



Openbaar eindrapport NChanted

Gegevens project

- Projectnummer: TEZ0113003
- Projecttitel: NChanted
- Penvoerder en medeaanvragers: Tempres Systems B.V. (penvoerder), ASM Europe B.V., Energieonderzoek Centrum Nederland (ECN), Levitech B.V., Mecco Equipment Engineers B.V., Meyer Burger (Netherlands) B.V., Technische Universiteit Eindhoven
- Projectperiode: 01-04-2014 t/m 31-03-2016
- Publicatiedatum openbaar rapport: 27-06-2016

Samenvatting van uitgangspunten, doelstelling en samenwerkende partijen

Binnen het NChanted project hebben de partners gewerkt aan de ontwikkeling en demonstratie van een goedkopere, nieuwe procestechnologie voor hoog rendement n-type zonnecellen. De n-Pasha cell, ECN's bifacial n-type cel concept, is gebruikt als werkpaard voor deze ontwikkelingen. De projectdoelstellingen waren als volgt:

- 1) 21% efficiënte n-Pasha cellen mogelijk maken
- 2) Het testen en onderzoeken van nieuwe, innovatieve processen en apparatuur die een n-type cel concept met een rendement van 22% mogelijk maken tegen concurrerende kosten

De partners onderzochten en ontwikkelden processen en apparatuur voor de volledige proces-flow van n-Pasha zonnecellen: natte chemie (ECN), dotering en diffusie (Tempress), passiveringslagen voor de gedoteerde lagen (Levitech, ASM en Tempress), structurering van de gedoteerde en gepassiveerde gebieden (Meyer Burger BV) en de metallizatie van de zonnecellen (Meco). De Technische Universiteit Eindhoven (TUE) heeft fundamenteel onderzoek verricht naar de passivatie van n+ en p+ gedoteerde gebieden, en naar de interacties tussen verschillende gedoteerde en gepassiveerde lagen. De taken van ECN bestonden uit het ontwerpen en integreren van alle individuele cel processen in een hoog rendement, bifacial¹, n-Pasha cel (figuur 1a), en de daaropvolgende interconnectie van deze cellen in een bifacial module (figuur 1b,c).



Figuur 1a: doorsnede van een n-Pasha cel; figuur 1b: laminering van verschillende gekleurde n-Pasha cellen; figuur 1c: interconnectie van n-Pasha cellen in een module

Beschrijving van de behaalde resultaten, de knelpunten en het perspectief voor toepassing

Onderzoek gericht op de processen

Hoog rendement zonnecellen vereisen een lage totale recombinatie van ladingsdragers. Naast een hoogkwalitatieve bulk met lage recombinatieverliezen, betekent dit dat een uitstekende oppervlakte passivatie en lage recombinatie in gebieden met hoge dotering (emitter, BSF) evenals onder de metalen elektrodes benodigd zijn.

Door verbeterde boor-doteringsprofielen te combineren met geoptimaliseerde natte chemieprocessen en diëlektrische lagen kon de emitter recombinatieparameter J_{0e} gereduceerd worden van $>100 \text{ fA/cm}^2$ aan het begin van het project naar 40 fA/cm^2 tegen het eind van het project. Een uitstekende $J_{0e} < 50 \text{ fA/cm}^2$ is bereikt met NAOS/ SiN_x passivatie op booremitters met een oppervlakte dotering $R_{\text{sheet}} > 70 \text{ } \Omega/\text{sq}$. Deze emitterdiffusies hebben een R_{sheet} die goed gecontacteerd kan worden met reguliere "firing through" pasta's zoals in de reguliere cell processing in industrie gebruikelijk is. Voor een verdere J_{0e} -reductie is een hogere R_{sheet} nodig, in combinatie met een uitstekende emitterpassivatie. Dit kan bereikt worden met Al_2O_3 passivatie, zoals te zien is bij $200 \text{ } \Omega/\text{sq}$ samples met NAOS/ $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiN}_x$ passivatie waarmee waarden van 15 fA/cm^2 op gepolijste oppervlaktes werden behaald.

