

Luminescente concentrator met dunne film silicium zonnecellen

Zonne-energie neemt in de mondiale energievoorziening een steeds belangrijker plaats in, ondermeer dankzij de dalende kosten. Een mogelijkheid tot verdere prijsverlaging is via de luminescente zonne-concentrator.

Steven Velthuisen, Wilfried van Sark, Dan Farrell en Ruud Schropp

Het idee voor de luminescente zonne-concentrator (LSC) stamt al uit de jaren zeventig, en werd ook toen al uitgevoerd met een dun plastic plaatje waar zonlicht opvalt. Het licht wordt door een luminescente stof in het plaatje geabsorbeerd, en met langere golflengte opnieuw uitgezonden tot het een zonnecel bereikt die aan de zijkant van het plaatje bevestigd is, zoals weergegeven in figuur 1. De zijden waar geen zonnecel is, zijn perfect spiegeland gemaakt. Als luminescente stof kunnen kleurstoffen gebruikt worden,

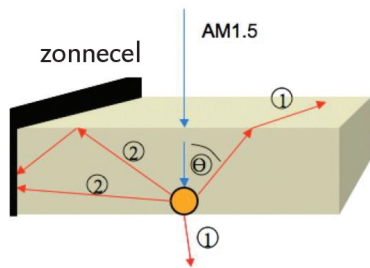
maar ook halfgeleider nanokristallen, zogenaamde quantumdots. Onderzoek in de zeventiger en tachtiger jaren is gestopt vanwege de degradatie-effecten van het plastic en de luminescente kleurstoffen daarin. Voor een overzicht van de geschiedenis en eerder onderzoek zie [1].

De energie van het heruitgezonden licht ligt dicht bij de bandgap van het materiaal waarvan de zonnecel vervaardigd is (meestal silicium), waardoor minder energie verloren gaat in de vorm van warmte. Ook is er sprake van een concentratie-effect, omdat het

oppervlak van het plastic plaatje groter is dan dat van de zonnecel.

Door spiegels aan zij- en onderkanten en totale interne reflectie weet in theorie slechts een klein deel (25%) van het invallende licht het plaatje aan de bovenzijde weer te ontsnappen [2]. Dit kan worden geminimaliseerd door gebruikmaking van een selectieve reflector.

In recente onderzoeken is aangetoond dat een dergelijk systeem een efficiëntie van wel 7,1% kan bereiken [3], en dat de kosten een factor drie lager kunnen zijn dan die van een 'gewone'



Figuur 1 Schematische weergave van een LSC-systeem met aan een kant een zonnecel. Licht valt van bovenaf op het plastic plaatje. Lichtstralen 1 gaan verloren, lichtstralen 2 bereiken de zonnecel. De hoek θ bepaalt de zogenaamde ontsnappingskegel, waardoor lichtstralen kunnen ontsnappen.

zonnecel met hetzelfde oppervlak, uitgedrukt in Euro/W [4]. Dat wordt veroorzaakt door het feit dat de kosten van het concentrerende plastic veel lager zijn dan die van de zonnecel. Hierdoor kan een groter werkend oppervlak gecreëerd worden tegen lagere kosten.

Amorf

De experimenten tot nu toe hebben allen gebruik gemaakt van kristallijne halfgeleiders als zonnecellen; hetzij silicium, hetzij ingewikkelder soorten, zoals galliumarsenide bij het experiment waar een resultaat van 7,1% werd gehaald.

Aangezien een van de redenen waarom het LSC-systeem interessant is de kosten betreft, is het nuttig ook te bestuderen hoe het systeem zich ge-

draagt als de zonnecellen van amorf silicium (a-Si) zijn vervaardigd. Hierdoor wordt het geheel immers nóg goedkoper. Amorf silicium wordt gebruikt in dunne-cel technologie. Het heeft doorgaans een lagere efficiëntie, maar is ook veel goedkoper dan kristallijn silicium (c-Si). Daarnaast heeft het een bandgap van 1,8 eV, tegenover 1,1 eV voor c-Si. Dit betekent dat waar c-Si optimaal absorbeert bij een golflengte van 1100 nm (infrarood), a-Si het meest efficiënt werkt bij licht met een golflengte van 700 nm (rood licht). Dit is ook te zien in figuur 2, waar de quantumefficiëntie van een a-Si-cel is weergegeven tegen de fotonenergie.

