

1. Gegevens project

- TEZ0114003
- CIGS with Added Light Management (CALM)
- DSM Advanced Surfaces, TNO, ECN, Morphotonics
- Projectperiode: 1 oktober 2014 - 31 maart 2017

2. Inhoudelijk eindrapport

Samenvatting

Dunne film zonnecellen met het Cu(In,Ga)Se₂ (CIGS) materiaal zijn onderzocht op hun potentie voor hogere efficiëntie en kostenverlaging door gebruik van nog dunnere lagen en het verbeteren van de optische eigenschappen. De ontwikkelde techniek is het imprimen van micro- en nano-texturen op glas en folie. Aan de voorkant van de cel levert deze technologie **6% meer opbrengst**, wat hoger is dan alle andere beschikbare technieken die aan de voorkant kunnen worden toegepast. Deze hoge kwaliteit wordt behaald door een specifieke textuur die inmiddels eigendom is van DSM. Door de techniek in de cel zelf toe te passen kan ook een efficiëntie winst worden behaald. Deze uitvoering heeft meer technische uitdagingen op design, materiaal en procesvlak, omdat de hele celopbouw een textuur krijgt. Uit optisch modelleren is kennis verkregen van welke texturen verbeterde lichtkoppeling hebben en in het experimentele deel zijn nieuwe materialen en nieuwe manieren van CIGS depositie ontwikkeld. De resultaten laten zien dat het maken van een volledige CIGS cel op een textuur mogelijk is. Door de trade-off van optische en elektrische eigenschappen en het relatieve vroege stadium van deze ontwikkeling is er een efficiëntiewinst van 1% gehaald en de potentie is naar verwachting 2-3%.

Doelstelling van dit rapport

Doelstelling van dit rapport is het overdragen van de in het project uitgevoerde activiteiten en de daaruit ontstane technologische vooruitgang en kennisontwikkeling. Gedetailleerde technische rapportage is binnen het project gedaan en is vertrouwelijk.

Inleiding

De ontwikkeling van goedkope zonnecellen kent verschillende technologielijnen. Dunne film zonnecellen is er een van en heeft als voordeel dat het productieproces bestaat uit het aanbrengen van dunne lagen op glas of folie. Hierdoor is een goedkope productie mogelijk. Op laboratorium schaal komt dit type in de buurt van recordcellen, maar op grote schaal is er nog meer vooruitgang te boeken in zowel efficiëntie van de productie als het product zelf. Er is momenteel ongeveer 10% lichtverlies in het paneel, terwijl dat sterk verminderd kan worden. Hiervoor is nieuwe technologie nodig die ook op vierkante meter schaal toegepast kan worden. Imprint technologie is hiervan een goed voorbeeld en in dit project wordt deze technologie toegepast en verder ontwikkeld voor dunne film CIGS cellen in twee verschillende configuraties: textureren van het buitenste (glas) oppervlak en het binnenste (glas of folie) oppervlak. Voor deze twee configuraties zijn verschillende textuurdesigns nodig en moeten de materialen aan verschillende eisen voldoen. Zo heeft de textuur aan het buitenoppervlak een decennia lange blootstelling aan de elementen, terwijl textureren van het binnenoppervlak eisen stelt aan het textureermateriaal en het CIGS productieproces.

Doelstelling

Doelstelling van dit project is om micro en nanotextureren te gebruiken voor verhoging van de zonnecel efficiëntie en verlaging van de productiekosten door gebruik van een dunnere CIGS laag.

Werkwijze

De buitenste textuur wordt gemaakt met een imprint machine en een imprint materiaal geschikt voor een microtextuur. Hierbij hoeft in principe geen proceswerk aan de cel te worden uitgevoerd. Er is echter een speciale manier van contactering nodig om het effect van deze methode op de efficiëntie te bepalen. Daarnaast is ook onderzocht of de laagdikte van de CIGS invloed heeft op de werking van de buitenste textuur.

