perovskiittiaurinkokennot

Perovskiittit ovat materiaaleja, jotka omaavat kemiallisen kaavan ABX_3 ja kuutiollisen rakenteen. Niiden nimi tulee CaTiO_3 mineraalista. Kaavassa ABX_3 A voi olla orgaaninen tai epäorgaaninen

kationi ja B epäorgaaninen kationi. Jos A on orgaaninen yhdiste niin kyseessä on orgaanis-epäorgaaninen hybridiperovskiitti. Perovskiteilla on useita kiinnostavia ominaisuuksia, kuten massiivinen magneettiresistanssi, ferrosähköisyys ja suprajohtavuus. [8]

Ensimmäiset perovskittiaurinkokennot kehitettiin vuonna 2009 ja niiden hyötysuhde oli vain 3,8 %, mutta jo vuoteen 2013 mennessä oli saavutettu 15 % hyötysuhde hybridiperovskiitti $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbX}_3$ pohjaisilla aurinkokennoilla. $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbX}_3$ -rakenteessa X voi olla I, Cl tai Br. Ensimmäiset kennot pohjautuivat väriaineherkistettyjen aurinkokennojen rakenteeseen, jossa hybridiyhdisteet kerrostetaan mesohuokoisen TiO_2 -rakenteen päälle. Uudemmat perovskittiaurinkokennot käyttävät yksinkertaisempaa rakennetta, jossa perovskittikerros on ohuen TiO_2 -kalvon ja orgaanisen aukkoja johtavan kerroksen välissä. Tämän rakenteen kanssa voidaan saavuttaa yli 10 % hyötysuhde, kunhan kerrostuksessa saavutetaan yhtenäinen ja tiivis morfologia. [8]

Perovskittiaurinkokennojen valmistaminen on halpaa ja helppoa. Hybridiperovskiitti voidaan kerrostaa suoraan liuoksesta. Niillä on hyvä hyötysuhde verrattuna muihin uusiin kehitteillä oleviin aurinkokennoteknologioihin. Lisäksi niillä on suuri varauksenkuljettajien liikkuvuus. Perovskittiaurinkokennoissa on havaittu yli 1,000 nm diffuusiopituuksia verrattuna muiden aurinkokennorakenteiden korkeimmillaan 10 nm diffuusiopituuksiin. [8]

Perovskittiaurinkokennoissa on vielä paljon tutkittavaa. Esimerkiksi niiden vakaudesta ei ole vielä tarkkaa tietoa. Toinen kiinnostava kysymys on se, voidaanko vastaavaa toimintakykyä saavuttaa perovskiteilla jotka eivät sisällä lyijyä, joka vähentäisi kennojen myrkyllisyyttä ja vaikutusta ympäristöön. [8]

5.3 Orgaaniset aurinkokennot

Orgaaniset aurinkokennot pohjautuvat heteroliitokseen kahden orgaanisen puolijohteen välillä.

Orgaanisten puolijohteiden käyttö mahdollistaa halvan valmistusprosessin. Ne saavuttivat 8,3 % hyötysuhteen vuoteen 2013 mennessä. Orgaanisiin puolijohteisiin kuuluvat konjugoituneet polymeerit kuten polytiofeenit, polyfenyleenivinyleenit (PPV:t), polyfluoreenit, ja polykarbatsolit, jotka voivat kuljettaa varausta sisällään ja epäpolymeeriset materiaalit kuten funktionalisoituneet fullereenit, ftalosyaniinit, peryleenijohdannaiset, ja pentaseeni, joissa varaus liikkuu molekyyliverkossa. [4]

Orgaaniset puolijohdeet eroavat epäorgaanisista puolijohdeista siinä, että niiden eksitonit ovat vahvemmin paikallistettuja ja niiden elektroni-aukkoparien välinen vetovoima on vahvempi.

Orgaanisissa puolijohdeissa elektroni-aukkoparin välinen sidosenergia on noin 0,3-0,5 eV, joka on huomattavasti suurempi kuin epäorgaanisten puolijohdeiden elektroni-aukkoparien noin 0,01 eV sidosenergia. Tämän takia ympäristön lämpöenergia, joka on noin 0,025 eV normaalissa huoneenlämmössä, ei riitä erottamaan orgaanisten puolijohdeiden elektroni-aukkopareja vapaiksi varauksenkuljettajiksi. Elektroni-aukkoparit erotetaan toisistaan heteroliitoksessa, jossa suuremman alimman vapaan energiatilan omaava puolijohde toimii elektronin luovuttajana ja toinen puolijohde elektronin vastaanottajana. Elektronin luovuttajalta virittynyt elektroni voi siirtyä elektronin vastaanottajan matalimmalle vapaalle energiatilalle, jolloin tilojen välinen energiaero riittää elektroni-aukkoparin erottamiseen. [4]