Door middel van een *proof-of-principle*-experiment is getracht inzicht te krijgen in het gedrag van het LSC-systeem, bestaande uit een met kleurstoffen gedoteerd plastic plaatje met daaraan bevestigd a-Si-zonnecellen.

Materiaal

In samenwerking met Imperial College in Londen is een LSC-systeem vervaardigd. Het betreft een vierkant plaatje, gesneden op afmetingen $5 \times 5 \times 0,463 \text{ cm}^3$, type 4T56 van fabrikant Lucite. Vervolgens zijn aan twee overliggende zijden a-Si cellen bevestigd, zie figuur 3. Hierbij is gebruik gemaakt van p-i-n a-Si-cellen zoals deze gemaakt worden in de nanophotonics groep van het Debye Institute for Nanomaterials Science aan de Universiteit Utrecht. Deze cellen hebben

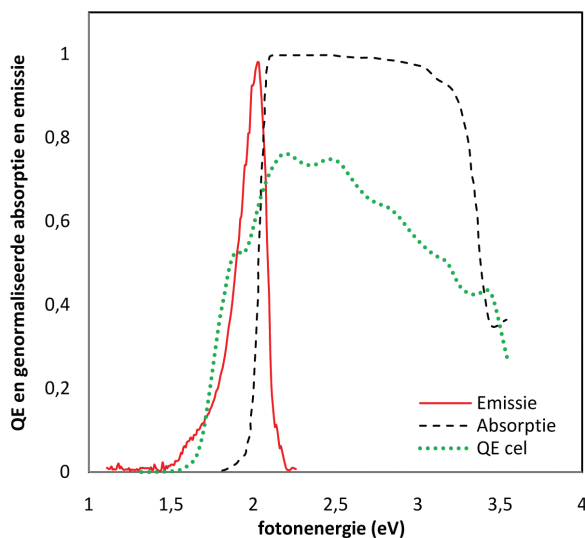
een typische bandgap van 1,75-1,8 eV en een efficiëntie van rond de 9% onder standaard testcondities (STC). Dit komt goed overeen met de emissiekarakteristiek van de kleurstoffen in het plaatje. Zie figuur 2 voor emissie- en absorptiegedrag van het Lucite-materiaal. Het formaat van de zonnecel is gelijk aan dat van de zijkant van het plastic plaatje: $5 \times 0,463 \text{ cm}^2$.

Absorptie en emissie

Alvorens de cellen aan het plastic plaatje te bevestigen zijn de eigenschappen van de onderdelen apart gemeten. De IV-curves van de zonnecellen, alsmede de emissie- en absorptiekarakteristieken van het Lucite plaatje zijn gemeten met een witlichtbron bij Imperial College, Londen. Hierbij dient opgemerkt te worden dat de intensiteit van deze lichtbron significant afwijkt van STC (693 W/m^2 voor het bereik 300-1000 nm). Absorptie en emissie zijn te zien in figuur 2. Wat opvalt is dat het absorptieprofiel erg vlak is over een breed fotonenergiebereik; dit duidt erop dat het plaatje met meerdere kleurstoffen gedoteerd is: emissie van de ene kleurstof wordt opgevangen door een andere, en bij langere golflengte heruitgezonden [5]. De 'laatste' kleurstof zendt uit bij ongeveer 2 eV.

