



Universiteit Utrecht

Faculty of Geosciences

Derde generatie zonnecellen

De voordelen van het gebruik van nanotechnologie in zonnecellen

Bachelor thesis Milieunatuurwetenschappen

GEO 3-2138

7,5 EC

Auteur: Maties Mouwen, 3491544

Begeleiding: J.C. Meerman

2-7-2012

Inhoud

| | |
|--|----|
| Abstract | 2 |
| 1. Inleiding & vraagstelling | 2 |
| 2. Methodologie | 3 |
| 3. Een controverse in de literatuur | 3 |
| 4. Absorptie | 4 |
| 4.1 Reflectie | 5 |
| 4.2 Transmissie | 8 |
| 5. Het ontstaan van excitonen | 9 |
| 6. Het scheiden van de ladingen | 11 |
| 7. Het verzamelen van ladingsdragers | 12 |
| 8. Discussie | 14 |
| 9. Conclusie | 16 |
| Bronvermelding | 17 |
| Appendix 1 | 21 |



A SEMI-CONDUCTOR

Abstract

In this (state of the art) review the merits of nanotechnology for solar cell applications are studied. The results confirm that nanotechnology will most likely decrease the production costs of solar cells. Moreover the results also indicate that efficiency benefits may be expected resulting from reduced reflection, enhanced absorption, collective resonances, diffraction effects, increased density of states, leaky mode resonances (LMR's), hot-carrier collection, up-conversion, down-conversion multiple exciton generation (MEG), the fine-tuning of band gaps and radial p-n junctions. Due to nanotechnology, solar cells with efficiencies ranging up to 70% are at hand.

1. Inleiding & vraagstelling

Als gevolg van de schade die fossiele brandstoffen aanrichten aan het milieu komt er steeds meer aandacht voor zonnecellen (Wu et al., 2009; Ginley et al., 2008). Zonne-energie is namelijk een van de meest overvloedig aanwezige vormen van hernieuwbare energie (Fan et al., 2009b). Toch wordt nog maar 0,1% van de wereldwijd gegenereerde elektriciteit door middel van zonnecellen opgewekt (Frankl et al. 2010). Dit komt door "the high cost of power from solar photovoltaic", aldus Borenstein (2008, p.1). Om een substantiële bijdrage te kunnen leveren aan de stroomvoorziening moeten zonnecellen dus nog veel grootschaliger worden ingezet en dat zal alleen gebeuren als ze nog voordeliger worden ten opzichte van andere (fossiele) energiebronnen (Wu et al. 2009). Nanotechnologie kan hieraan bijdragen maar er bestaat enige controverse over op welke manier. "Het enige wat telt is de prijs per kWh", zegt ook J.C. Meerman van het departement van Science, Technology and Society van de Universiteit Utrecht. Dit betekent dat de inzet van nanotechnologie twee dimensies kent: 1) lagere productie kosten en 2) hoger conversie-rendement. Sommige auteurs gaan er van uit dat nanotechnologie tot lagere productiekosten kan leiden en tevens het rendement verhoogt (Fan et al., 2009a; Nozik, 2010a; Tian et al., 2007). In tegenstelling hiermee beweren Tsakalakos et al. (2007) en Peters et al. (2009) echter dat het toepassen van nanotechnologie alleen tot een reductie van de productiekosten zal leiden en niet tot een toename van het rendement zal leiden.

Met als doel de onduidelijkheid die bestaat over het type voordeel dat het toepassen van nanotechnologie in zonnecellen mogelijk kan brengen op te heffen, onderzoeken we deze controverse aan de hand van de volgende onderzoeksvraag:

Welke invloed heeft het toepassen van nanotechnologie in zonnecellen op de efficiëntie van die zonnecellen?

Om de onderzoeksvraag te onderzoeken beginnen we met de methodologie in hoofdstuk 1 en lichten we de genoemde controverse verder toe in hoofdstuk 2. Verder verdelen we voor deze literatuurstudie, in navolging van Garnett et al. (2011), het conversie proces in de zonnecel op in vier

delen: (1) absorptie (hfdst 3), (2) het ontstaan van excitonen (hfdst 4), (3) het scheiden van ladingen (hfdst 5) en (4) het verzamelen van ladingsdragers (hfdst 6). In hoofdstuk 7, 'discussie', vind een kritische beschouwing plaats van de literatuur uit de voorgaande vijf hoofdstukken. Vervolgens wordt in hoofdstuk 8, 'conclusie', de onderzoeksvraag beantwoord.

2. Methodologie

In hoofdstukken 3 t/m 6 bespreken we per hoofdstuk één van vier processen binnen een zonnecel. Daarbij wordt telkens onderzocht of er in de literatuur nanotechnologieën bekend zijn die op dit deel van het conversie-proces kunnen worden toegepast en wat voor invloed dit heeft op het rendement. Voor de compleetheit zal in deze hoofdstukken, waar van toepassing, ook steeds kort worden verklaard of en hoe deze eventuele nanotechnologieën de productieprijis van zonnecellen omlaag kunnen brengen. Waar mogelijk zullen invloeden op het rendement of de prijs kwantitatief worden uitgedrukt. Een preliminaire literatuurstudie laat echter zien dat dergelijke kwantitatieve data bij de meeste (experimentele) onderzoeken nog vrij weinig voorkomt, meestal wordt een verwachting uitgesproken zonder een percentage te noemen.

3. Een controversie in de literatuur

Een kleine greep uit de huidige literatuur over het onderwerp maakt duidelijk dat veel auteurs er van uitgaan dat het gebruik van nanotechnologie in zonnecellen tot lagere kosten kan leiden (Zhu et al., 2009; Garnett et al., 2011; Fan et al., 2009a,b; Tsakalakos et al., 2007; Wu et al., 2009; Tian et al., 2007; Kayes et al., 2005). Over de rendementen die nanotechnologie kan opleveren zijn de meningen echter verdeeld. Op dit moment behalen zonnecellen waarin nanotechnologie is toegepast ongeveer 6% rendement (Fan et al., 2009a). Sommige auteurs claimen dat er efficiëntie verhogingen mogen worden verwacht voor enkele van de (vier) processen binnen een zonnecel, wat waarschijnlijk tot efficiëntere zonnecellen als geheel zal leiden (Polman & Atwater, 2012; Fan et al., 2009a; Nozik, 2010a; Tian et al., 2007). In tegenstelling hiermee beweren Tsakalakos et al. (2007) en Peters et al. (2009) echter dat het toepassen van nanotechnologie niet tot een toename van het totale rendement van de cel zal leiden. Deze auteurs beweren dat het gebruik van nanotechnologie alleen tot lagere productiekosten zal leiden. Volgens Tsakalakos et al. (2007) en Peters et al. (2009) is het theoretische rendement van nanotechnologie zonnecellen vergelijkbaar met het huidige rendement van commerciële 1^e en 2^e generatie zonnecellen (zie tabel 1). Ter onderbouwing hiervan wordt er in deze artikelen verwezen naar een modelering van Kayes et al. uit 2005. Er is dus in het onderzoeksveld verschil van inzicht over de mate waarin nanotechnologie in zonnecellen voordeel voor het rendement kan opleveren.

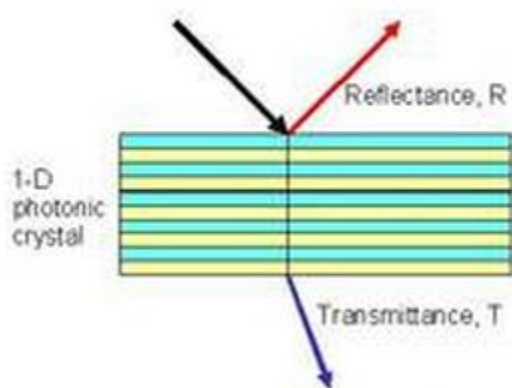
Tabel 1, huidige efficiënties van verschillende commerciële PV modules

| Kristallijn-Silicium cellen (1 ^e generatie) | Dunne film (2 ^e generatie) |
|--|---------------------------------------|
| 13-20% | 6-12% |

Aangepast van: Frankl et al., 2010, waarbij gebruikt gemaakt is van Ginley et al., 2008; Nozik, 2010a en Tsakalakos et al., 2007. Voor wereldrecord efficiënties zie appendix I.