Elektroni-aukkoparien liike on hidasta ja rajoittunutta molekyylisestä molekyyliin hyppimistä. Tämä varauksenkuljettajien liikkumistapa on hyvin lämpötila-altis johtaen koko kennon tehon riippuvuuteen lämpötilasta. Lisäksi tämä liikkumistapa johtaa heikkoon varauksenkuljettajien liikkuvuuteen. Elektroni-aukkoparien huono liikkuvuus ja toisistaan erottuminen vain heteroliitosrajapinnalla rajoittaa puolijohdekerroksien paksuutta ja täten valon absorptiotehoa. Valon absorptiotehoa voidaan parantaa heteroliitosrajapinnan muotoilulla. Sahalaitainen rakenne kasvattaa rajapinnan pinta-alaa ja aluetta jolta elektroni-aukkopari kerkeää rajapinnalle ennen kuin pari rekombinoituu. Toinen ratkaisu tähän ongelmaan on bulkkiheteroliitosrakenne, jossa kahden eri puolijohdekerroksen sijasta on yksi kerros puolijohdeiden seosta. Tämä rakenne mahdollista paksun puolijohdekerroksen ja täten tehokkaamman valon absorption, mutta sen epämääräinen ja sekava rakenne johtaa suurempaan määrään elektroni-aukkoparien rekombinaatioita. Valon absorptiota voidaan tehostaa myös valoa vangitsevilla rakenteilla. [4]

Orgaanisten aurinkokennojen huonoja puolia ovat niiden vielä huono hyötysuhde ja niiden epävakaus. Pääsyy orgaanisten aurinkokennojen epävakauteen on niiden reagointi veden ja hapen kanssa. Kennojen kapselointi pidentää niiden käyttöikä, mutta happea pääsee silti kennon sisään sen valmistuksen yhteydessä. Kennot voitaisiin valmistaa hapettomassa tilassa, mutta se nostaisi niiden valmistuskustannuksia huomattavasti. Lisäksi optimaalinen bulkkiheteroliitosrakenne on usein epävakaa ja täten sen hyötyteho laskee ajan myötä. Orgaanisten aurinkokennojen käyttöikä on muutamia tuhansia tunteja, joka rajoittaa niiden käytön pieniin kuluttajalaitteisiin. [4]

5.4 Kvanttipisteaurinkokennot

Kvanttipisteaurinkokennot perustuvat kvanttimekaanisia ominaisuuksia omaaviin puolijohdenanokiteisiin. Nämä kvanttipisteet ovat kvasinolla ulotteisia nanohiukkasia, joissa varauksenkuljettajien liike on rajoitettua kaikissa kolmessa ulottuvuudessa. Niillä on diskreetti vahvasti koosta riippuva energiaspektri. Puolijohdenanokiteiden kokoluokka on ångströmeistä muutamiin kymmeneen nanometriin. Alaraja tulee kiderakenteen vakaudesta ja yläraja siitä, että suuremmat nanokiteet alkavat romahtamaan, kun niiden läpi kulkee varaus. Klassisessa puolijohdeteoriassa elektroni-aukkoparin välinen etäisyys on Bohrin eksitonin säde, joka voidaan laskea elektroni-aukkoparin välisen Coulombin vuorovaikutuksen vahvuudesta. Kvanttipisteissä, jotka itsessään ovat r_{Bor} :in kanssa samaa kokoluokkaa tai pienempiä nanokiteiden mittasuhteet rajoittavat elektroni-aukkoparin välistä etäisyyttä, muuttamatta niiden välistä Coulombin vuorovaikutusta. Täten kun kvanttipisteen koko pienenee elektroni-aukkoparin muodostamiseen tarvittava energia kasvaa. Tämä mahdollistaa kvanttipistemateriaalien kaistarakoenergian säätelyn. Kvanttipisteaurinkokennot ovat lupaava teknologia, mutta huolta niissä aiheuttaa käytettyjen materiaalien myrkyllisyys ja myrkyttömällä vaihtoehdoilla on puolestaan paljon pienempi hyötysuhde. [9]

Tutkimuksen alla on kolme erilaista kvanttipisteaurinkokennotyyppiä. Kvanttipistekerrosaurinkokennot, kvanttipisteherkistetyt aurinkokennot ja polymeeri-quanttipiste hybridiaurinkokennot.