Collectie-efficiëntie

Naast het golflengteafhankelijke gedrag van het plaatje is ook de zogenaamde optische collectie-efficiëntie



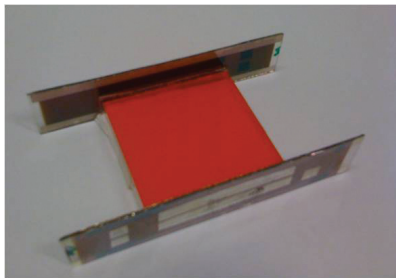
Figuur 2 Genormaliseerde absorptie- en emissiekarakteristiek van het plastic plaatje, alsmede de spectrale respons (quantumefficiëntie) van een a-Si-cel.

Bandgap

De bandgap van een zonnecel is de energiesprong tussen valentie-elektronen en vrije of geleidende elektronen. De energie van invallend licht kan elektronen uit de valentieband naar de geleidingsband 'stoten' als de fotonenergie groter of gelijk is aan deze bandgap. Alleen elektronen in de geleidingsband zorgen voor ladingstransport in de zonnecel.

Fotonenergie E is afhankelijk van de golflengte λ van het licht: $E = hc/\lambda$, met h de constante van Planck en c de lichtsnelheid.

Als de fotonenergie groter is dan de bandgap gaat het overschot verloren in de vorm van warmte. Daarom is het nuttig om de golflengte van het licht (fotonenergie) en het materiaal van de zonnecel (bandgap) op elkaar af te stemmen, om verlies uit deze hoek te minimaliseren.



Figuur 3 Het LSC-systeem: een PMMA-plaatje met aan twee zijden a-Si-zonnecellen.

van belang voor de prestatie van het LSC-systeem. De collectie-efficiëntie geeft aan hoeveel fotonen de zonnecel bereiken per foton die het plaatje binnenkomt. Figuur 4 toont deze waarden op twee verschillende manieren. Links staat de fotonflux uitgezet: hieruit blijkt dat binnen het emissiebereik van de kleurstoffen er per vierkante meter meer fotonen uit het plaatje komen dan er op invallen. Uit het rechterplaatje echter, waar de fotonenstroom staat uitgezet, blijkt dat in absolute termen slechts een klein deel van de invallende fotonen het plaatje via de zijkant verlaat. De collectie-efficiëntie is gelijk aan de ratio van de oppervlaktes van de curven in de rechtergrafiek van figuur 4 en bedraagt 9,5%. Deze lage efficiëntie heeft twee voorname oorzaken: ten eerste wordt een groot deel van het spectrum niet geabsorbeerd door de kleurstoffen, en ten tweede verdwijnt een significant deel van het invallende licht weer door de bovenkant van het plaatje [5].

Constructie

De cellen zijn bevestigd aan het plaatje door middel van Krystalflex thermosoftening film, een materiaal dat zacht en transparant wordt bij verhitting tot 130°C, en waaraan na afkoeling zowel het plaatje als de zonnecel blijven vastzitten. Een goede reden om te kiezen voor dit verbindingmateriaal is de brekingsindex van 1,49, die goed overeenkomt met die van PMMA, het materiaal van het plastic plaatje en van glas, het substraat van de zonnecel [6]. Omdat voor dit experiment het glazen substraat van de zonnecellen groter was dan de zijkant van het plaatje pasten er slechts aan twee zijkanten cellen: de andere twee zijkanten werden afgedekt met 3M spiegelolie met een reflectiviteit van 95%. In de latere versies zullen natuurlijk alle vier de zijden van zonnecellen worden voorzien. Aan de onderkant van het plaatje werd een teflon reflector geplaatst met 98% diffuse reflectiviteit. Omdat er tijdens het bevestigingsproces defecten kunnen ontstaan door

Standaard testcondities (STC)