Voor de binnenste textuur, die nano-schaal is, maar op vierkante meter wordt aangebracht, was bij aanvang van het project slechts weinig bekend. Het potentieel van deze benadering werd bepaald met optisch modelleren, dat tevens de relatie tussen textuur en optische eigenschappen in kaart bracht voor een grote verscheidenheid aan texturen. Daarnaast zijn nieuwe materialen nodig die tegen hoge temperaturen kunnen, weinig krimpen, chemisch inert zijn en bovendien (potentieel) goedkoop te maken en te verwerken zijn. De textuur wordt aangebracht op het substraat en dit betekent dat alle depositieprocessen van de zonnecel hierdoor beïnvloed zullen worden. De depositieprocessen zullen dus aangepast moeten worden. Textuur brengt een optisch voordeel en het is de verwachting dat textureren een nadelige invloed kan hebben op kristalstructuur en daarmee de

elektrische eigenschappen. Het is voorzien dat de optisch ideale textuur niet het beste rendement oplevert en zal er co-optimalisatie van alle factoren worden uitgevoerd voor de beste trade-off.

Resultaten A) van het project zelf en B) mogelijkheden voor spin-off en vervolgactiviteiten

Voor de textuur aan de buitenkant van de cel is een rendementstoename van 6% behaald. Dit is twee keer beter dan een andere optische oplossing voor de buitenkant. Het laat zien dat deze textuurtechnologie een belangrijke bijdrage kan leveren aan verhogen van electriciteitsproductie uit een zonnepaneel.

Voor wat betreft de interne texturering is de rendementstoename iets bescheidener: 1%. Er zijn echter vele nieuwe dingen ontwikkeld, zoals textuurmaterialen die bestand zijn tegen extreme condities, nieuwe CIGS aanbreng methoden die compatibel zijn met textuur en rekenmodellen voor de optische eigenschappen en laaggroei. We verwachten dat er met deze methode een rendementstoename tot 3% behaald kan worden.

Binnen dit project uitgevoerde kostenberekening heeft laten zien dat door een dunnere CIGS laag flink wat geld kan worden bespaard. We hebben in dit project de laagdikte van 2 micrometer naar 1 micrometer teruggebracht, wat in de praktijk een kostenvoordeel van ongeveer 10 €/m² kan opleveren [van Deelen et al. *Photovoltaics International* 28 (2015) p. 46-52]. Momenteel gaat dit nog gepaard met enig rendementsverlies en huidige activiteiten zijn erop gericht om dit verlies te minimaliseren. Gedurende de uitvoering van dit project bleek dat niet alleen optische eigenschappen, maar ook elektrische oppervlakte eigenschappen een rol spelen en momenteel wordt in internationaal verband hierop samen gewerkt. Dit is een spin-off van dit project. DSM heeft de externe texturering nu in pilot productie.

Conclusie en aanbevelingen

De belangrijkste conclusies uit dit project zijn dat externe texturering een uiterst aantrekkelijke manier is om het rendement van PV panelen te verhogen. Interne texturering is gedemonstreerd, maar zal voor implementatie in de PV industrie meer proces ontwikkeling nodig hebben, aangezien ook het maken van de lagen in de zonnecel aangepast zal moeten worden. Dunnere CIGS lagen zijn inmiddels een feit en er is potentie voor verdere verdunning en vergroting van het rendement van dergelijke dunne cellen, o.a. met in dit project ontwikkelde technologie.

De voornaamste aanbevelingen zijn: (1) toepassing en opschaling van de externe textuurtechnologie, (2) door te gaan op het pad van dunnere CIGS lagen en (3) het oplossen van de elektrische beperkingen aan de grensvlakken. In het geval van interne textuur (4) is verdere co-optimalisatie nodig.

3. Uitvoering van het project

Tijdens het project is gebleken dat het maken van CIGS cellen op een textuur uitdagender was dan aanvankelijk ingeschat. Dit heeft ertoe geleid dat er meer aandacht besteed is aan het CIGS proces dan gepland. Het resultaat hiervan is een beter begrip van het maken van een dunne CIGS cel en de processen die daarvoor nodig zijn. Dit kennis wordt gebruikt in de eerdergenoemde vervolgprojecten.