5.4.1 Kvanttipistekerrosaurinkokennot

Kvanttipistekerrosaurinkokennot perustuvat perinteisten aurinkokennojen rakenteeseen. Niissä on kerros hyvässä järjestyksessä olevia nanokiteitä, jotka ovat niin lähellä toisiaan, että niiden välille muodostuu vahva sähköinen liitos mahdollistaen elektronien liikkeen materiaalissa. Kunhan nanokiteiden kokojakauma on tarpeeksi pieni, muodostuu tyhjennysalue ja tästä syntyvä sisäinen sähkökenttä erottelee muodostuvat elektroni-aukkoparit. Elektronit siirtyvät metalliliitokseen ja aukot ohmiseen liitokseen. Ensimmäiset kokeilut tällä rakenteella tehtiin vuonna 2005 ja vuonna 2011 oli saavutettu jo 7 % hyötysuhde. Näillä kennoilla on yksinkertainen rakenne, mutta rakenne johtaa myös suureen määrään elektroni-aukkoparien rekombinaatioita ja kennon avoimen piirin jännite ei saavuta teoreettisia arvoja johtuen virheistä nanokide-metallirajapinnalla. Näitä rajoitteita on pyritty kiertämään erityyppisten nanokiteiden heteroliitosaurinkokennoilla. Kvanttipisteet soveltuvatkin kaistarakoenergian säätelyänsä ansiosta hyvin heteroliitosaurinkokennoihin ja

moniliitosaurinkokennoihin. Moniliitoksiset kvanttipistekennot saavuttivat 4,2 % hyötysuhteen vuoteen 2011 mennessä. Lisäksi kvanttipiste-orgaaniset hybridiaurinkokennot saavuttivat 5,2 % hyötysuhteen vuoteen 2011 mennessä. Niissä käytetään nanohiukkasina materiaaleja kuten PbS, TiO₂, Bi₂S₃ ja PbSe. [9]

5.4.2 Kvanttipisteherkistetyt aurinkokennot

Kvanttipisteherkistetyt aurinkokennot ovat väriaineherkistettyjä aurinkokennoja, joissa väriaine on korvattu nanokiteillä. Kvanttipisteherkistetyt aurinkokennot ylittivät 5 % hyötysuhteen vuonna 2012. Hyviä puolia väriaineherkistettyihin kennoihin verrattuna ovat kaistarakoenergian säätelymahdollisuus, useamman elektroni-aukkoparin muodostuminen yhdestä fotonista, parempi vakaus pitkäaikaisessa käytössä, parempi hapen ja veden sietokyky ja helpompi heteroliitoksen muodostus kiinteään aukon kuljettajaan. Lisäksi tavalla, jolla nanokiteet kerrostetaan puolijohteen päälle, on suuri vaikutus aurinkokennon toimintaan ja käytettyjä kerrostustapoja on useita kuten SILAR (Peräkkäinen ionikerrosabsorptio ja -reaktio), kerrostus kemiallisessa kylvyssä, kolloidisten nanokiteiden kerrostus linkittäjien avulla ja EPD (Elektroforeesinen kerrostaminen). Niissä käytetään nanohiukkasina materiaaleja kuten CdS, PbS, Bi₂S₃, Sb₂S₃, CdSe ja InP. Pohjapuolijohteen puolestaan käytetään materiaaleja kuten TiO₂, ZnO ja SnO₂. [9]

5.4.3 Polymeeri-kvanttipiste hybridiaurinkokennot

Polymeeri-kvanttipiste hybridiaurinkokennot perustuvat orgaanisten aurinkokennojen bulkkiheteroliitosrakenteeseen, jossa toinen orgaaninen puolijohde on korvattu nanokiteillä. Verrattuna orgaanisiin aurinkokennoihin niillä on hyvä absorptioteho ja valon johtavuus. Niiden kaistarakoenergiaa ja varauksenkuljettajien ominaisuuksia voidaan säädellä. Liukenevien materiaalien käyttö mahdollistaa halvan valmistamisen suurella mittakaavalla. Polymeeri-kvanttipiste hybridiaurinkokennoilla on vielä huono hyötysuhde 4,1 % vuonna 2011 verrattuna täysin orgaanisiin aurinkokennoihin, mutta ne voivat todennäköisesti saavuttaa korkean hyötysuhteen tulevaisuudessa sillä ne yhdistelevät hyviä ominaisuuksia eri orgaanisista ja epäorgaanisista aurinkokennoista. Niissä käytetään nanokiteinä materiaaleja kuten CdSe, CdS, CdTe, CuInS₂ ja PbS. [9]

6 Yhteenveto

Aurinkokennot ovat jo saavuttaneet melkein teoreettisen maksimihyötysuhteensa, mutta näiden lähes maksimihyötysuhteen omaavien aurinkokennojen käyttö on lähes aina epäkäytännöllistä niiden korkeiden valmistuskustannuksien takia. Aurinkokennot ovatkin löytäneet menestystä vähän virtaa vaativissa sähkölaitteissa, joihin ohutkalvoaurinkokennot ja monet kolmannen sukupolven aurinkokennot soveltuvat huonosta hyötysuhteesta huolimatta kiitos niiden halvan hinnan.