4. Absorptie

In dit hoofdstuk bespreken we de eerste van de vier processen die plaatsvinden in een zonnecel: de absorptie. De absorptie kan weer verder worden onderverdeeld in twee componenten, deze staan weergegeven in figuur 1. De eerste component van belang is, *reflectie*: licht dat wordt gereflecteerd kan niet door de zonnecel geabsorbeerd worden en zal dus niet omgezet worden in elektriciteit. De tweede component van absorptie hangt samen met hoe gemakkelijk het licht in de zonnecel kan voortbewegen en doordringen (*transmissie*). Zoals we in figuur 1 kunnen zien is het bij transmissie juist de zaak om het licht, wanneer het eenmaal in de zonnecel is doorgedrongen, niet meer te laten ontsnappen. Er blijkt een aantal manieren te zijn waarop de absorptie kan worden verbeterd. Hoe nanotechnologie kan bijdragen aan het verminderen van reflectie wordt besproken in de eerste paragraaf van dit hoofdstuk. In de tweede paragraaf van dit hoofdstuk bespreken we nanotechnologieën die transmissie tegen kunnen gaan. Zoals we zullen zien zijn er verschillende mogelijkheden waarop nanotechnologie de transmissie kan verminderen. We zullen de meeste van deze manieren kort noemen en we bespreken één van deze nanotechnologieën in meer detail.

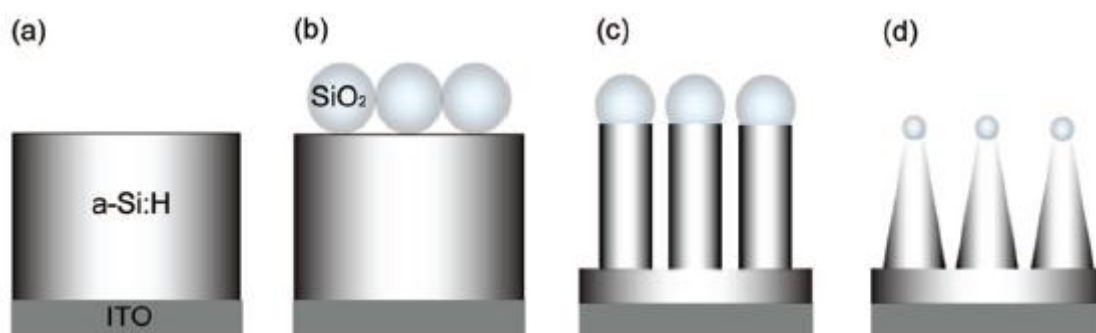


Figuur 1. Schematische weergave van reflectie en transmissie. Bron: Nederlands Onderzoeksplatform Duurzame Energievoorziening (NODE).

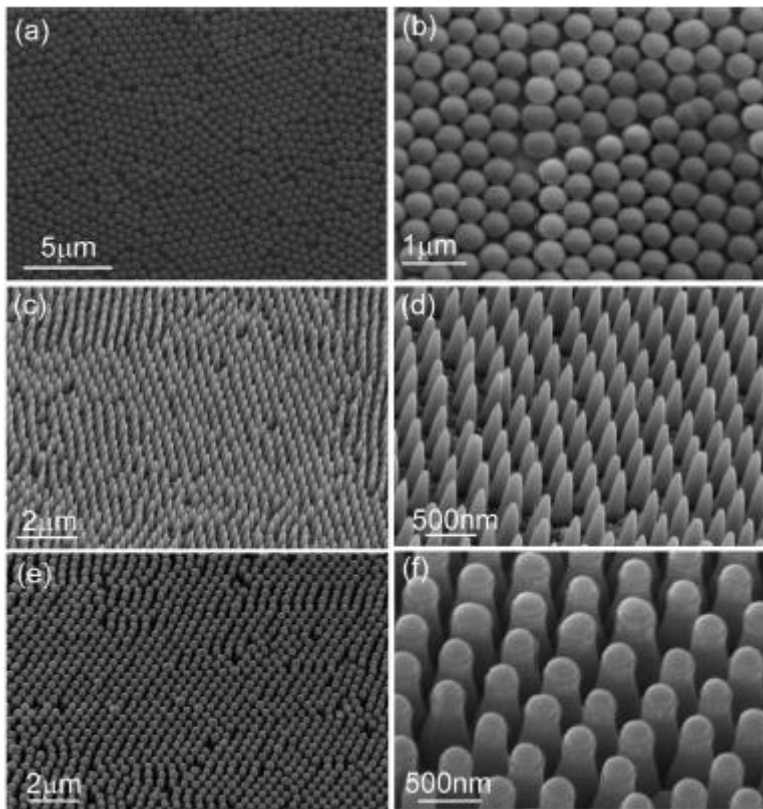
4.1 Reflectie

Reflectie op een oppervlakte treedt op wanneer de brekingsindex van twee media verschilt. Hoe groter het verschil in brekingsindex, hoe meer reflectie (Garnett et al., 2011; Hecht, 1998, hoofdstuk 4). Voor de meeste anorganische halfgeleiders ligt deze reflectie tussen de 10 en 50% van het invallende licht tussen 400nm en 2000nm (Garnett et al., 2011). Zo verliest silicium bijvoorbeeld 30% van het inkomende zonlicht door reflectie (Green, 1992, hoofdstuk 8; Muskens et al., 2008). Dit verlies kan worden verminderd met behulp van een antireflectie-laag. Een gebruikelijke strategie is om een antireflectie-laag aan te brengen met een brekingsindex tussen die van lucht en de halfgeleider. Deze oplossing is helaas alleen maar volledig effectief voor één golflengte bij een loodrechte invalshoek. Er zal dus nog steeds reflectie optreden bij andere invalshoeken en over de rest van het lichtspectrum. Een tweede of derde antireflectie-laag kan helpen maar de ideale coating zou een continu verlopende brekingsindex moeten hebben (Zhu et al., 2009; Garnett et al., 2011; Hecht, 1998, hoofdstuk 4). Met behulp van nanotechnologie kan een dergelijke ideale brekingsindex worden gerealiseerd.

Zhu et al. (2009) van de Stanford University hebben de reflectie van vlakke, nanodraad en nanokegel oppervlakten met elkaar vergeleken. Een schematische weergave van de verschillende door Zhu et al. (2009) onderzochte oppervlakten structuren is te zien in figuur 2. In figuur 3 zijn scanning electron microscoop (SEM) beelden van deze oppervlakten weergegeven.

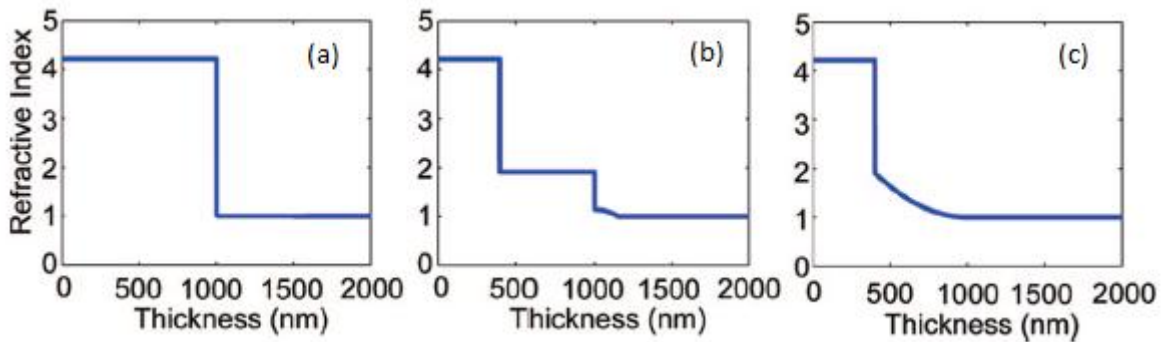


Figuur 2. (a-d) Schematische illustratie van 1 μm dik amorf gehydrogeneerd silicium (a-Si:H) op glassubstraat gecoat met indium-tin-oxide (ITO), een enkele laag silicium nanodeeltjes op a-Si:H dunne film, nanodraad structuur en nanokegel structuur. Bron: Zhu et al., 2009.



Figuur 3. (a,c,e) SEM beelden van een enkele laag silicium Nano-deeltjes, a-Si:H nanokegels en a-Si:H nanodraden respectievelijk. (b,d,f) uitvergrootte SEM beelden van silicium nano-deeltjes, a-Si:H Nanokegels en a-Si:H Nanodraden respectievelijk. Bron: Zhu et al., 2009.

Uit het onderzoek van Zhu et al., (2009) blijkt dat met behulp van nanotechnologie een continu verlopende brekingsindex gecreëerd kan worden (zie figuur 4). In figuur 4a zien we dat de brekingsindex van dunne film direct van 4,23 (a-Si:H) naar 1 (lucht) gaat, dit is wat veel reflectie van licht veroorzaakt (Zhu et al., 2009). Voor nanodraad-structuren is de dichtheid van de nanodraden bepalend voor de brekingsindex maar zal er altijd een tussenliggende brekingsindex-stap zijn die leidt tot een gereduceerde reflectie over een groot bereik van golflengtes en invalshoeken (Zhu et al., 2009; Muskens et al., 2008). Deze tussenliggende brekingsindex-stap zien we in figuur 4b. Uit figuur 4c blijkt dat de nanokegels voor de beste absorptie zorgen. We zien dat de brekingsindex van de nanokegels geleidelijk afneemt, precies datgene dat ideale anti-reflectie mogelijk maakt.