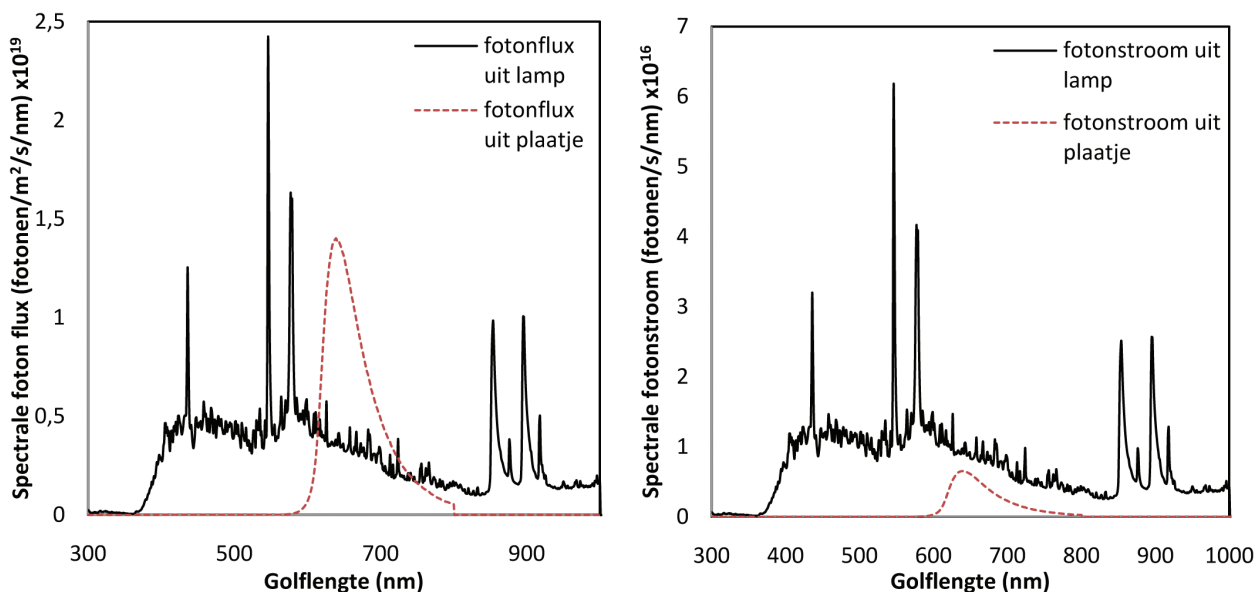
Zonnecellen worden gekarakteriseerd onder vastgestelde omstandigheden: celtemperatuur 25°C, lichtintensiteit 1000 W/m², en AM1.5 zonnenspectrum.

Zonnenspectrum AM1.5 wil zeggen dat het gaat om licht zoals uitgezonden door de zon, nadat het door anderhalf keer de dikte van de aardatmosfeer is gegaan. Dit is een goede maat voor het zonlicht op gemiddelde breedtegraad, zoals in Nederland.

bijvoorbeeld verhitting is van een cel de IV-curve gemeten voor en na verhitting tot 130°C. Het resultaat is te zien in figuur 5. De afname in shuntweerstand is duidelijk te zien (de helling van de curve bij 0V wordt minder vlak). Het lijkt erop dat dit effect veroorzaakt wordt door mechanische stress tijdens het meetproces, omdat verhitting de shuntweerstand juist zou moeten verhogen. De efficiëntie van de cel neemt af met 45% (van 7,3% naar 4%).

Resultaat

Van het LSC-systeem (plaatje met daaraan bevestigd twee zonnecellen) zijn IV-metingen gedaan onder belichting bij Imperial College, Londen. Ter vergelijking is onder gelijke omstandigheden ook het IV-gedrag van de beste van de bevestigde zonnecellen apart gemeten, direct door de lichtbron zelf belicht, zie figuur 6. De verandering in kortsluitstroom wordt bepaald door een drietal factoren. Aan de ene kant is er na bevestiging



Figuur 4 Inkomend en uitgaand spectrum van (links) spectrale fotonflux en (rechts) spectrale fotonenstroom.