Aurinkokennotutkimus keskittyykin nykyään löytämään halpoja ja ympäristöystävällisiä rakenteita ja materiaaleja, joilla on kohtuullinen hyötysuhde. Yksi aurinkokennoteknologian nykyhetken ongelmista onkin ympäristölle vaarallisten materiaalien korvaaminen ympäristöystävällisillä vaihtoehdoilla siten, että aurinkokennojen hyötysuhde pysyisi edes lähellä alkuperäistä. Toinen tutkimussuunta on aurinkokennojen kehittäminen erityiskäyttötarkoituksiin kuten avaruuskäyttöön, johon kalliit korkean hyötysuhteen aurinkokennot soveltuvat hyvin. Avaruuskäytössä niiden hinta on suhteessa muuhun laitteistoon pieni, ja ne pystyvät voimakkaamman auringonvalon ansiosta toimimaan entistä tehokkaammin. Toisaalta avaruuskäyttö tuo mukanaan omat ongelmansa kuten säteilyvauriot ja lämmön kertymisen aurinkokennoon.

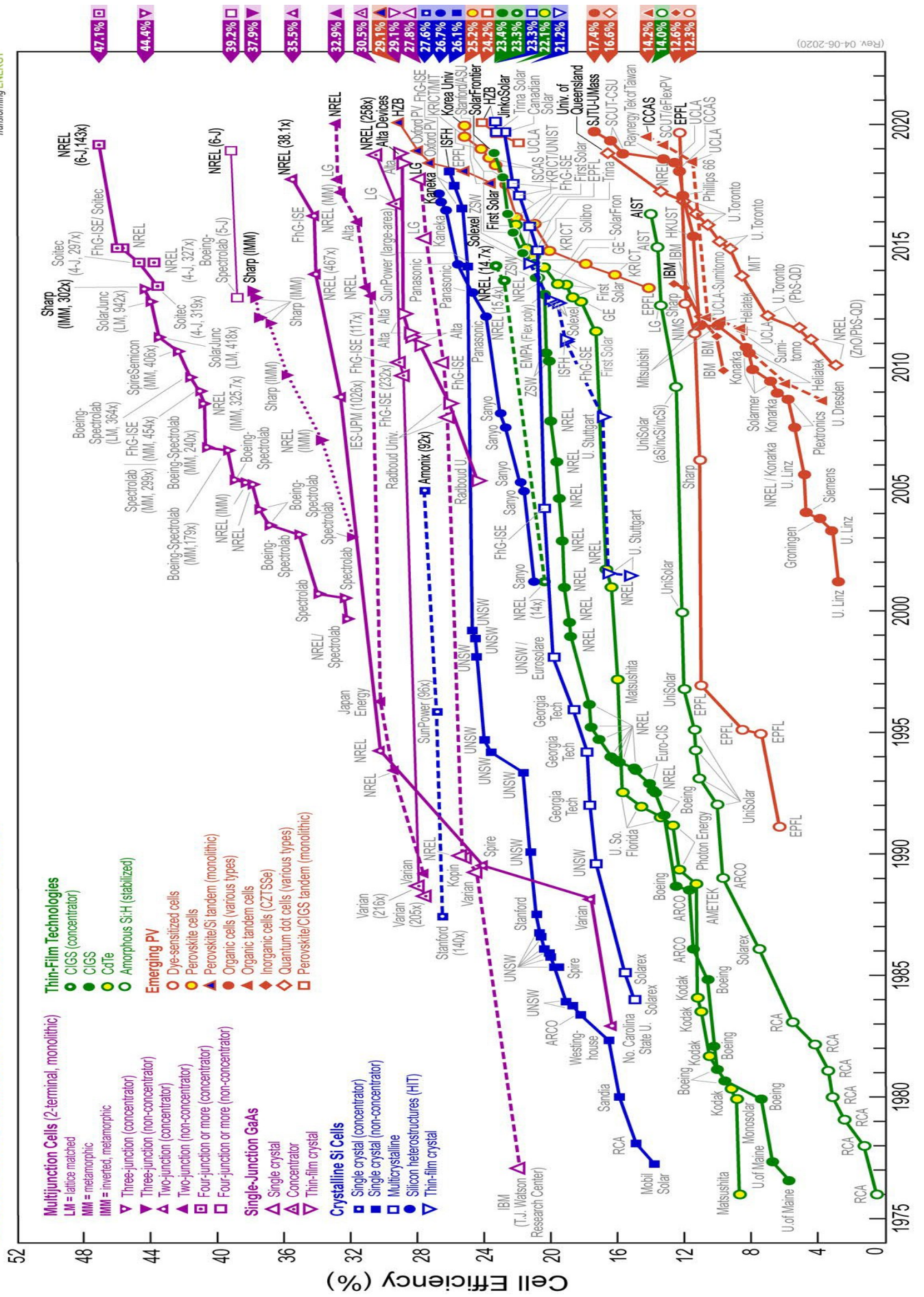
Kuten näemme taulukosta 3, eri aurinkokennotyyppien saavuttamat hyötysuhteet vaihtelevat suuresti, mutta niillä kaikilla on omat käyttökohteensa. Piipohjaiset aurinkokennot ovat yhä yleisimpiä käytössä olevia aurinkokennoja niiden hyvän hinta-laatusuhteen takia. GaAs-pohjaisia yksiliitosaurinkokennoja ja moniliitosaurinkokennoja käytetään suurta tehoa vaativissa käyttökohteissa. Ohutkalvoaurinkokennoja puolestaan käytetään, kun pienikin teho riittää tai halutaan mahdollisimman halpaa aurinkovoimaa. Kolmannen sukupolven aurinkokennoilla on jonkin verran käyttöä, mutta ne tarvitsevat vielä lisää kehitystä päästäkseen yleiseen käyttöön.