Wat betreft de achterkant van de cel is de focus verschoven van fosfor implantatie naar een gepassiveerd contact op basis van een tunneloxide met poly-Si. Dit resulteert in een uitstekende achterzijde ($J_{0\text{rear}} \sim 10 \text{ fA/cm}^2$ op

¹ Bifacial: cellen en modules die zowel licht dat op de voorzijde valt, als licht dat op de achterzijde van de cellen/modules valt kunnen omzetten in energie

gestructureerde oppervlakken), wat een totale $J_{0,\text{total}} < 50 \text{ fA/cm}^2$ mogelijk maakte voor halffabricaten van de n-type cel. Het werk aan dotering en passivatie heeft geleid tot een groot aantal wetenschappelijke publicaties en conferentiebijdragen.

Om hoog ohmige emitters en back surface fields (BSF) ($>90 \text{ ohm/sq}$) te kunnen contacteren is in het NChanted project gekozen voor een aanpak met een selectieve emitter en selectieve BSF. De selectieve emitter en de selectieve BSF regio's worden gemaakt door te starten met een diepe, hoge boor/fosfor dotering en door vervolgens $\sim 400\text{nm}$ van de gedoteerde Si oppervlakte weg te etsen om zo een ondiepe, laag gedoteerde emitter/BSF te creëren. Voor een aantal soorten masking inkt zijn lijndikte, chemische weerstand en verwijderbaarheid geëvalueerd. Door een selectieve emitter te combineren met een selectieve BSF kan een verbetering van 0.4% absoluut in cel rendement worden bereikt in vergelijking met het standaard n-Pasha proces met enkel een selectieve BSF.

Een verbeterd metallisatieontwerp, ontwikkeld op basis van industriële printmethodes, is getest in een aantal n-Pasha runs en dit heeft geleid tot rendementsverbeteringen van 0.2 tot 0.4% absoluut. De aanpassing in het metaalontwerp heeft ook het zilveragebruik aanzienlijk teruggebracht van zo'n 400 mg per cel in 2014 naar minder dan 300 mg eind 2015.

Een eleganter en mogelijk efficiënter metallisatieproces dat onderzocht is, is gebaseerd op gelijktijdige plating van contacten aan de voor- en achterkant van de wafer, na opening van de diëlektrische lagen met een laser. De eerste resultaten van gelijktijdige plating zijn zeer positief gebleken. Ontdekt is dat na de opstart het proces zowel op n-type als op p-type silicium even snel verloopt. Daarom is het verschil in dikte tussen n-type en p-type een constante. Bovendien was er nauwelijks sprake van ghost plating op de n-Pasha testcellen. Cel rendementen werden echter wel gelimiteerd door schade veroorzaakt door de laser. Een aantal verbeterde laserinstellingen werden vastgesteld met behulp van test(diode) structuren en zullen verder beoordeeld worden in het vervolgproject Antilope. Naar verwachting zal bifacial plating resulteren in een hoge ($\sim 50\%$) kostenbesparing dankzij de grote besparing op de zilverkosten.

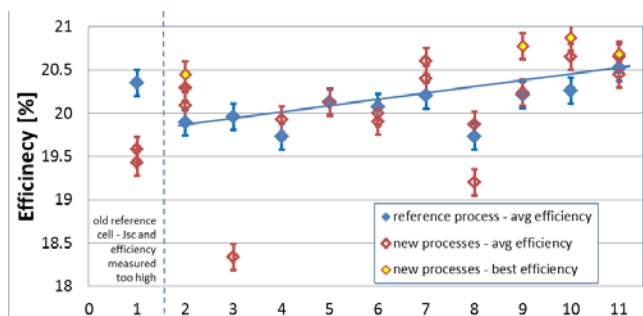
Integratie in n-Pasha zonnecellen- en modules

In de eerste twee jaar van het NChanted project heeft ECN verbeterde processen ontwikkeld in WP2 (dotering), WP3 (passivatie, optiek), WP4 (metallisatie) en WP5 (structurering) en doorgevoerd in het n-Pasha baselineproces, met als eindresultaat 20.7% (± 0.15) gemiddelde en 20,9 (± 0.15)% als hoogste celrendement. Het rendement van het referentie baselineproces is verbeterd van 19,9% naar gemiddeld 20,5 (± 0.1)%.