IV-karakteristiek

Zonnecellen worden vaak gekarakteriseerd door middel van zogenaamde IV-curves, waarin de stroom die wordt opgewekt door de cel wordt uitgezet tegen de spanning die erover komt te staan. De relatie hiertussen wordt beschreven door de diodevergelijking. In ideale vorm is dat

$$I = I_0(e^{\frac{qV}{kT}} - 1)$$

Met I de stroom door de cel, I_0 de zogenoemde verzadigingsstroom, V de spanning over de cel, k de Boltzmann constante en T de temperatuur. Hoe 'hoekiger' deze curve, des te beter gedraagt de cel zich als een diode.

	J_{MPP} (mA)	V_{MPP} (V)	Efficiëntie (%)
Cel 1	12,2	0,52	0,37
Cel 2	22,2	0,58	0,74
Serie	14,0	0,98	0,79
Paralleel	31,6	0,5	0,91

Tabel 1 Gevonden eigenschappen van het LSC-systeem.

sprake van een concentratie-effect (het bovenoppervlak van het plaatje is zo'n 5,5 keer zo groot als het collectieoppervlak, bestaande uit twee zonnecellen); aan de andere kant is de collectie-efficiëntie slechts 9,5%. Hieruit volgt dat er minder fotonen de zonnecel bereiken in het LSC-systeem dan wanneer de zonnecel los wordt beschenen: $5,5 \times 9,5\% = 52\%$, een vermindering van 48%. Uit figuur 6 blijkt echter dat de vermindering in kortsluitstroom 'slechts' 23% bedraagt.

Dit is te verklaren met de spectrale respons van de zonnecel, zoals is te zien in figuur 2: dit soort a-Si-cellen heeft een veel hogere efficiëntie op de door de kleurstoffen uitgezonden golflengte. In dit geval blijkt dat de conversie-efficiëntie van de cel meer dan verdubbeld is.

De efficiëntie van het LSC-systeem, bestaande uit het PMMA-plaatje met daaraan bevestigd twee a-Si-cellen, kan op meerdere manieren gedefinieerd worden. Zo kan de efficiëntie van

elke cel apart worden uitgerekend, of kunnen de cellen eerst met elkaar verbonden worden, hetzij in serie, hetzij in een parallelle schakeling. De gevonden waarden zijn te zien in tabel 1.

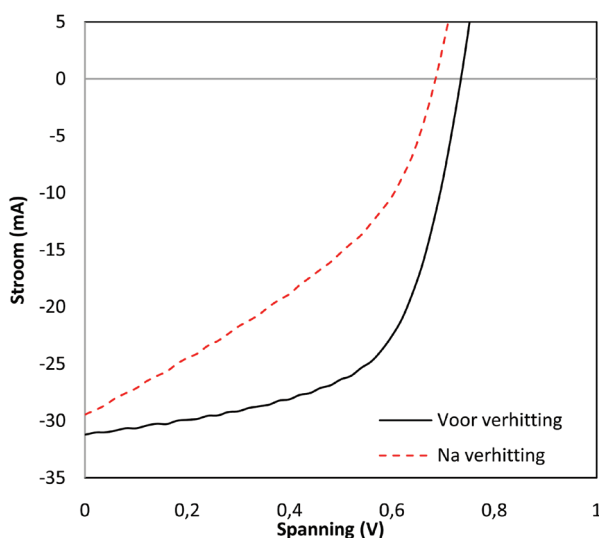
De efficiëntie van ongeveer 1% is laag. Dit kan worden verklaard door de lage collectie-efficiëntie, maar ten dele ook doordat cel 1 tijdens het bevestigingsproces beschadigd raakte, wat significante gevolgen had voor zijn prestaties, zoals ook blijkt uit de resultaten in tabel 1.

Vooruitblik

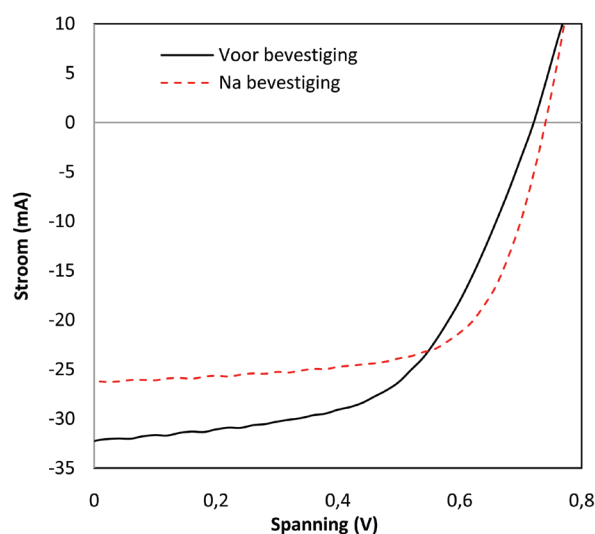
Er zijn al meerdere LSC-systemen bestudeerd in de afgelopen jaren, niet in het minst door de belofte van quantumdots als vervangers van de kleurstoffen die tot nu toe werden gebruikt om het licht in golflengte te doen verschuiven [7].

Quantumdots zijn kunstmatige nanostructuren die het opgevangen licht weer uitzenden op een zeer specifieke golflengte, die ook nog eens in te stellen is door de diameter te veranderen. Daarnaast zijn quantumdots stabielere dan kleurstoffen. Probleem op dit moment is met name hoe de quantumdots gelijkmatig door het plastic verdeeld kunnen worden, en de significante zelfabsorptie die optreedt bij dergelijke systemen: de absorptie- en emissiepieken liggen dicht bij elkaar, waardoor heruitgezonden licht als nog geabsorbeerd kan worden door andere quantumdots.

Een nieuwe generatie quantumdots, zogenaamde Type II quantumdots,



Figuur 5 IV-curve van een a-Si zonnecel voor en na verhitting tot 130°C.



Figuur 6 IV-curve van de beste zonnecel in het LSC-systeem (cel 2), al dan niet bevestigd aan het plaatje. Belichting met een lichtbron van Imperial College, Londen.

lijken veelbelovende kandidaten voor LSC-systemen, onder andere door de grotere verschuiving tussen absorptie- en emissiepieken. Onderzoek hiernaar zal worden gedaan in het kader van het FOM Joint Solar Programme. Met een *ray-trace*-model (bijvoorbeeld zoals ontwikkeld door ECN [8]) kunnen voorspellingen worden gedaan over de prestaties van een LSC-systeem met andere eigenschappen dan in dit artikel beschreven, zoals kleurstof-concentratie, afmetingen, aantal cellen en quantumefficiëntie van zowel de kleurstoffen als de zonnecellen.

Conclusie

In dit artikel is de constructie van een LSC-systeem met a-Si-zonnecellen uiteengezet. Verwacht werd dat de efficiëntie van de cellen onder belichting door de emissiespectra uit het Lucite PMMA-plaatje ruwweg tweemaal zo hoog zou zijn als bij AM1.5 (rond de 20%). Een dergelijke toename van de efficiëntie werd waargenomen, maar teniet gedaan door andere factoren als de lage collectie-efficiëntie (10%) en beschadigingen aan de zonnecellen, veroorzaakt door het bevestigingsproces. De waargenomen efficiëntie van het systeem met twee parallel geschakelde cellen bedroeg 0,91%. Verhogen van de collectie-efficiëntie, bijvoorbeeld door aan vier zijden cellen te plaatsen en de concentratie kleurstoffen optimaal

Efficiëntie van zonnecellen

De efficiëntie van een zonnecel is te berekenen door de elektrische output van de cel (in watt) te delen door de hoeveelheid energie die de cel ingaat in de vorm van fotonen:

$$\eta = \frac{J_{MPP} \times V_{MPP}}{E \times A}$$

Met MPP het zogenaamde *maximum power point*: het punt op de IV-curve waar het product van stroom en spanning maximaal is. E is de intensiteit van het invallende licht (in W/m²) en A het belichte oppervlak.

te kiezen, alsmede het verfijnen van het bevestigingsproces zou moeten leiden tot een hogere efficiëntie. In dit efficiëntiegebied kan de LSC vergeleken worden met organische- en polymeer-zonnecellen: alle drie goedkope alternatieven voor conventionele PV-systemen.