Taulukko 3. Eri aurinkokennotyyppien saavuttamat hyötysuhteet vuonna 2016. [3]

Aurinkokennotyyppi	Hyötysuhde (%)
c-Si	25
m-Si	20,8
a-Si	13,4
Ohutkalvo m-Si	12,3
Ohutkalvo CIGS (CuInGaSe ₂)	21,0
Ohutkalvo CdTe	21,5
Valoa keskittävä moniliitosaurinkokenno	46,0
GaAs	29,1
InP	22,1
Moniliitosaurinkokenno	38,9
Väriaineherkistetty aurinkokenno	11,9
Orgaaninen aurinkokenno	11,7
Perovskiittiaurinkokenno	22,1

Kuvassa 2 näkyy kuinka eri aurinkokennotyypit ovat kehittyneet vuosien kuluessa. Siitä nähdään helposti kuinka kolmannen sukupolven aurinkokennojen hyötysuhteet ovat perovskiittiaurinkokennoja lukuun ottamatta vielä jäljessä ohutkalvoaurinkokennoista.

Best Research-Cell Efficiencies



(Rev. 04-06-2020)

Kuva 2. Aurinkokennotyyppien hyötysuhteiden kehitys vuosien aikana

Lähteet

- [1] Mary D Archer and Martin Andrew Green (2014) *Clean Electricity From Photovoltaics (2nd Edition)*. Imperial College Press.
- [2] Lukas Schmidt-Mende and Jonas Weickert (2016) *Organic and Hybrid Solar Cells : An Introduction*. De Gruyter.
- [3] Takeo Oku (2017) *Solar Cells and Energy Materials*. De Gruyter.
- [4] Augustin McEvoy, Luis Castaner, Tom Markvart (2013) *Solar Cells : Materials, Manufacture and Operation (2nd Edition)*. Academic Press.
- [5] Stephen Fonash (2010) *Solar Cell Device Physics (2nd Edition)*. Academic Press.
- [6] Travino, Michael R. (2012) *Dye-sensitized Solar Cells and Solar Cell Performance*. Nova Science Publishers, Inc.
- [7] Parisi, M. L., Maranghi, S., & Basosi, R. (2014) *The evolution of the dye sensitized solar cells from Grätzel prototype to up-scaled solar applications: A life cycle assessment approach*. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 39 124-138
- [8] Antonietta Loi, M., & Hummelen, J. C. (2013) *Hybrid solar cells: Perovskites under the Sun*. *Nature Materials*, 12(12), 1087-1089
- [9] Albero, J., Clifford, J. N., & Palomares, E. (2014) *Quantum dot based molecular solar cells*. *Coordination Chemistry Reviews*, 263-264 53-64

Kuvat:

Kuva 1. Kalle Rantamaula

Kuva 2 NREL <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>

This plot is courtesy of the National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO.