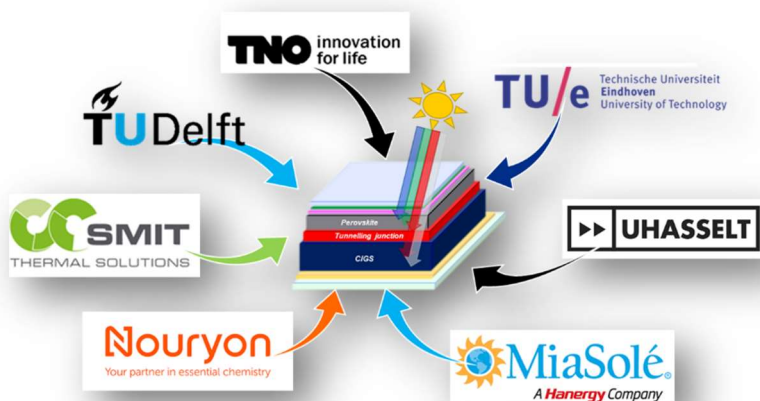
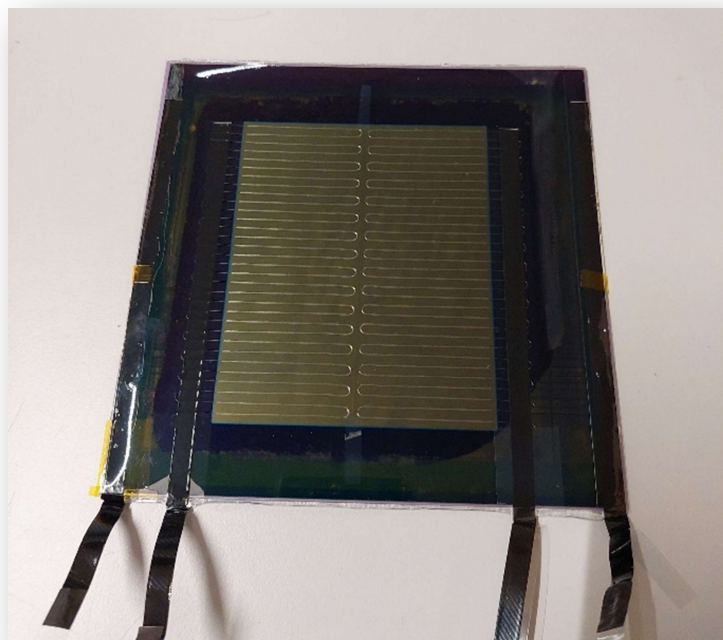


Openbaar verslag

Flexible Large area 2T monolithic Tandem PSC-CIGS (LAFLEX2T)



Het project LAFLEX2T is uitgevoerd met subsidie van het Ministerie van Economische Zaken en Klimaat en het Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit, Nationale regelingen EZK- en LNV-subsidies, Topsector Energie uitgevoerd door Rijksdienst voor Ondernemend Nederland.

Samenvatting van de uitgangspunten en de doelstelling van het project en de samenwerkende partijen;

Het hoofddoel van Laflex2T is het demonstreren van de fabricage van een efficiënte flexibele monolithische dunne-film 2T PSC-CIGS-tandemarchitectuur op een groot oppervlak van ten minste 80 cm², wat 2000 keer groter is dan de grootste perovskite/CIGS tandem cel op glas en 400 keer groter dan werk op polyimidesubstraat bij de start van het project. Bovendien zal een architectuur worden ontwikkeld op basis van depositiemethoden die overdraagbaar zijn op industriële productieapparatuur. Uitgaande van het CIGS-platform bij MiaSolé, zal de perovskiet zonnecel (PSC) worden gedeponeerd als een extra component om de energieconversie-efficiëntie van de zonnecel te verhogen. Het ontwerp van de twee terminal (2T)-architectuur zal worden uitgevoerd op basis van de volgende innovaties voor 2T-configuratie:

Een flexibel perovskiet zonnecel met een absorber bandkloof van ten minste 1,55-1,65 eV zal worden geoptimaliseerd in termen van stroomopwekking, transparantie in het nabije infra-rood (NIR), waardoor het potentiële parasitaire verlies van de bij lage temperatuur gedeponeerde ladingstransport laag en de bovenste TCO-laag wordt verminderd. De depositie van de perovskiet stack over een groot oppervlak zal worden uitgevoerd door middel van sheet-to-sheet slot die coating. Engineering van R2R-compatibele perovskiet-inkt zal worden nagestreefd in combinatie met nieuwe specifieke droogcondities. Er zal worden onderzocht of een "ad-hoc"-quench methode kan worden toegepast in plaats van de vacuüm quench of een oplosmiddeltechniek vanwege een betere compatibiliteit van gas quenching met toekomstige R2R-productielijnen.