Referenties

- 1 W.G.J.H.M. van Sark et al., *Luminescent Solar Concentrators - A review of recent results*. *Optics Express*, **16**(26): p. 21773-21792 (2008).
- 2 W.G.J.H.M. van Sark, R.E.I Schropp, J.A.M. van Roosmalen en E.H. Lysen, *Enhancing solar cell efficiency by using spectral converters*. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, **87**: p. 395-409 (2005).
- 3 L.H.B. Slooff, et al., *A luminescent solar concentrator with 7.1% power conversion efficiency*. *phys. stat. sol. (RRL)*, **2**(6): p. 257-259 (2008).
- 4 E.E.S. Bende, et al., *Cost & Efficiency optimisation of the fluorescent solar concentrator*, in 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference. (2008): Valencia, Spain.
- 5 D.J. Farrell, et al., *Using amorphous silicon solar cells to boost the viability of luminescent solar concentrators*. *phys. stat. sol. (RRL)* (nog niet gepubliceerd), (2009).
- 6 Slooff, L.H.K. et al., *The Luminescent Concentrator: a Bright Idea for Spectrum Conversion?*, in 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. (2005): Barcelona, Spain.
- 7 S.J.R. Gallagher, J. Doran en B. Norton, *Quantum dot solar concentrator: Device optimisation using spectroscopic techniques*. *Solar Energy*, (2007) **81**: p. 540-547.
- 8 A.R.S. Burgers, R. Kinderman, J.A.M. van Roosmalen, *Modelling of Luminescent Concentrators by Ray-Tracing*, in 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. (2005) Barcelona, Spain.

Steven Velthuis studeerde natuurkunde aan de Universiteit Utrecht. Na het behalen van zijn bachelor in 2005 begon hij met de master Energy Science. Luminescente zonneconcentratoren zijn het onderwerp van zijn afstudeerscriptie.



Daniel Farrell is postdoc in de Experimental Solid State Physics groep van Imperial College London. In zijn onderzoek houdt hij zich bezig met verschillende onderwerpen op het gebied van derde generatie zonnecellen, zoals *hot-carrier* zonnecellen, thermodynamica van conversie van zonne-energie, spectrale conversie door middel van luminescente materialen, en luminescente zonneconcentratoren.

Wilfried van Sark is in 1989 aan de Katholieke Universiteit Nijmegen gepromoveerd op depositie van lii-V halfgeleiders ten behoeve van zonnecellen. Na een postdoc aan de Universiteit Utrecht op het gebied van amorf silicium zonneceldepositie, werd hij in 1996 universitair docent in Nijmegen. Hij keerde terug naar de UU in de groep biofysica, waar hij onder andere aan nanokristal fluorescentie werkte. Sinds 2002 is hij als universitair docent verbonden aan de groep Natuurwetenschap en Samenleving van de UU, waar hij werkt aan de prestatie van zonnecelsystemen, beleidsontwikkeling, maar ook nieuwe, derde generatie, concepten zoals in dit artikel beschreven. Hij is tevens verbonden aan de afdeling Nanophotonics.



W.G.J.H.M.vanSark@uu.nl

Ruud Schropp promoveerde in 1987 aan de Rijksuniversiteit Groningen op het onderwerp Thin Film Transistoren (TFTs) gebaseerd op amorf silicium. Daarna was hij werkzaam bij Glasstech Solar, Inc., in de Verenigde Staten, producent van plasmadepositiesystemen. Sinds 1989 is hij verbonden aan de Universiteit Utrecht. In 2000 werd hij hoogleraar, leerstoel Physics of Devices. Zijn onderzoek is gericht op nanogestructureerde dunnefilm zonnecellen met behulp van geavanceerde CVD depositiemethoden. Hij is voorzitter van de Afdeling Nanophotonics van het Debye Instituut voor nanomaterialenonderzoek binnen de Faculteit Betawetenschappen.