Figuur 4. De effectieve brekingsindex profielen van het raakvlak tussen lucht en (a) a-Si:H dunne film, (b) 600 nm a-Si:H Nanodraden en (c) 600 nm a-Si:H nanokegel structuren. Bron: Zhu et al., 2009.

Ook andere studies rapporteren deze afname in reflectie bij nanostructuren in verschillende materialen (Fan et al., 2009b; Muskens et al., 2008; Tsakalagos et al., 2007; Tang et al., 2008; Fan et al., 2010) en de vele referenties naar deze toepassing van nanotechnologie (onder andere in, Cao et al., 2010b; Fan et al., 2009a; Hu & Chen, 2007; Peng et al., 2005; Zhu et al., 2010a; Peters et al., 2009) tonen dat de juistheid van deze resultaten al om wordt erkend.

In het onderzoek van Zhu et al. (2009) is bij een loodrechte invalshoek van het licht op de zonnecellen bij de nanodraden een absorptie van 85% gemeten tegenover 75% voor een dunne film zonnecel. De gemeten absorptie bij een loodrechte invalshoek van het licht bij nanokegels was zelfs nog hoger, 98,4%. Hoe deze gemeten toename in absorptie het totale rendement precies zal beïnvloeden wordt echter niet gegeven in de hier geciteerde literatuur. Omdat er met een verbeterde absorptie meer licht(energie) beschikbaar komt voor conversie wordt er wel verwacht dat deze toepassing voor een toename van het rendement van de zonnecel zal zorgen (Zhu et al., 2009; Muskens et al., 2008; Tang et al., 2008). Tegelijkertijd wordt verwacht dat deze toepassing de kosten van de zonnecelproductie zal doen afnemen (Garnett et al., 2011; Zhu et al., 2009). Zhu et al. (2009) en Garnett et al. (2011) beargumenteren dat de oorzaak van de verwachte kostenbesparing erin is gelegen dat door verminderde reflectie minder materiaal nodig zal zijn. Hoeveel deze nanotechnologie de productiekosten precies kan doen afnemen wordt in de geciteerde literatuur niet genoemd.

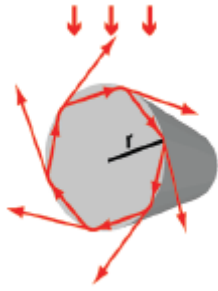
4.2 Transmissie

Zoals we hebben gezien is er uitgebreid onderzoek gedaan naar de antireflectie eigenschappen van nanotechnologie in zonnecellen. De meeste van de artikelen die in 1.1 zijn geciteerd, gaan alleen niet in op transmissieverliezen. Transmissie vormt echter de tweede component van absorptieverliezen. Er blijken vele manieren te zijn waarop de transmissie van een zonnecel kan profiteren van nanotechnologie. Zo biedt de nanostructuur veel ruimte voor quantum dots of kleurstof die de absorptie verbetert (Peters et al., 2009; Garnett et al., 2011) en kan er voordeel voor het rendement worden gerealiseerd door middel van collectieve resonanties, diffractie effecten, een toegenomen dichtheid van 'optical states' (Rodriguez et al., 2012; Adato et al., 2009; Polman et al., 2012; Callahan et al., 2012) en Leaky Mode Resonance (LMR) (Cao et al., 2009, 2010b). Ieder van deze mogelijkheden om het rendement te verbeteren is het bespreken waard. Om de omvang van deze review in te perken zullen wij ons hier alleen richten op het voordeel dat LMR's kunnen opleveren, omdat dit van de hier genoemde een van de simpelste en momenteel best ontwikkelde technologieën lijkt wat onzes inziens grootschalige toepassing ten goede zal komen. Aangezien grootschalige inzet van zonnecellen beoogd wordt verdiend het bespreken van LMR's de voorkeur over minder onderzochte en/of complexere manieren om transmissie tegen te gaan. In de discussie zullen de andere technologieën waar mogelijk uiteraard wel in de overwegingen worden meegenomen.

Cao et al., (2010c) beschrijven LMR's als volgt:

Physically, the enhanced light-matter interaction arises from the coupling of incident light to leaky mode resonances (LMRs) supported by the nanowires; sufficiently large NW's can be thought of as a cylindrical cavity antenna that can trap light in circulating orbits by multiple total internal reflections from the periphery (pp. 2).

Dit betekent dat wanneer de effectieve golflengte van gevangen fotonen een geheel aantal keren in de omtrek van de draad past het licht als het ware wordt opgesloten in de nanodraden. Hierdoor wordt de transmissie verminderd en treedt er dus een verhoogde absorptie op vergeleken met niet nanostructuren (Cao et al., 2010a; Cao et al., 2010b; Cao et al., 2010c; Cao et al., 2009). Een schematische weergave van een LMR is gegeven in figuur 5. Ook blijkt dat absorptie door het gebruik van LMR's minder afhankelijk wordt van de invalshoek van het licht en dat een verbeterde absorptie op deze manier mogelijk is voor zeer veel verschillende materialen (Cao et al., 2010a; Cao et al., 2010b).



Figuur 5. Illustratie van het optische antenne effect in nanodraden. Bron: Cao et al., 2010c.

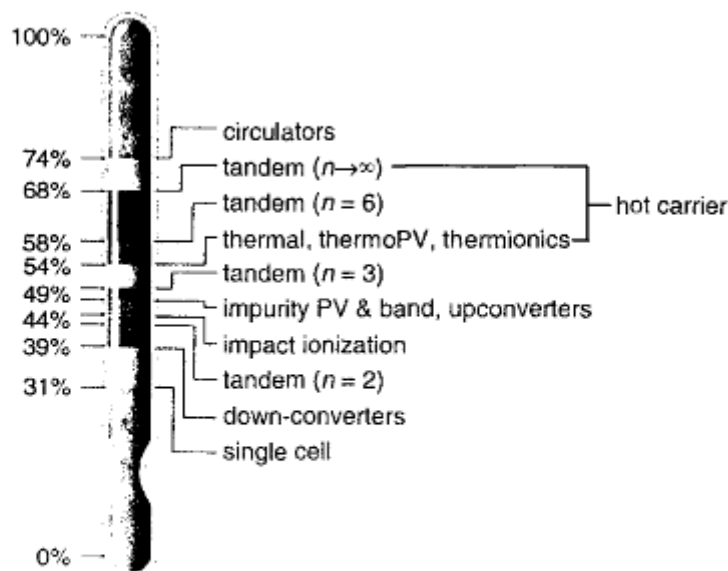
Volgens Cao et al., (2009, 2010b) is met behulp van LMR's een verbetering van het rendement van zonnecellen mogelijk. In hun artikel laten Cao et al. (2009b) een toename van de stroomdichtheid (J_{sc}) van 25% zien vergeleken met dunne-film-zonnecellen. Daarbij zijn veel auteurs positief over de verwachtingen voor het rendement van zonnecellen waarin nanotechnologie op verschillende (gecombineerde) manieren de absorptie verbetert. Bijvoorbeeld door een verminderde reflectie én gebruik makend van LMR's (Fan et al., 2009a; Zhu et al., 2009; Cao et al., 2010b; Peng et al., 2005; Tang et al., 2008; Cao et al., 2009). Hoeveel toename we precies kunnen verwachten voor het totale rendement wordt helaas wederom niet duidelijk uit de hier geciteerde literatuur. Cao et al., (2010a,b) maken ook duidelijk dat de nanodraden die deze LMR effecten benutten op een goedkope manier geproduceerd kunnen worden. Dit komt doordat voor de productie van dergelijke nanostructuren minder materiaal nodig is (Garnett et al., 2011) en doordat dergelijke nanostructuren op goedkope substraten kunnen groeien zoals aluminium (Fan et al., 2009a,b; Tsakalacos et al., 2007). Hoe dit de prijs precies zal beïnvloeden is in de literatuur niet gegeven.

5. Het ontstaan van excitonen

Wanneer het licht geabsorbeerd is in de zonnecel ontstaat er een exciton. Een elektron (negatief geladen) springt met behulp van de energie uit het ingevangen licht van de valentieband naar de conductieband en laat zo een 'gat' (positief geladen) achter in de valentie band. Deze gekoppelde ladingdragers (elektron-gat) wordt een exciton genoemd en de minimale energie die nodig is om een exciton te creëren noemen we de 'band gap'. Het kan zijn dat een ladingsdrager een energie heeft gekregen die groter is dan de band gap. In dit geval verliest de ladingsdrager de energie die hij 'teveel' heeft meegekregen door verschillende interacties met zijn omgeving (Yu & Cardona, 2010, hoofdstuk 5). Het vaakst vindt deze 'carrier relaxation' plaats door middel van 'carrier-phonon coupling' waardoor de energie verloren gaat als warmte (Garnett et al., 2011; Nozik, 2010a).

De makkelijkste manier om dit verlies tegen te gaan is door te zorgen voor een optimaal band gat (band gap) tussen de valentie- en de conductieband. Maar nanotechnologie schept ook mogelijkheden voor andere meer uitdagende toepassingen zoals 'down-conversion', 'multiple

exciton generation (MEG), 'up-conversion' en 'hot-carrier collection' (Ginley et al., 2008). Het wordt gezegd dat er in theorie door 'down-conversion' een rendement gehaald kan worden van 39,63% (Trupke et al., 2002), door MEG rendementen van 42-44% (Beard et al., 2010; Nozik et al., 2010a), door 'up-conversion' van 44-50% (Atre et al., 2012; Henke et al., 2009) en door 'hot carrier collection' een rendement van 65,72% (Ross & Nozik, 1982). Ginley et al. (2008) zeggen zelfs dat met deze technologieën het rendement kan oplopen tot wel 74% (zie figuur 6). Omdat er nog een aanzienlijke hoeveelheid onderzoek vereist is voordat het realiseren van 'down-conversion', 'multiple exciton generation', 'up-conversion' en 'hot-carrier collection' in zicht komt (Polman & Atwater) richten we ons hier verder alleen op de mogelijkheid om met behulp van nanotechnologie de band gap te optimaliseren.



Figuur 6. Enkele opties tot hogere rendementen die mogelijk worden met behulp van nanotechnologie en hun thermodynamische efficiëntie limieten. 'Up-converters' behelst MEG benaderingen. n is het aantal gestapelde cellen. Bron: Ginley et al., 2008

Zoals genoemd is de makkelijkste manier om het verlies van 'carrier relaxation' tegen te gaan zorgen voor een optimale band gap. Om deze band gap optimaal te krijgen wordt veelal gebruik gemaakt van een legering. Door materialen te mengen kan een legering ontstaan met een eigen band gap die dicht bij de optimale waarde ligt (Choi et al., 2012). Sommige materialen die hiervoor gebruikt worden mengen echter uitsluitend met elkaar bij bepaalde concentratie verhoudingen. Dit wordt het mengbaarheid-gat (miscibility gap) genoemd (Garnett et al., 2011). Met behulp van nanodraden kan worden gezorgd dat de structuren van de twee stoffen goed op elkaar aansluiten waardoor dit

mengbaarheid-gat wordt gedicht. Hierdoor komt een veel groter bereik aan band gaps beschikbaar en kan 'carrier relaxation' zoveel mogelijk worden tegen gegaan. Verdere afstemming van de band gap kan tevens worden bepaald met behulp van de diameter van de nanodraden (Wu et al., 2008; Ginley et al., 2008; Huynh et al., 2002). Wanneer de bewegingsvrijheid van excitonen wordt ingeperkt (ruimtelijk of door een elektrisch veld) veranderen de optische en elektronische eigenschappen van het materiaal (Hodes, 2007; Sorkin, 2006). Deze bevinding wordt quantum-insluiting (confinement) genoemd en kan worden gebruikt om de band gap af te stellen (Smith & Nie, 2009; Hodes, 2007; Sorkin, 2006). Een meer gedetailleerde beschrijving van de werking van quantum-insluiting valt buiten het bestek van deze studie, voor ons van belang is de notie dat materiaal eigenschappen veranderen op zeer kleine (micro en nano) schaal omdat er op die schaal sprake is van ruimtelijke insluiting. In hoofdstuk zes krijgen we nogmaals kort met quantum-insluiting maken, dan in verband met het scheiden van de ladingen.

De band gap optimaliseren schept de mogelijkheid tot een hoger rendement (Kuykendall et al., 2007; Garnett et al., 2011). Ook komen er, doordat de band gap met behulp van deze nanotechnieken beter afgestemd kan worden, meer verschillende en goedkopere materialen beschikbaar voor zonnecellen. Het is zeer waarschijnlijk dat dit zal leiden tot lagere productiekosten voor zonnecellen (Garnett et al., 2011). Hoeveel het rendement precies kan toenemen door de band gap met nanotechnologie optimaal af te stemmen en hoeveel de productiekosten hierdoor precies kunnen dalen, wordt niet duidelijk uit de gebruikte literatuur.

6. Het scheiden van de ladingen

Nu een inkomend foton een exciton heeft gevormd moet deze gedissocieerd worden zodat er vrije ladingdragers (free carriers) ontstaan die gescheiden en 'ingezameld' (carrier collection) kunnen worden (Kaindl et al., 2009; Nozik, 2010a). Nanotechnologie verschaft ook voor het dissociëren van excitonen nieuwe mogelijkheden. (Garnett, 2011).

In 1^e en 2^e generatie zonnecellen wordt gebruik gemaakt van doteren¹ om een p-n scheiding (junction) te creëren waarmee elektronen en gaten ruimtelijk van elkaar gescheiden worden (Wu et al., 2008, 2009). Met behulp van nanotechnologie kunnen de ladingen echter ook op andere manieren gescheiden worden. Dit hebben Wu et al. (2008, 2009) met hun onderzoek aangetoond. Uit hun onderzoek blijkt dat de mate van quantum-insluiting (verandering van elektrische eigenschappen) varieert met de diameter van nanodraden. Het verschil in quantum-insluiting

¹ Doteren, opzettelijk in zeer geringe mate verontreinigen met vreemde atomen. Van Dale, elfde, herziene druk. 1984

(verandering van elektrische eigenschappen) in de lengte richting van taps toelopende nanodraden (dus draden met veranderende diameter) zorgt ervoor dat er een elektrostatisch potentiaal over de nanodraad ontstaat. Dit potentiaal verschil kan de tegengestelde ladingen in een exciton uit elkaar drijven zodat er geen sprake meer is van een exciton maar van vrije ladingsdragers die 'ingezameld' kunnen worden (Griffiths, 1998; Wu et al., 2008).

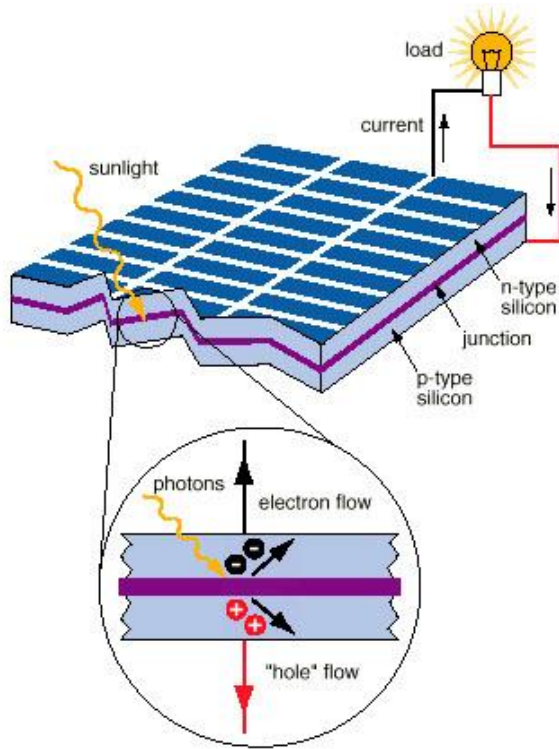
Op deze manier kunnen zonnecellen ontworpen worden die door hun vorm ladingdragers kunnen scheiden. Dit kan het gebruik van vele andere materialen mogelijk maken wat de kosten van zonnecellen aanzienlijk kan drukken (Wu et al., 2009; Garnett et al., 2011). Er wordt nog niet gesproken over eventuele toenames in rendement door het toepassen van deze nanotechniek.