CIGS-ontwikkelingwerk zal zich richten op het genereren van cellen met **nauwere bandkloof (bij benadering 1,0 eV)** met behoud van een hoog rendement, wat zal worden bereikt door optimalisatie van alkalibehandelingen, afstemming van CIGS-samenstelling (inclusief optimalisatie van Ag-legeringen), evenals algehele procesoptimalisatie. Optimalisatie van de absorberruwheid zal deel uitmaken van het algehele CIGS-optimalisatieproces.

Een volledige atomaire laag depositie **(ALD)-tunnelverbinding tussen de twee subcellen** zal grondig worden ontwikkeld en gekarakteriseerd. ALD is geselecteerd vanwege zijn unieke uniformiteit en dekkingsmogelijkheden op grote oppervlakken met aanzienlijke ruwheid. Verschillende materialen worden overwogen om de serieschakeling te optimaliseren. De onderzochte oplossingen zullen worden vergeleken met meer traditionele sputterlagen zoals transparante geleidende oxiden met aangepaste werkfunctie. Gedeeltelijke combinaties daarvan zullen ook worden beoordeeld.

Naast de **elektrische simulaties** en experimentele validatie, zal de relatie tussen de ruwheid van de CIGS-bodemcel, de recombinatieovergang en de fabricage van de PSC systematisch worden onderzocht.

Lichtmanagement en optimalisatie van anti-reflectie coating (ARC) zullen systematisch worden bestudeerd met betrekking tot de optische generatie in de onderste cel voor het leveren van stroomafstemming tussen de twee subcellen met een redelijke dikte.

Ten slotte zal een **flexibele verpakkingoplossing** worden getest om de initiële stabiliteit van de nieuwe architectuur te beoordelen

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

Het hoofddoel van Laflex2T is het demonstreren van de fabricage van een efficiënte flexibele monolithische dunne-film 2T PSC-CIGS-tandemarchitectuur op een groot oppervlak van ten minste 80 cm²

In het project zijn werkende perovskiet/CIGS tandem cellen gerealiseerd met een oppervlak van 85 cm², zie ook figuur 1 hieronder. De cellen zijn gemaakt met industrieel schaalbare processen. Deze demonstrator heeft een conversie efficiëntie van 9,8 %.

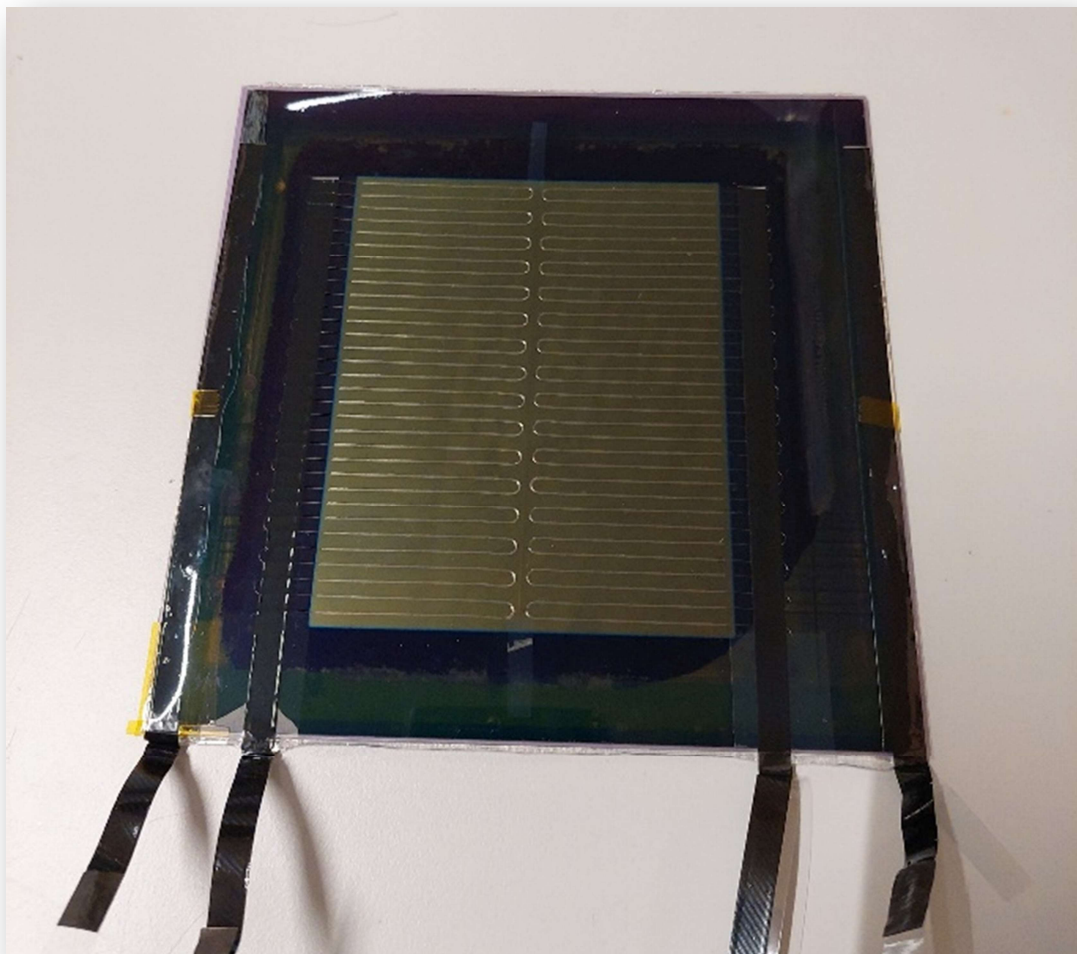
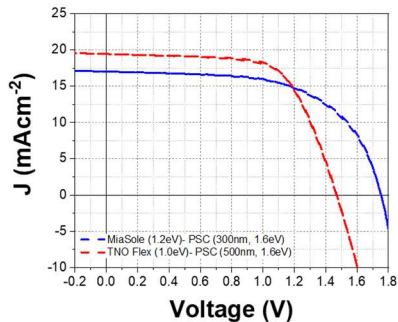


Fig. 1 Werkende flexibele perovskiet/CIGS hybride tandem demonstrator.

Figuur 2 laat een stroomdichtheid - spannings (JV) metingen zien van twee verschillende perovskiet/CIGS twee terminal tandem cellen zien. Beide cellen halen tussen de 18 en 19% efficiëntie. Deze efficiëntie is hoger dan behaald wordt met de afzonderlijke sub-cellen van de tandem.

De blauwe kromme is gemeten aan een tandem op basis van een CIGS cel van MiaSole. De MiaSole cel heeft een relatief brede bandkloof van 1.2 eV. De rode curve is gemeten aan een tandem cel die opgebouwd met een CIGS cel van TNO. Deze bodem cel heeft een bandkloof van 1.0 eV.



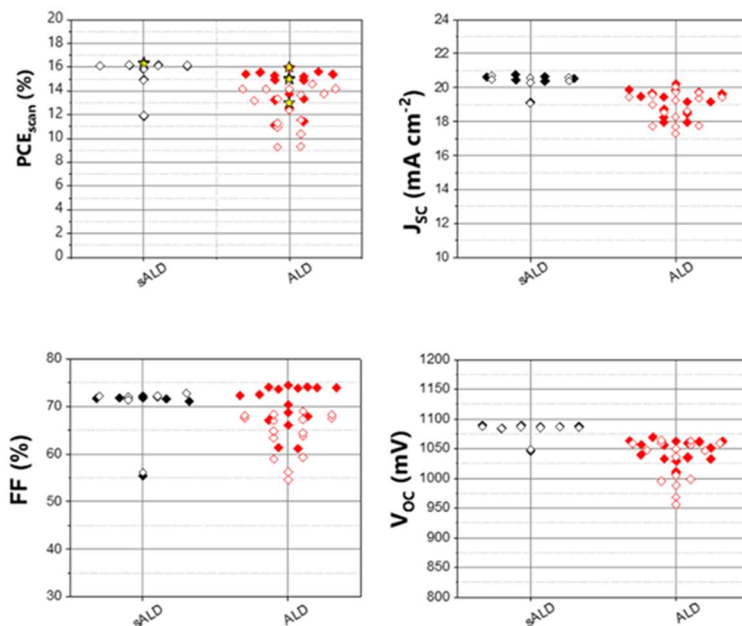
Code	Scan	J_{sc} (mAcm ⁻²)	V_{oc} (mV)	FF (%)	PCE (%)	MPPT (%)
Miasole	RV	17.0	1753	59.7	17.8	18.0
	FW	17.0	1753	60.5	18.0	
TNO	RV	19.4	1470	66.0	18.9	18.9
	FW	19.4	1470	65.6	18.7	