Door de extra tijd dat nodig was voor het ontwikkelen van processen voor het maken van werkende CIGS cellen op een textuur is het niet gelukt om binnen het project aan een getextureerde achterreflector te werken. Dit werk wordt buiten het project verder ontwikkeld en zal gedeeltelijk genoemd worden in de technische rapportage.

De resultaten van het werk zijn gepubliceerd in twee artikelen

1. J. van Deelen, N. van Loon, M. Barink, M. Burghoorn, Z. Vroon, P. Buskens, "Routes to increasing efficiency and reducing the cost of thin film solar panels" *Photovoltaics International* 28 (2015) p. 46-52.
2. J van Deelen, M. Barink "Innovation for optical, electrical and economical improvement of thin film PV technology" *Photovoltaics international* 35 (2017), 77-84.

Een derde artikel zal ingediend worden voor publicatie in 2017: Joop van Deelen, Yasemin Tezsevin, Marco Barink, Marcel Simor, Karine van der Werf "Light management in CIGS cells by substrate texturing"

Er zijn een aantal poster presentaties gegeven tijdens de duur van het project:

1. Joop van Deelen, Man Xu, Bas Kniknie "Impact of optical constants and assumptions on optical modeling of textured CIGS" EUPVSEC, Munich, 2015.
2. J. Van Deelen, M. Simor, K. van der Werf, M. Barink "CIGS Performance Enhancement by Texturization" MRS spring, Phoenix, 2017.

3. Joop van Deelen, Marieke Burghoorn, Marcel Simor, Karine van der Werf, Marco Barink, Zeger Vroon, Pascal Buskens "Reduced reflection with front and back textured CIGS cells" EUPVSEC, Amsterdam, 2017.
4. Joop van Deelen, "Cost-benefit balances of innovation strategies", EUPVSEC, Amsterdam, 2017.

Als eerste spin-off is er buiten het project een korte studie gedaan naar tandem cellen en dit is gepresenteerd in posters op verschillende fora:

1. J. Van Deelen, M. Barink "CIGS as bottom cell: an optical perspective" e-MRS, 2016.
2. J. van Deelen, A. Omar, M. Barink, "Textured CIGS/Perovskite Tandem Cells" MRS, Phoenix, 2017.

Een tweede spinoff onderwerp buiten het project heeft geleid tot uitvinding van nano-grid gecombineerd met een textuur. Helaas is het niet mogelijk gebleken hier IP-technisch iets mee te doen. Het heeft echter wel 3 orals opgeleverd op de MRS en de EUPVSEC in 2017, alsmede een publicatie: J. van Deelen, A. Omar, M. Barink "Optical design of textured thin film CIGS solar cells with nearly-invisible nanowire assisted front contacts" Materials 10 (2017) 392.

De resultaten behaald binnen dit project zullen worden gebruikt door DSM voor het maken van een business case voor het verder ontwikkelen van getextureerde oppervlakken voor toepassing in de PV. Zoals genoemd zijn de resultaten voor rendementsverhoging met de textuur voor de cellen indrukwekkend in vergelijking met alternatieven. Dit gegeven staat min of meer los van de type cellen die gebruikt zijn en is ook geldig voor kristallijne zonnecellen. DSM zal intern kijken naar de kosten voor het maken van het materiaal en processen voor het texturen en die vergelijken met de te verwachten rendementsverhoging om tot een business case te komen. Parallel hieraan zal gewerkt worden aan het evalueren van de duurzaamheid van het materiaal en textuur in het veld. Dit is een werk waarvoor een aantal jaren nodig zal zijn en is van belang voor de acceptatie van het product in de markt. Voor intern texturen is DSM nog niet van plan om een vervolg te geven aan het project. Door de samenwerking met TNO en ECN zal DSM verdere ontwikkelingen volgen en als blijkt dat het mogelijk is om een significant hogere rendementsverbetering te realiseren kan DSM beslissen om het materiaal verder te ontwikkelen. Door de samenwerking in dit project is wel besloten om een nieuw project te starten met TNO en ECN op een ander onderwerp met een ander materiaal.