7. Het inzamelen van ladingsdragers

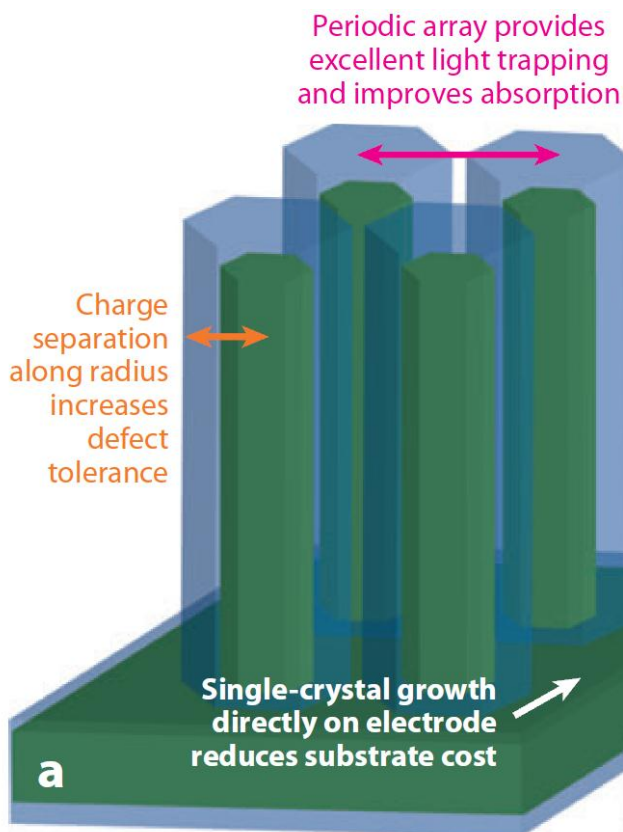
Als de ladingdragers eenmaal gescheiden zijn moeten ze zich verplaatsen naar de contacten zodat ze ingezet kunnen worden voor nuttige arbeid. Het is hierbij voordelig om de afstand die de ladingdragers moeten afleggen om benut te kunnen worden (carrier collection length) zo kort mogelijk te houden. Hoe korter de weg, hoe kleiner de kans dat de ladingdragers een tegenpool (+ of -) ontmoeten en verloren gaan (recombinatie) (Kayes et al., 2005). De afstand die een ladingdrager gemiddeld kan afleggen tussen ontstaan en recombinatie noemen we de 'minority carrier diffusion length' (PV Education). Als de 'carrier collection length' korter wordt in verhouding tot de 'minority carrier diffusion length' treedt er minder recombinatie op wat het rendement van de cel ten goede komt (Kayes et al., 2005).

In 'platte' zonnecellen (zie figuur 7) moet er een afweging worden gemaakt tussen een goede dikte voor de absorptie en een goede dikte in verhouding tot de 'minority carrier diffusion length' van het materiaal. Maak je de zonnecel dikker dan zal de absorptie toenemen (zie figuur 1), maar zullen er meer ladingdragers verloren gaan (recombineren) op weg om benut te kunnen worden. De nanodraden maken een p-n scheiding (junction) in de lengterichting mogelijk (radial p-n junction). Hierdoor wordt de mate van absorptie bepaald door de lengterichting (lengte van de nanodraden), terwijl de 'carrier collection length' nu wordt bepaald door de diameter van de nanodraad (zie figuur 8) (Kayes et al., 2005). Hierdoor kunnen nanodraden een groot voordeel opleveren in deze stap (Tu et al., 2007; Baxter et al., 2005; Huynh et al., 2002; Zhu et al., 2007; Kayes et al., 2005; Law et al., 2005; Garnett et al., 2011; Fan et al., 2009b). Een tweede voordeel van een radiaal grensvlak is dat een dergelijk ontwerp veel minder gevoelig blijkt voor defecten (Garnett et al., 2011). Deze voordelen uiteten zich in een mogelijkheid tot een hoger rendement en in lagere productie kosten voor zonnecellen. Kayes et al. (2005) laten zien dat het rendement voor silicium cellen door dit design kan

toenemen met 1,5 tot 11%. De kosten nemen met dit ontwerp af doordat materialen die kortere 'carrier collection length's hebben, bijvoorbeeld minder puur silicium, ook bruikbaar worden voor de productie van zonnecellen (Kayes et al., 2005; Garnett et al., 2011; Tian et al., 2007).



Figuur 7. Schematische weergave van een 'platte' zonnecel constructie, in tegenstellen tot een niet platte nanodraad constructie (zie figuur 8). Bron: Solar cell.



Figuur 8. (a) Geordende structuur van nanodraden met radiale p-n scheiding. De groene kern van de draden is bijvoorbeeld p materiaal en de blauwe schil n-type materiaal. Bron: Garnett et al., 2011

8. Discussie

In deze review hebben we weinig kwantitatieve data gezien die de bewering uit de inleiding en hoofdstuk 1, dat nanotechnologie de productiekosten van zonnecellen naar beneden zal brengen, ondersteunt. Ondanks het ontbreken van harde cijfers is onzes inziens de verwachting dat nanotechnologie de productiekosten zal doen dalen geoorloofd om de volgende drie redenen die uit deze review naar voren zijn gekomen. (1) o.a. door betere absorptie zal er minder materiaal nodig zijn in de productie om dezelfde rendementen te behalen, (2) door betere afstemming van de band gap en door nieuwe technieken om ladingen te scheiden komt er een groter scala aan goedkopere materialen beschikbaar voor de productie en (3) door kortere 'charge separation lengths' kunnen materialen die minder puur en daardoor goedkoper zijn worden gebruikt. Het zou aan het vertrouwen in deze toepassingen kunnen bijdragen wanneer in vervolg onderzoek van de bovengenoemde technologieën wordt onderzocht hoeveel deze de productiekosten precies kunnen drukken.

Verder is in deze review een controverse in de literatuur aan het licht gekomen. Peters et al. (2009) en Tsakalkos et al. (2007) beweren dat het theoretisch rendement van nano-zonnecellen met een radiale p-n scheiding +/- 15% is terwijl andere beweren dat nanotechnologie veel hogere rendementen mogelijk zal maken. Zo schrijven Polman & Atman (2012) dat met behulp van nanotechnologie rendementen van 50-70% binnen handbereik komen. In figuur x hebben we gezien welke rendementen we kunnen verwachten van enkele concepten die nog zeer veel onderzoek behoeven, deze worden overigens buiten beschouwing gelaten in het artikel van Polman & Atman (2012). Verder hebben we helaas weinig kwantitatieve data gevonden in de literatuur. Vervolg onderzoek zou zich erop kunnen richten dergelijke data te produceren. Voor zover er wel kwantitatieve data werd gepresenteerd beruiste dit in de meeste gevallen op modeleringen. Op basis van deze review verwachten wij dat zij die hogere rendementen verwachten het bij het rechte eind hebben. Hiervoor hebben wij de volgende drie redenen:

Allereerst lijkt een beperking van het theoretisch rendement tot 15% niet waarschijnlijk omdat we geen aanwijzingen hebben gevonden dat een nanotechnologie, ook de radiale p-n scheiding waar Peters et al. (2009) en Tsakalakos et al. (2007) het in hun artikelen specifiek over hebben niet, het rendement enigszins zou beperken. Het is goed denkbaar dat er naar alle mogelijkheden tot verbeteren van het rendement door middel nanotechnologie gekeken is en dat één technologie (de radiale p-n scheiding in dit geval) het theoretisch rendement beperkt. Op basis van deze review lijkt dit voor de p-n scheiding echter niet het geval. Van de radiale p-n scheiding die Peters et al. (2009) en Tsakalakos et al. (2007) bespreken wordt juist een aanzienlijke bijdrage aan een hoger rendement

verwacht. Een theoretisch rendement van 15% voor zonnecellen waar deze nanotechnologie op is toegepast lijkt dus niet waarschijnlijk.

Daarbij hebben Peters et al. (2009) en Tsakalagos et al. (2007) in hun artikelen niet zelf alle mogelijkheden die nanotechnologie biedt onderzocht om hun uitspraken over het theoretisch rendement op te baseren maar baseren ze zich op Kayes et al. (2005). Hierin schuilt een tweede omstandigheid die doet vermoeden dat het onwaarschijnlijk is dat theoretisch rendement van een zonnecel waarin nanotechnologie is toegepast rond de 15% ligt. De modelering van Kayes et al. (2005) die Peters et al. (2009) en Tsakalagos et al. (2007) gebruiken als bron voor hun uitspraak lijkt namelijk ongeschikt om iets te zeggen over het theoretisch rendement van zonnecellen waarin nanotechnologie is toegepast. Kayes et al. (2005) presenteren in hun artikel een model dat hen in staat stelt om de prestatie van een zonnecel met een radiale p-n scheiding te vergelijken met de prestatie van een conventionele 'platte' zonnecel (zie voor een afbeelding van een 'conventionele platte zonnecel' figuur 7). Het lijkt erop dat de rendementen die uit deze modelering komen alleen iets zeggen over het voordeel van een radiale p-n scheiding en dat het model daarom geen goed uitgangspunt vormt om een uitspraak te doen over het theoretisch rendement van de desbetreffende zonnecel.