ECN heeft de cost of ownership (CoO) van de verschillende n-type processen die in het project zijn bestudeerd berekend op basis van input van de industriële processen van de partners. Significante kosten verlagingen voor het n-Pasha cel proces zijn gerealiseerd door het zilver verbruik sterk te verlagen, alsmede door een verhoogde doorvoer in de POCl_3 , BBr_3 en PECVD ovens, en uiteraard door de verhoging van het cel rendement. De CoO voor n-Pasha aan het begin van het project was 0.64 $\text{\$/Wp}$ (Wattpeak), dit is verlaagd tot onder de 0.60 $\text{\$/Wp}$ aan het eind van het NChanted project.

De proces kosten van het n-Pasha concept zijn nog steeds hoger dan die van de standaard p-type processen (zowel van de standaard Al BSF en de p-PERC cell process flows, die tussen de 0.55 en 0.57 $\text{\$/Wp}$ zijn). De grootste verschillen met de p-type cel processen zijn de kosten van de silicium wafers, alsmede de hogere zilver kosten en het BBr_3 gebruik.

Echter, als de n-Pasha modules voor bifacial² gebruik worden ingezet, en zowel de voorzijde als achterzijde opbrengst wordt meegeteld, zal de extra energie opbrengst (hogere Wp) resulteren in een significante verlaging van de kosten tot onder de 0.50 $\text{\$/Wp}$. Dit is ruim onder de kosten van beide concurrerende p-type concepten.



Figuur 2: verbetering van rendement in het baseline proces

² Bifacial: cellen en modules die zowel licht dat op de voorzijde valt, als licht dat op de achterzijde van de cellen/modules valt kunnen omzetten in energie



In het tweede jaar van het NChanted project is een route verkend en gedefinieerd richting 22% n-type cellen. De volgende verbeteringen zijn vastgesteld:

Voor I_{sc} : dubbellaagse anti-reflectiecoating, kleinere contact fractie en verbeterde optiek op moduleniveau. Voor de V_{oc} : diepe, laag gedoteerde emitter, kleinere contact fractie en n+ gepassiveerde contacten aan de achterkant. Andere conclusies/aanbevelingen zijn onder meer om door te gaan met het NiSi platingproces aangezien dit kan leiden tot een hogere I_{sc} en V_{oc} , en ook om onderzoek te starten naar de combinatie van hoog-ohmische/selectieve emitters met n+ type poly-silicium gepassiveerde contacten aan de achterkant.

Als de procesomstandigheden en eigenschappen van huidige zonnecelprocessen worden aangepast of nieuwe materialen of processtappen worden geïntroduceerd dient de betrouwbaarheid van de daaruit volgende modules (opnieuw) te worden bevestigd. Er zijn damp-heat en thermal cycle klimaatkamerexperimenten op n-Pasha cellen uitgevoerd. De n-Pasha passivatie/ARC lagen blijven stabiel onder de geteste damp-heat condities. Er is enige degradatie in thermal cycle opgemerkt als gevolg van ontwikkelingen in het metallisatiepatroon en de pasta's tijdens het project. Wel is gebleken dat de n-Pasha zonnecellen stabiel blijven bij blootstelling aan UV licht en hoge module spanningen (Potential induced).

Beschrijving van de bijdrage van het project aan de doelstellingen van de regeling (duurzame energiehuishouding, versterking van de kennispositie)

Het project heeft bijgedragen aan het verminderen van de kosten van hernieuwbaar geproduceerde elektriciteit. Dit is gedaan in de vorm van het ontwikkelen van een efficiënter *en* goedkoper zonnecel proces op n-type materiaal. Daarnaast is het ontwikkelde cel concept "bifacial", wat betekend dat de cellen en modules (zon)licht van zowel de voorzijde als achterzijde kunnen omzetten in elektriciteit. Hierdoor gaat niet alleen de opbrengst van deze panelen significant omhoog (15 – 30 %, afhankelijk van de reflectie van de omgeving), maar kunnen de panelen ook op diverse plaatsen worden ingezet die voorheen vanwege (N-Z, O-W) oriëntatie verre van optimaal waren. Hierbij kan gedacht worden aan geluidsschermen langs snelwegen, open facades van gebouwen, of PV modules op water waarbij de extra reflectie van zonlicht aan het water de opbrengst nog verder zal verhogen.

