



# Openbaar eindrapport HT-SOHO

---

## Gegevens project

- Projectnummer: TEUE117010
- Projecttitel: HT-SOHO
- Penvoerder en medeaanvragers: TU Delft, TNO, Tempres
- Projectperiode: 01-01-2018 t/m 31-03-2020
- Publicatiedatum openbaar rapport: 15 July 2020



## Samenvatting van uitgangspunten, doelstelling en samenwerkende partijen

In de afgelopen jaren is de ontwikkeling van hoogrenderende zonnecellen in de PV-industrie verschoven naar celstructuren met dragerselectieve passiverende contacten, vanwege hun uitstekende passiveringskwaliteit en hoge dragerselectiviteit (selectiviteit per polariteitstype). Het is aangetoond dat zonnecellen met de poly-Si gebaseerde passiverende contacten een record-hoog omzettingsrendement kunnen behalen. Dit type van passiverende contacten is echter niet transparant voor een relevant deel van het zonnenspectrum, wat leidt tot optische verliezen. In dit project ontwikkelen we minder absorberende passiverende contacten door ofwel zuurstof te legeren in de poly-Si ( $\text{poly-SiO}_x$ ) ofwel poly-Si heel dun te maken, met behoud van hun uitstekende passiveringskwaliteiten. Daarnaast zetten we deze ontwikkelde passiveringscontacten in zowel hoogrenderende lab-schaal als industrie-compatibele procesmatig gefabriceerde grootschalige zonnecellen in. Om deze doelstellingen te bereiken werken TUDelft, TNO en Tempres samen bij het onderzoek naar dit onderwerp.

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

De ontwikkeling van het project heeft geleid tot de succesvolle ontwikkeling van  $\text{poly-SiO}_x$  gebaseerde passiverende contacten en ultradunne poly-Si passiverende contacten. Er werden uitstekende passiveringskwaliteiten en een lage contactweerstand van deze materialen bereikt. Het project onderzocht de structurele, elektrische en optische aard van nieuwe gedoteerde  $\text{poly-SiO}_x$ -lagen en hun passiveringsprestaties. De combinatie van hoge temperatuurstabiliteit enerzijds en verbeterde transparantie anderzijds geeft deze lagen een belangrijk voordeel ten opzichte van bestaande silicium-gebaseerde passiveringscontacten. Hierdoor zijn de c-Si zonnecellen met een hoog rendement (21.5%) compatibel met vereenvoudigde, goedkope metallisatiestappen in de industrie, terwijl ze hoge kortsluitstroomwaarden ( $J_{SC,max} = 40.8 \text{ mA/cm}^2$ ) en een hoge open-circuit spanning (bijna 700 mV) combineren. Cruciaal voor deze prestatie was de samenwerking tussen TU Delft, Tempres, TNO op het gebied van de laagontwikkeling en nieuwe karakteriseringen.

**Over de ontwikkeling van minder absorberende passiverende contacten:** Om de optische verliezen in de zonnecellen met poly-Si gebaseerde passiverende contacten te minimaliseren, is de ene benadering het gebruik van meer transparante passiverende contacten, terwijl de andere benadering het minimaliseren van hun dikte is. In dit project hebben we beide benaderingen ontwikkeld. Eerst werden de poly-Si lagen gelegeerd met zuurstof om  $\text{poly-SiO}_x$  lagen te vormen. Er werden drie belangrijke fabricatieroutes voor zowel n-type als p-type doping getest: (i) gelijktijdig in-situ legering en doping (PECVD route), (ii) in-situ legering, ex-situ doping (LPCVD route), en (iii) ex-situ legering, ex-situ doping (LPCVD route). Met de focus op de ontwikkeling van  $n^+$   $\text{poly-SiO}_x$  passiverende contacten, paste Tempres hun LPCVD-buisovens aan voor de in-situ gelegeerde  $\text{poly-SiO}_x$ -lagen optimalisatie. TNO en Tempres bestudeerden de invloed van O-gehalte en dopingniveaus in de  $\text{poly-SiO}_x$ -lagen. Tegelijkertijd werd het waterstofgehalte op de dragerselectiviteit en de passiveringseigenschappen onderzocht. Met deze aanpak werd een uitstekende passiveringskwaliteit bereikt. De TU Delft ontwikkelde ook de PECVD-route voor de fabricage van in-situ gelegeerde en gedoteerde  $n^+$   $\text{poly-SiO}_x$  passiveringscontacten. Met de PECVD-route werd een  $iV_{oc}$ -waarde tot 740 mV bereikt. Bij de ontwikkeling van  $p^+$   $\text{poly-SiO}_x$  lagen heeft de TU Delft ook de PECVD route voor fabricage ontwikkeld, door het optimaliseren van de O legeringsconcentratie, doping en groeiomstandigheden. Ook werd een hoge passiveringskwaliteit bereikt voor  $p^+$   $\text{poly-SiO}_x$  passiveringscontact met  $J_0 \sim 15 \text{ fA/cm}^2$ . Om het effect van onderliggende pre-doping van het c-Si bulkoppervlak op de passiveringskwaliteit van de passiveringscontacten en de daaropvolgende zonnecelprestaties te bestuderen, hebben zowel TNO als de TU Delft de passiveringskwaliteitsvariatie voor teststructuren met en zonder het voorgediffundeerde c-Si oppervlak vergeleken. De conclusie is dat als er onderliggende pre-doping van het c-Si oppervlak wordt toegepast, de passiveringskwaliteit afneemt door de Auger recombinatie en door de verzwakte veldeffectpassivering op de raakvlakken. Er wordt echter een lagere contactweerstand bereikt. Tot slot is ook ultradun poly-Si met een dikte tot 8 nm ontwikkeld, waarbij het  $\text{POCl}_3$ -dopingproces een uitstekende passiveringskwaliteit vertoont ( $iV_{oc} > 725 \text{ mV}$ ). Zonnecellen met ultradun poly-Si (~20 nm) voor zowel de  $n^+$  als de  $p^+$  contacten zijn gefabriceerd via de in-situ gedoteerde PECVD route, resulterend in een zeer hoog passivatie-niveau (tot 710 mV implied  $V_{oc}$ ) op het getextureerde waferoppervlak.

**Over zonnecelmodellering:** Geavanceerde karakteriseringstechnologieën werden gebruikt om de optische en elektrische eigenschappen van de ontwikkelde  $\text{poly-SiO}_x$ -passiverende contacten te meten. Het belangrijkste is dat de parasitaire absorptie van de drager van het  $\text{poly-SiO}_x$  passiverende contact lager is dan het poly-Si passiverende contact. Dit toont de optische voordelen van de ontwikkelde  $\text{poly-SiO}_x$  passiverende contacten aan. Met de gemeten optische



en elektrische parameters van de poly-SiO<sub>x</sub> passiverende contacten werd de Sentaurus TCAD tool gebruikt om de belangrijkste verliesmechanismen in celstructuren met de gedoteerde poly-SiO<sub>x</sub> laag (lagen) in te schatten. Het simulatieplatform omvatte de state-of-the-art modellen om de fysische mechanismen van de zonnecellen te evalueren, met de nadruk op het transport door energiebarrières op hetero-interfaces. De simulatieresultaten geven richtlijnen voor de route om het rendement van de zonnecellen boven de 23% te brengen met de toepassing van poly-SiO<sub>x</sub> als passiverende contacten.

**Over het zonnecelproces:** Verschillende metallisatieprocessen zijn door de TU Delft en TNO toegepast om werkende zonnecellen te demonstreren. Dit omvat zeefdrukken van lage temperatuur Ag pasta, fire-through hoge temperatuur pasta, en PVD depositie van Ag en Al. Met de geoptimaliseerde poly-SiO<sub>x</sub> laag als passiverend contact, werd op laboratoriumschaal op zonnecellen met een voor- en achterzijdecontact een rendement van 21.5% bereikt. De procesvolgorde voor 6-inch cellen werd ontwikkeld en getest door TNO en Tempres.

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

Technisch gezien heeft dit project gemakkelijk te verwerken passiverende contacten ontwikkeld, die de dikke en sterk absorberende poly-Si passiverende contacten voor hoogrenderende zonnecellen kunnen vervangen. Als gevolg hiervan draagt het realiseren van de doelstellingen van het project mogelijk bij aan het verminderen van de kosten van duurzame elektriciteit en draagt het, wanneer cellen en modules op basis van onze technologie commercieel beschikbaar komen, bij aan een lagere uitstoot van koolstofdioxide.

De belangrijkste innovaties van HT-SOHO waren:

- Het scannen van de fabricatieroutes op de fabricatie van de poly-SiO<sub>x</sub> passiverende contacten die kennis opbouwen over de meest veelbelovende technieken voor de c-Si zonneceltoepassingen;
- De uitstekende passiveringskwaliteiten van de poly-SiO<sub>x</sub> en ultradunne poly-Si passiveringscontacten;
- De bijdrage aan de materiaalkunde met poly-SiO<sub>x</sub>-materialen die optisch, elektrisch en structureel gekarakteriseerd worden;
- De inzet van TCAD-gebaseerd opto-elektrisch model voor de simulatie van zonnecellen met poly-SiO<sub>x</sub>-passiverende contacten;
- De opgedane kennis over de metallisatiestap voor poly-SiO<sub>x</sub>-gebaseerde passiverende contacten;
- De ervaring en kennis over het bereiken van > 21.5% rendement zonnecellen met de ontwikkelde passiverende contacten;
- De ervaring en kennis van de industrialisatie van de ontwikkelde technologie.

De resultaten zijn met alle projectpartners besproken tijdens acht consortiumvergaderingen (face to face gesprekken en telefonische vergaderingen). Het project resulteerde in twee peer-reviewed tijdschriftartikelen, twee extra tijdschriftartikelen in voorbereiding en twee bijdragen aan internationale conferenties (beide mondelinge presentaties).

### Spin off binnen en buiten de sector

De aanpak van het vervaardigen van de hoog-passiverende kwaliteit laag-absorberende passiverende contacten heeft de aandacht van de grote PV-fabrikanten getrokken. De kennis wordt overgedragen aan een ander lopend project, Saturnia.

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

Datum	Titel	Auteurs	Conferentie / medium
December 2018	Poly-Si alloys carrier-selective passivating contacts for high-efficiency c-Si solar cells	G. Yang, G. Limodio, P. Procel, L. Mazzarella, A. Weeber, O. Isabella, M. Zeman	MRS fall, 2018, oral presentation



May 2018	Poly-crystalline silicon-oxide films as carrier-selective passivating contacts for c-Si solar cells	G. Yang, P. Guo, P. P. Moya, A. Weeber, O. Isabella, M. Zeman	Applied Physics Letter
June 2018	High efficiency c-Si solar cells with polysilicon and poly-silicon oxide as carrier-selective passivating contacts	G. Yang, P. Guo, P. P. Moya, G. Limodio, A. Weeber, O. Isabella, M. Zeman	Solar Energy Materials and Solar Cells
June 2019	Ultra-thin poly-Si passivating contacts for c-Si solar cells	G. Yang, P. Procel, C. Han, L. Mazzarella, M. Singh, A. Weeber, O. Isabella, M. Zeman	PVSEC 29 <sup>th</sup> , (2019), oral presentation

### Meer exemplaren van dit rapport

Meer exemplaren van dit rapport zijn digitaal te verkrijgen via de website [www.rvo.nl](http://www.rvo.nl).

### Contact voor meer informatie

Meer informatie over dit project kan verkregen worden via:

- de heer Olindo Isabella, TUDelft., e-mail: [o.isabella@tudelft.nl](mailto:o.isabella@tudelft.nl)

### Subsidie

Het project is uitgevoerd met subsidie van het Ministerie van Economische Zaken en Klimaat, Nationale regelingen EZ-subsidies, Topsector Energie uitgevoerd door Rijksdienst voor Ondernemend Nederland