Fig. 2 Stroom-spanning (JV) kromme van flexibele perovskiet/CIGS tandem cellen en de JV parameters van de cellen. De tandemcellen in figuur 2 hebben verschillende CIGS bodem cellen. In blauw is een tandem weer gegeven met een CIGS cel van project partner MiaSole (bandkloof 1.2 eV); in rood, een CIGS bodem cel gemaakt door TNO met een lagere bandkloof van 1.0 eV.

Verdere optimalisatie van deze tandem cellen heeft er toe geleid dat flexibele perovskiet-CIGS tandem cellen (oppervlak tot 1.44 cm²) gemaakt zijn met rendementen van meer dan 20%. Na afloop van het project zijn deze cellen naar een calibratie instituut verstuurd om een onafhankelijke bevestiging van de meting te verkrijgen.

Flexibel perovskiet zonnecel met een absorber bandkloof van ten minste 1,55-1,65 eV

Deze doelstelling is gehaald met een perovskiet formulering die resulteert in perovskiet absorber lagen met een bandkloof van 1.6 eV. De cellen kunnen met schaalbare processen gemaakt worden op basis van industrieel relevante inkt systemen. Ook het quench proces waarmee de kristal structuur van de perovskiet absorberlaag gestuurd wordt, is uitgevoerd met een schaalbaar proces.



Figuur 3 JV Parameters van (enkelvoudige) perovskiet cellen gemaakt met ruimtelijke ALD (sALD) of conventionele, op vacuüm gebaseerde SnO₂ ALD laag. De band kloof van de perovskiet cel is 1.6 eV.

CIGS met nauwere bandkloof (bij benadering 1,0 eV)

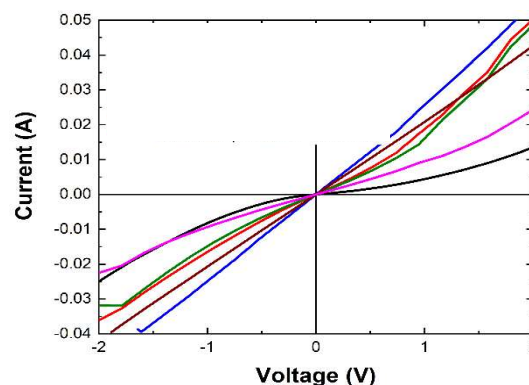
In het project hebben MiaSole en TNO gewerkt aan verschillende CIGS bodem cellen. Het doel daarbij was het verlagen van de band kloof van CIGS zonder aanzienlijke efficiëntie verliezen. Figuur 2 hierboven laat tandem cellen zijn op basis van twee verschillende CIGS bodem cellen en identieke perovskiet topcellen. Duidelijk is dat de open klem spanning van de tandem cellen niet gelijk is. Dit kan (deels) verklaard worden door het 0,2 eV verschil in bandkloof van de bodem cellen.

Daardat de bandkloof van de CIGS cel van MiaSole relatief breed is, moet de perovskiet absorber laag in de top cel heel dun zijn, anders genereert de bodem cel onvoldoende stroom en wordt daarmee limiterend. De tandem op basis van de CIGS met een nauwere band kloof (1.0 eV) resulteert in een lagere open klem spanning, maar een aanzienlijk hogere stroom en vulfactor waardoor deze cel uiteindelijk efficiënter is. Elektrische en optische modellen zijn gebruikt om de afzonderlijke cellen te optimaliseren.