De partners hebben gezamenlijk veel kennis opgedaan op het gebied van cellen en modules gebaseerd op de n-Pasha architectuur. De n-Pasha cel is volledig gemodelleerd, en het model is gevalideerd aan diverse experimenten. Dit geldt ook voor de bifacial modules, waarbij de modellen tot op systeem niveau zijn uitgewerkt om de extra energie opbrengsten goed te kunnen berekenen. Het werk aan bifacial modules zal verder plaatsvinden in het TKI vervolg project Bing.

De project partners hebben op alle gebieden van processing nieuwe kennis opgedaan die gebruikt kan gaan worden voor het verder op de markt zetten van het n-Pasha concept. Daarnaast hebben de partners een route uitgestippeld voor het n-type proces van de toekomst, waarmee op goedkope wijze efficiënties van boven de 22% behaald kunnen gaan worden. Het onderzoek en de ontwikkeling van dit n-type concept zal verder plaatsvinden in het TKI vervolg project Antilope

Spin off binnen en buiten de sector

Binnen de PV sector kan de technologische bijdrage gemeten worden aan de hoeveelheid conferentie en peer-reviewed publicaties die zijn gedaan door de project partners. De lijst hiervan is onderaan dit rapport toegevoegd. Daarnaast staan bifacial zonnecellen en panelen sinds kort enorm in de internationale belangstelling, en de positieve resultaten die vanuit dit project zijn gepubliceerd hebben daar zeker aan gedragen.

Verschillende cel en module fabrikanten hebben aangegeven belangstelling te hebben voor de processen en cel/module concepten, en modellering methodes die door de partners zijn ontwikkeld in het NChanted project.

De kennis opgedaan in het project zou ook voor een deel interessant kunnen zijn voor andere toepassingsgebieden, bijv. de halfgeleider industrie, waar al een link is vanuit de marktgebieden van de industriepartners.



Overzicht van openbare publicaties over het project en waar deze te vinden of te verkrijgen zijn

Datum	Titel	Auteurs	Conferentie / medium
2-5-2016	Contacting High ohmic boron emitters with screen print paste on n-Pasha	Kossen,E.J.	metallization workshop, Konstanz, 2 May 2016
1-3-2016	Extraction of recombination properties from lifetime data	Gaby J.M. Janssen, Yu Wu, Kees C.J.J. Tool, Ingrid G. Romijn and Andreas Fell	Silicon PV conference, Chambéry, France (2016) (poster & paper)
14-9-2015	Selective emitter in n-type c-Si solar cells	J. Liu, G.J.M. Janssen, M. Koppes, E. J. Kossen, K. Tool, Y. Komatsu, J. Anker, A. Gutjahr, A. Vlooswijk, J. M. Luchies, O. Siareyeva, E. Granneman, I. Romijn	EU PVSEC, Hamburg, Germany, 2015 (poster)
14-9-2015	Light trapping film for bifacial applications	Bas B. van Aken, John A.M. van Roosmalen, Lars A.G. Okel, Ingrid G. Romijn, Gaby J.M. Janssen, Milica Mrcarica, Kurt Du Mong, Marnix Rooijmans and Christian Panofen	EU PVSEC, Hamburg, Germany, 2015 (oral)
27-7-2015	“Zero-charge” SiO ₂ /Al ₂ O ₃ stacks for the simultaneous passivation of n+ and p+ doped silicon surfaces by atomic layer deposition	B.W.H. van de Loo, H.C.M. Knoop, G. Dingemans, G.J.M.Janssen, M.W.P.E. Lamers, I.G. Romijn, A.W.Weeber, W.M.M. Kessels	Solar Energy Materials & Solar Cells, issue 143 (2015), p. 450–456
1-7-2015	Input parameters for the simulation of silicon solar cells in 2014	Fell, A.; McIntosh, K.R.; Altermatt, P.P.; Janssen, G.J.M.; Stangl, R.; Ho-Baillie, A.; Steinkemper, H.; Greulich, J.; Muller, M.; Min, B.; Fong, K.C.; Hermle, M.; Romijn, I.G.; Abbott, M.;	IEEE Journal of Photovoltaics, 5 (4). pp. 1250 - 1263 (2015)
22-6-2015	Boron-doped silicon surfaces from B ₂ H ₆ passivated by ALD Al ₂ O ₃ for solar cells	Mok, K.R.C. (Caroline) and Loo, Bas W.H. van de and Vlooswijk, Ard H.G. and Kessels, W.M.M. (Erwin) and Nanver, Lis K.	IEEE Journal of Photovoltaics, 5 (5). pp. 1310-1318. ISSN 2156-3381 (2015)
26-3-2015	From n-Pasha to n-MWT	Romijn, I.G.	n-PV workshop, Konstanz, 26 March 2015
23-3-2015	Outdoor performance of bifacial modules by measurements and modelling	Gaby J.M. Janssen, Bas B. Van Aken, Anna J. Carr, Agnes A. Mewe	Silicon PV conference, Konstanz, 24 March 2015 (oral & paper) Energy Procedia, 2015, Ed77, p364-373
23-3-2015	Understanding and reducing charge-carrier recombination at passivated and highly-doped Si surfaces	B.W.H. van de Loo, S. Smit, G.J.M. Janssen, I.G. Romijn, M. Koppes, Y. Komatsu, J. Liu, A.W. Weeber, W.M.M. Kessels	Silicon PV conference, Konstanz, 24 March 2015 (oral & paper)
22-9-2014	Front side improvements for n-Pasha solar cells	Janssen, G.J.M.; Koppes, M.; Komatsu, Y.; Anker, J.; Liu, J.; Gutjahr, A.; Mewe, A.A.; Tool, C.J.J.; Romijn, I.G.; Siarheyeva, O.; Ernst, M.A.; Loo, B.H.W. van de; Kessels, W.M.M.	EU PVSEC, Amsterdam, NL, 2014 (poster)