Ten derde hebben we in deze review een aanzienlijke hoeveelheid nanotechnologieën leren kennen die stuk voor stuk een bijdrage kunnen leveren aan het rendement van zonnecellen. We hebben gezien dat bij 3 van de 4 processen (absorptie, het ontstaan van excitonen en het verzamelen van ladingdragers), waarin we de conversie die in zonnecellen plaatsvind hebben beschreven, nanotechnologieën toegepast kunnen worden waarvan verwacht wordt dat ze de efficiëntie zullen verbeteren. Ook dit doet vermoeden dat het waarschijnlijker is dat nanotechnologie bijdraagt aan zonnecel rendementen van 50-70% dan dat deze het theoretisch rendement tot +/- 15% beperkt. Daarbij lijken enkele van de nanotechnologieën die we in deze review hebben leren kennen gemakkelijk en zonder complicaties op de huidige zonnecellen te kunnen worden toegepast waarmee het rendement van deze cellen in ieder geval iets, al zal het misschien niet tot 70% zijn, verbeterd kan worden. Dit lijkt de meest valide reden om aan te nemen dat er met behulp van nanotechnologie hogere rendementen kunnen worden behaald dan de +/- 15% van Peters et al. (2009) en Tsakalagos et al. (2007).

Verder dient als laatste in deze sectie genoemd te worden, los van de controverse in de literatuur, dat de meeste resultaten uit de geciteerde literatuur gebaseerd zijn op lab-experimenten (en modeleringen). Dit betekent dat de stap naar de commerciële markt voor de desbetreffende technologieën waarschijnlijk nog vrij groot zal zijn.

9. Conclusie

Uit deze literatuur studie komt naar voren dat het gebruik van nanotechnologie in zonnecellen voordeel kan opleveren voor zowel de efficiëntie als de productiekosten van zonnecellen.

We hebben gezien dat er veel is gepubliceerd over een behoorlijk aantal verschillende nanotechnologieën die ieder (afzonderlijk) het rendement kunnen verbeteren. Het lijkt mogelijk dat een opeenstapeling van de efficiëntie voordelen van de verschillende nanotechnologieën die in deze review besproken zijn een flinke (tot +/- 70%) verbetering in het rendement teweeg kunnen brengen. Veel stilliger kunnen we erover zijn dat de efficiëntie van zonnecellen met behulp van nanotechnologieën in ieder geval iets toeneemt. Dit omdat simpele nanotechnologieën, zoals een nanokegel oppervlakte met verminderde reflectie, waarschijnlijk gemakkelijk en zonder complicaties, op de huidige cellen kunnen worden toegepast. Verder hebben we geen aanleiding gevonden om te concluderen dat het theoretisch rendement van nano-zonnecellen niet boven +/- 15% kan uitkomen, zoals door sommige werd beweerd. Hiermee is de controversie waar we in de inleiding kennis mee hebben gemaakt en die we uitgebreider hebben besproken in hoofdstuk 1 opgehelderd en kan de hoofdvraag beantwoord worden. Ter beantwoording van de onderzoeksvraag betekenen bovenstaande bevindingen dat nanotechnologie een redelijke tot zeer positieve invloed zal hebben op het rendement van zonnecellen.

Verder hebben we gezien dat door het toepassen van nanotechnologieën de productiekosten van nano-zonnecellen omlaag kunnen gaan. Dit kan onder andere komen doordat er minder materiaal nodig zal zijn, er met meer verschillende materialen gewerkt kan worden en omdat de eisen voor de kwaliteit en de puurheid van de materialen minder streng worden wanneer nanotechnologieën worden toegepast. Deze review laat hiermee zien dat nanotechnologie kan bijdragen aan beide dimensies, rendement en productiekosten, die van belang zijn om ervoor te zorgen dat zonnecellen grootschalig zullen worden ingezet.

Bronvermelding

- [1] Adato, R., A.A. Yanik, H. Altug, 2009. Observation of plasmon resonance linewidth narrowing in embedded gold nanoparticle arrays. *Plasmonics: Metallic Nanostructures and Their Optical Properties VII* 7394, 73941
- [2] Atre, A.C., A. García-Etxarri, H. Alaeian, J.A. Dionne, 2012. Toward high-efficiency solar upconversion with plasmonic nanostructures. *Journal of Optics* 14, 024008.
- [3] Baxter, J.B., E.S. Aydil, 2005. Nanowire-based dye-sensitized solar cells. *Applied Physics Letters* 86, 053114
- [4] Beard, M.C., A.G. Midgett, M.C. Hanna, J.M. Luther, B.K. Hughes, A.J. Nozik, 2010. Comparing Multiple Exciton Generation in Quantum Dots to Impact Ionization in Bulk Semiconductors: Implications for Enhancement of Solar Energy Conversion. *Nano Letters* 10, pp. 3019-3027.
- [5] Borenstein, S., 2008. *The Market Value and Cost of Solar Photovoltaic Electricity Production*. Center for the study of Energy Markets (CSEM), California.
- [6] Callahan, D.M., J.N. Munday, H.A. Atwater, 2012. Solar Cell Light Trapping beyond the Ray Optic Limit. *Nano Letters* 12, pp. 214-218.
- [7] Cao, L., J.S. White, J. Park, J.A. Schuller, B.M. Clemens, M.L. Brongersma, 2009. Engineering light absorption in semiconductor nanowire devices. *Nature Materials* 8, pp. 643-647.
- [8] Cao, L., P. Fan, E.S. Barnard, A.M. Brown, M.L. Brongersma, 2010a. Tuning the Color of Silicon Nanostructures. *Nano Letters* 10, pp. 2649-2654.
- [9] Cao, L., P. Fan, A.P. Vasudev, J.S. White, Z. Yu, W. Cai, J.A. Schuller, S. Fan, M.L. Brongersma, 2010b. Semiconductor Nanowire Optical Antenna Solar Absorbers. *Nano Letters* 10, pp. 439-445.
- [10] Cao, L., J. Park, P. Fan, B. Clements, M. Brongersma, 2010c. Resonant Germanium Nanoantenna Photodetectors. *Nano Letters* 10, pp. 1229-1233.
- [11] Choi, W.S., F. Chisholm, D.J. Singh, T. Choi, G.E. Jellison, Jr. N. Lee, H.N. Lee, 2012. Wide band gap tunability in complex transition metal oxides by site-specific substitution. *Nature Communications* 3, 689.
- [12] Fan, Z., D.J. Ruebusch, A.A. Rathore, R. Kapadia, O. Ergen, P.W. Leu, A. Javey, 2009a. Challenges and Prospects of Nanopillar-Based Solar Cells. *Nano Research* 2, pp. 829-843.
- [13] Fan, Z., H. Razavi, J. Do, A. Moriwaki, O. Ergen, Y. Chueh, P.W. Leu, J.C. Ho, T. Takahashi, L. A. Reichertz, S. Neale, K. Yu, M. Wu, J.W. Ager, A. Javey, 2009b. Three-dimensional nanopillar-array photovoltaics on low-cost and flexible substrates. *Nature Materials* 8, pp. 648-653.
- [14] Fan, Z., R. Kapadia, P.W. Leu, X. Zhang, Y. Chueh, K. Takei, K. Yu, A. Jamshidi, A. A. Rathore, D.J. Ruebusch, M. Wu, A. Javey, 2010. Ordered Arrays of Dual-Diameter Nanopillars for Maximized Optical Absorption. *Nano Letters* 10, pp. 3823-3827.

- [15] Frankl, P., S. Nowak, S.G. Gutschner & T. Rinke, 2010. **Technology Roadmap. Solar photovoltaic energy**. International Energy Agency (IEA), Paris.
- [16] Garnett, E.C., M.L. Brongersma, Y. Cui, M. D. McGehee, 2011. Nanowire Solar Cells. **Annual Review of Materials Research** 41, pp. 269-95.
- [17] Ginley, D., M.A., Green, and R. Collins, 2008. Solar Energy conversion Toward 1 Terawatt. **MRS Bulletin** 33, pp. 355-364.
- [18] Green, M.A., 1992. **Solar cells. Operating Principles, Technology and System Applications**. The University of New South Wales, Kensington.
- [19] Green, M.A., K. Emery, Y. Hishikawa, W. Warta, E.D. Dunlop, 2012. Solar cell efficiency tables (version 39). **Progress in photovoltaics: Research and Applications** 20, pp. 12-20.
- [20] Griffiths, D.J., 1998. **Introduction to Electrodynamics**. Prentice Hall, New Jersey.
- [21] Hecht, E., 1998. **Optics**. Addison Wesley Longman, New York.
- [22] Henke, B., B. Ahrens, J.A. Johnson, P. Miclea, S. Schweizer, 2009. Upconverting glasses for high-efficiency solar cell. **SPIE Newsroom** , doi: 10.1117/2.1200910.1811
- [23] Hodes, G., 2007. When Small Is Different: Some Recent Advances in Concepts and Applications of Nanoscale Phenomena. **Advanced Materials** 19, pp. 639-655.
- [24] Hu, L., G. Chen, 2007. Analysis of Optical Absorption in Silicon Nanowire Arrays for Photovoltaic Applications. **Nano Letters** 7, pp. 3249-3252.
- [25] Huyn, W.U., J.J. Dittmer, A.P. Alivisatos, 2002. Hybrid Nanorod-Polymer Solar Cells. **Science** 295, pp. 2425-2427.
- [26] Kaindl, R.A., D. Hägele, M.A. Carnahan, D.S. Chemla, 2009. Transient terahertz spectroscopy of excitons and unbound carriers in quasi two-dimensional electron-hole gases. **Physical Review B condensed matter and materials physics** 79, 045320
- [27] Kayes, B. M., H.A. Atwater, N.S. Lewis, 2005. Comparis of the device physics principles of planar and radial p-n junction nanorod solar cells. **Journal of Applied Physics** 97, 114302.
- [28] Kelzenberg, M.D., D.B. Turner-Evans, B.M. Kayes, M.A. Filler, M.C. Putnam, N.S. Lewis, N.H. Atwater, 2008a. **Single-Nanowire Si Solar Cells. California Institute of Technology, Pasadena.**
- [29] Kelzenberg, M.D., D.B. Turner-Evans, B.M. Kayes, M.A. Filler, M.C. Putnam, N.S. Lewis, N.H. Atwater, 2008b. Photovoltaic Measurements in Single-Nanowire Silicon Solar Cells. **Nano letters** 8, pp. 710-714.
- [30] Kuykendall, T., P. Ulrich, S. Aloni, P. Yang, 2007. Complete composition tenability of InGaN nanowires using a combinatorial approach. **Nature Materials** 6, pp. 951-956.
- [31] Law, M., L.E. Greene, J.C. Johnson, R. Saykally, P. Yang, 2005. Nanowire dye-sensitized solar cells. **Nature Materials** 4, pp. 455-459.