20-9-2014	The potential advantage of industrially processed boron emitters compared to phosphorus emitters	Komatsu, Y.; Vlooswijk, A.H.G.; Venema, P.; Romijn, I.G.	Energy Procedia, 2014, Vol55, p241-246
1-9-2014	Improvements in advanced industrial n-type solar cells and modules	Romijn, I.G.; Aken, B.B. van; Anker, J.; Bennett, I.J.; Geerligts, L.J.; Guillevin, N.; Gutjahr, A.; Kossen, E.J.; Koppes, M.; Tool, C.J.J.; Renes, M.; Venema, P.; Ommen, N. van; Bakker, J.;	Photovoltaics International (PV-Tech), Sept 2014, Ed. 25, p58-68
1-8-2014	Advanced front-surface passivation schemes for industrial n-type silicon solar cells	Bas van de Loo, Gijs Dingemans, Ernst Granneman, Ingrid Romijn, Gaby Janssen and Erwin Kessels	Photovoltaics International, volume 24, July 2014
20-5-2014	Towards 21%: front side improvements for n-Pasha cells	Romijn, I.G.; Janssen, G.J.M.; Koppes, M.; Liu, J.; Komatsu, Y.; Gutjahr, A.; Kossen, E.J.; Mewe, A.A.; Tool, C.J.J.; Siarheyeva, O.; Ernst, M.A.	SNEC, Shanghai, China, May 2014 (oral)

Media exposure:

11-4-2016	Press release on floating bifacial panels at the Innovation Expo Amsterdam		Several media, ECN website, Solar magazine
14-4-2016	Floating panels based on n-Pasha cells at the technology Innovation expo Amsterdam		Innovation expo Amsterdam
30-6-2014	n-Pasha zonnecel in 2015 naar 22% rendement		Solar Magazine
1-3-2014	Topsectorenbeleid levert achttien nieuwe solar innovatieprojecten op		Solar Magazine

Meer exemplaren van dit rapport

Meer exemplaren van dit rapport kunnen digitaal worden verkregen via het hieronder genoemde contact.

Contact voor meer informatie

Meer informatie over dit project kan verkregen worden via:

- De heer Jan-Marc Luchies, Tempres Systems B.V., e-mail: jmluchies@tempres.nl
- Mevrouw Ingrid Romijn, ECN, e-mail: romijn@ecn.nl

Subsidie

Het project is uitgevoerd met subsidie van het Ministerie van Economische Zaken, Subsidieregeling energie en innovatie (SEI), Topsector Energie uitgevoerd door Rijksdienst voor Ondernemend Nederland.