- [32] Muskens, O.L., J.G. Rivas, R. E. Algra, E.P.A.M. Bakkers, A. Lagendijk, 2008. Design of Light Scattering in Nanowire Materials for Photovoltaic Applications. *Nano Letters* 8, pp. 2638-2642.
- [33] Nederlands Onderzoekplatform Duurzame Energievoorziening, 2012. Geavanceerde concepten voor hoogefficiënte zonnepanelen [online]. [Geciteerd 1 juli 2012]. Beschikbaar op het World Wide Web: <<http://www.energieplatform.nl/energieopties/zonnecellen/onderzoek/tu-delft/nieuwe-principes/>>.
- [34] Nozik, A., 2010a. Nanoscience and Nanostructures for Photovoltaics and Solar Fuel. *Nano letters* 10, pp. 2735-2741.
- [35] Peng, K., Y. Xu, Y. Wu, Y. Yan, S. Lee, J. Zhu, 2005. Aligned Single-Crystalline Si Nanowire Arrays for Photovoltaic Applications. *Small* 1, pp. 1062-1067.
- [36] Peters, C.H., A.R. Guichard, A.C. Hryciw, M.L. Brongersma, M.D. McGehee, 2009. Energy transfer in nanowires solar cells with photon-harvesting shells. *Journal of Applied Physics* 105, 124509.
- [37] Polman, A., H.A. Atwater, 2012. Photonic design principles for ultrahigh-efficiency photovoltaics. *Nature Materials* 11, pp. 174-177.
- [38] PV Education, 2012. Diffusion Length [online]. [Geciteerd 22 juni 2012]. Beschikbaar op het World Wide Web: <<http://pveducation.org/pvcdrom/pn-junction/diffusion-length>>.
- [39] Rodriguez, S.R.K., M.C. Schaafsma, A. Berrier, J. G. Rivas, 2012. Collective resonances in plasmonic crystals: Size matters. *Physica B*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.physb.2012.03.053>
- [40] Ross, R.T., A.J. Nozik, 1982. Efficiency of hotcarrier solar energy converters. *Journal of Applied Physics* 53, pp. 3813-3818.
- [41] Smith, A.M., S. Nie, 2009. Semiconductor Nanocrystals: Structure, Properties, and Band Gap Engineering. *Accounts of chemical research* 43, pp. 190-200.
- [42] Solar cell, 2012. Benefits and Features of Solar cell Technology [online]. [Geciteerd 1 juli 2012]. Beschikbaar op het World Wide Web: <<http://www.solarcell.net.in/wp-content/uploads/2011/09/solar-cell.jpg>>.
- [43] Sorkin, A., 2006. **Computer simulation of the nucleation of diamond from liquid carbon under extreme pressures**. Technion – Israel Institute of Technology, Haifa.
- [44] Tang, Y.B., Z.H. Chen, H.S. Song, C.S. Lee, H.T. Cong, H.M. Cheng, W.J. Zhang, I. Bello, S.T. Lee, 2008. Vertically Aligned p-Type Single-Crystalline GaN Nanorod Arrays on n-Type Si for Heterojunction Photovoltaic Cells. *Nano Letters* 8, pp. 4191-4195.
- [45] Tian, B., X. Zheng, T.J. Kempa, Y. Fang, N. Yu, G. Yu, J. Huang, C.M. Lieber, 2007. Coaxial silicon nanowires as solar cells and nanoelectronic power sources. *Nature* 449, pp. 885-890.
- [46] Trupke, T., M.A. Green, P. Würfel, 2002. Improving solar cell efficiencies by down-conversion of high-energy photons. *Journal of Applied Physics* 92, pp. 1668-1674.

- [47] Tsakalkos, L., J. Balch, J. Fronheiser, B.A. Korevaar, O. Sulima, 2007. Silicon nanowire solar cells. ***Applied Physics Letters*** 91, 233117.
- [48] Tu, R., L. Zhang, Y. Nishi, H. Dai, 2007. Measuring the Capacitance of Individual Semiconductor nanowires for Carrier Mobility Assessment. ***Nano Letters*** 7, pp. 1561-1565.
- [49] Wu, Z., J.B. Neaton, J.C. Grossman, 2008. Quantum Confinement and Electronic Properties of Tapered Silicon Nanowires. ***Physical Review Letters*** 100, 246804
- [50] Wu, Z., J.B. Neaton, J.C. Grossman, 2009. Charge Separation via Strain in Silicon Nanowires. ***Nano Letters*** 9, pp. 2418-2422.
- [51] Yu, P.Y., M. Cardona, 2010. ***Fundamentals of Semiconductors. Physics and Materials Properties.*** Springer, Heidelberg.
- [52] Zhu, K., R. Neale, A. Miedaner, A.J. Frank, 2007. Enhanced Charge-Collection Efficiencies and Light Scattering in Dye-Sensitized Solar Cells Using Oriented TiO₂ Nanotubes Arrays. ***Nano Letters*** 7, pp. 69-74.
- [53] Zhu, J., Z. Yu, G.F. Burkhard, C.Hsu, S.T. Connor, Y. Xu, Q. Wang, M.McGehee, S. Fan, Y. Cui, 2009. Optical Absorption Enhancement in Amorphous Silicon Nanowire and Nanocone Arrays. ***Nano Letters*** 9, pp. 279-282.
- [54] Zhu, J., C. Hsu, Z. Yu, S. Fan, Y. Cui, 2010a. Nanodome Solar Cell with Efficient Light Management and Self-Cleaning. ***Nano Letters*** 10, pp. 1979-1984.

Appendix 1

Table I. Confirmed terrestrial cell and submodule efficiencies measured under the global AM1.5 spectrum (1000 W/m²) at 25°C (IEC 60904–3: 2008, ASTM G-173-03 global).

| Classification ^a | Effic. ^b (%) | Area ^c (cm ²) | V _{oc} (V) | J _{sc} (mA/cm ²) | FF ^d (%) | Test centre ^e (and date) | Description |
|---|---------------------------|--------------------------------------|---------------------|---------------------------------------|---------------------|-------------------------------------|--|
| <i>Silicon</i> | | | | | | | |
| Si (crystalline) | 25.0 ± 0.5 | 4.00 (da) | 0.706 | 42.7 ^f | 82.8 | Sandia (3/99) ^g | UNSW PERL [18] |
| Si (multicrystalline) | 20.4 ± 0.5 | 1.002 (ap) | 0.664 | 38.0 | 80.9 | NREL (5/04) ^g | FhG-ISE [19] |
| Si (thin film transfer) | 19.1 ± 0.4 | 3.983 (ap) | 0.650 | 37.8 ^h | 77.6 | FhG-ISE (2/11) | ISFH (43-μm thick) [20] |
| Si (thin film submodule) | 10.5 ± 0.3 | 94.0 (ap) | 0.492 ⁱ | 29.7 ⁱ | 72.1 | FhG-ISE (8/07) ^g | CSG Solar (1–2 μm on glass; 20 cells) [21] |
| <i>III-V cells</i> | | | | | | | |
| GaAs (thin film) | 28.3 ± 0.8 | 0.9944 (ap) | 1.107 | 29.47 ^j | 86.7 | NREL (8/11) | Alta devices [3] |
| GaAs (multicrystalline) | 18.4 ± 0.5 | 4.011 (t) | 0.994 | 23.2 | 79.7 | NREL (11/95) ^g | RTI, Ge substrate [22] |
| InP (crystalline) | 22.1 ± 0.7 | 4.02 (t) | 0.878 | 29.5 | 85.4 | NREL (4/90) ^g | Spire, epitaxial [23] |
| <i>Thin film chalcogenide</i> | | | | | | | |
| CIGS (cell) | 19.6 ± 0.6 ^k | 0.996 (ap) | 0.713 | 34.8 ^l | 79.2 | NREL (4/09) | NREL, CIGS on glass [24] |
| CIGS (submodule) | 17.4 ± 0.5 | 15.993 (da) | 0.6815 ^j | 33.84 ^j | 75.5 | FhG-ISE (10/11) | Solibro, four serial cells [4] |
| CdTe (cell) | 16.7 ± 0.5 ^k | 1.032 (ap) | 0.845 | 26.1 | 75.5 | NREL (9/01) ^g | NREL, mesa on glass [25] |
| <i>Amorphous/nanocrystalline Si</i> | | | | | | | |
| Si (amorphous) | 10.1 ± 0.3 ^m | 1.036 (ap) | 0.886 | 16.75 ^f | 67.0 | NREL (7/09) | Oerlikon Solar Lab, Neuchatel [26] |
| Si (nanocrystalline) | 10.1 ± 0.2 ⁿ | 1.199 (ap) | 0.539 | 24.4 | 76.6 | JQA (12/97) | Kaneka (2 μm on glass) [27] |
| <i>Photochemical</i> | | | | | | | |
| Dye sensitised | 11.0 ± 0.3 ^o | 1.007 (da) | 0.714 | 21.93 ^h | 70.3 | AIST (9/11) | Sharp [5] |
| Dye sensitised (submodule) | 9.9 ± 0.4 ^o | 17.11 (ap) | 0.719 ⁱ | 19.4 ^{i,j} | 71.4 | AIST (8/10) | Sony, eight parallel cells [28] |
| <i>Organic</i> | | | | | | | |
| Organic thin film | 10.0 ± 0.3 ^o | 1.021 (ap) | 0.899 | 16.75 ^j | 66.1 | AIST (10/11) | Mitsubishi Chemical [6] |
| Organic (submodule) | 4.2 ± 0.2 ^o | 294.5 (da) | 0.714 | 12.26 ^j | 47.7 | AIST (9/11) | Sumitomo Chemical (10 series cells) [7] |
| <i>Multijunction devices</i> | | | | | | | |
| GaNP/GalnAs/Ge | 34.1 ± 1.2 | 30.17 (t) | 2.691 | 14.7 ^j | 86.0 | FhG-ISE (9/09) | AZUR (monolithic) [8] |
| a-Si/nc-Si/nc-Si (thin film) | 12.4 ± 0.7 ^p | 1.050 (ap) | 1.936 | 8.96 ^h | 71.5 | NREL (3/11) | United Solar [29] |
| a-Si/nc-Si (thin film cell) | 12.3 ± 0.3 ^q | 0.962(ap) | 1.365 | 12.93 ^j | 69.4 | AIST (7/11) | Kaneka [9] |
| a-Si/nc-Si (thin film submodule) ^j | 11.7 ± 0.4 ^{r,f} | 14.23 (ap) | 5.462 | 2.99 | 71.3 | AIST (9/04) | Kaneka [30] |

^aCIGS, CuInGaSe₂; a-Si, amorphous silicon/hydrogen alloy.

^bEffic., efficiency.

^c(ap), aperture area; (t), total area; (da), designated illumination area.

^dFF, fill factor.

^eFhG-ISE, Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme; JQA, Japan Quality Assurance; AIST, Japanese National Institute of Advanced Industrial Science and Technology.

^fSpectral response reported in Version 36 of these Tables.

^gRecalibrated from original measurement.

^hSpectral response and current–voltage curve reported in Version 38 of these Tables.

ⁱReported on a “per cell” basis.

^jSpectral response and current–voltage curve reported in present version of these Tables.

^kNot measured at an external laboratory.

^lSpectral response reported in Version 37 of these Tables.

^mLight soaked at Oerlikon prior to testing at NREL (1000 h, one sun, 50°C).

ⁿMeasured under IEC 60904–3 Ed. 1: 1989 reference spectrum.

^oStability not investigated. References 31 and 32 review the stability of similar devices.

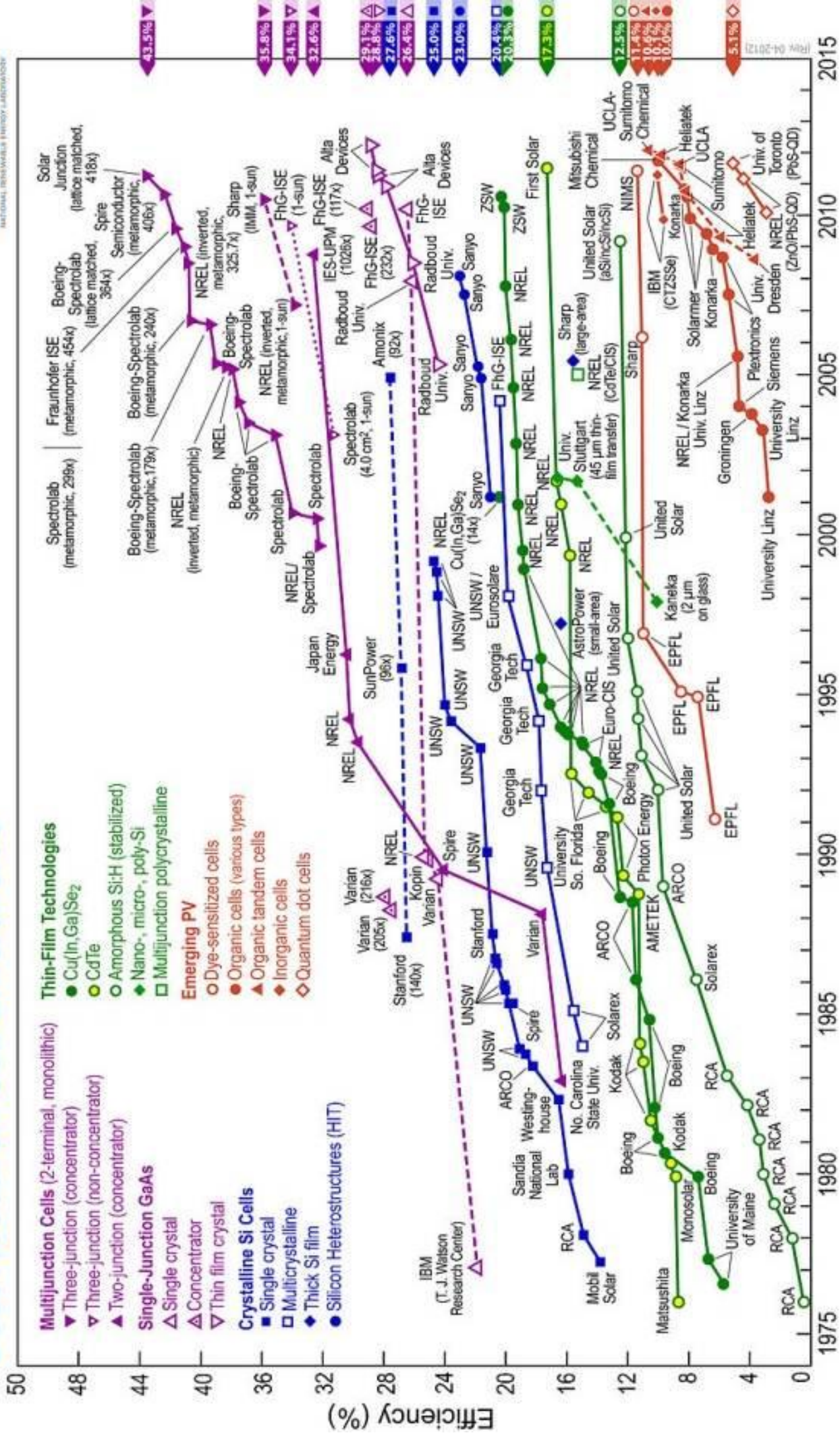
^pLight soaked under 100mW/cm² white light at 50°C for over 1000 h.

^qStabilised by manufacturer.

^rStabilised by 174 h, one sun illumination after 20h, five sun illumination at a sample temperature of 50°C.

Bron: Green et al., 2012

Best Research-Cell Efficiencies



Samengesteld door de National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2012. Zoals vertoond op Wikipedia. [http://en.wikipedia.org/wiki/File:Pveff\(rev120404\).jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Pveff(rev120404).jpg)