ALD-tunnelverbinding tussen de twee subcellen

In het project zijn diverse tunnel recombinatie verbindingen getoetst. Zo is er gewerkt met organische halfgeleiders zoals PEDOT:PSS en PTAA, maar ook met anorganische materialen. Het is gelukt om goed werkende tunnel verbinding te maken op basis van p-type en n-type metaaloxides gedeponereD met ALD. In het ideale geval gedraagt zo'n recombinatie verbinding tussen twee cellen zich als een Ohms contact. Figuur 4 laat de JV-kromme van verschillende recombinatie verbindingen zien. De blauwe curve benadert het gedrag van een Ohms contact.

Om dit resultaat te bereiken zijn verschillende metaaloxides gecombineerd zoals SnO_2 , ZnO en NiO . Om de energie niveaus van de metaaloxides onderling goed uit te lijnen is de dotering van de metaaloxides gevarieerd.



Figuur 4 JV curven van recombinatie tunnel verbindingen op basis van verschillende metaaloxides, gedeponereerd via ALD.

Elektrische simulaties

Voor het begrijpen, ontwikkelen en optimaliseren van (hybride) tandem zonnecellen zijn elektrische en optische modellen belangrijk. Met behulp van deze modellen kan bepaald worden of de cel optimaal of sub-optimaal functioneert. Ook kan een model helpen om verliezen te identificeren en zo het onderzoek doelgericht in te zetten op het minimaliseren van de belangrijkste verlies factoren. Ten slotte is het mogelijk om in kaart te brengen welke rendementen haalbaar zijn voor een specifieke combinatie van subcellen en recombinatie laag.

In het project is er zowel een elektrisch model als een optisch model van de tandem cellen gemaakt. Met behulp van het elektrische model is inzicht verkregen in het functioneren en optimaliseren van onder andere de tunnel recombinatie juncties. Uit dit werk is onder andere gebleken dat het gebruik van PEDOT:PSS als p-type halfgeleider materiaal in combinatie met n-type materialen zoals ZnO of SnO₂, zal leiden tot aanzienlijke energie verliezen. Er is daarom gekozen voor andere materiaal combinaties. Verder heeft het model inzicht gegeven in het type recombinatie proces: band naar band recombinatie of recombinatie via onvolkomenheden (traps) in het bandstructuur. Het model heeft geholpen om materiaal combinaties te vinden die band naar band recombinatie mogelijk maken.

Lichtmanagement en optimalisatie van anti-reflectie coating (ARC)

In twee terminal tandem cellen is het belangrijk dat beide sub cellen in even veel stroom genereren wanneer de cel belicht wordt met het standaard zonlicht spectrum. Een optisch model helpt om kwantitatief te bepalen hoeveel van het spectrum in een bepaalde laag geabsorbeerd wordt. Door laagdiktes van absorber lagen te variëren is het in principe mogelijk om te sturen op de hoeveelheid zonnestroom die gegenereerd wordt in de twee afzonderlijke subcellen. Het afstemmen van de stroomdichtheden in tandems is echter complex omdat de licht absorptie ook afhankelijk is van parasitaire absorptie in andere lagen van de tandem en er bovendien interferentie optreedt aan grensvlakken in de cel. De absorptie in de perovskiet laag, de CIGS laag, parasitaire absorptie en het interferentie patroon is weer afhankelijk van de gekozen materialen en de laagdiktes. Het optimaliseren van de complete tandem is daarom zo complex dat een model nodig is om richting te geven aan het optimalisatie proces.

Het model berekend ook hoeveel licht er gereflecteerd wordt aan grensvlakken waaronder het grensvlak met lucht. Reflectie aan het lucht/cel grensvlak is een belangrijke verliespost. Zonder maatregelen kunnen hier enkele milli-ampères per vierkante centimeter verloren gaan (op een maximum van ongeveer 20 mA/cm²). In het project is MgF₂ met een geoptimaliseerde laagdikte toegepast om reflectie verliezen te minimaliseren.

Door het combineren van het elektrische en optische model kon er een route beschrijving gemaakt worden voor het optimaliseren van de perovskiet-CIGS tandemcel. Voor de specifieke combinatie zijn rendementen van meer dan 25% mogelijk.

Flexibele verpakkingsooplossing

De getoonde module in Figuur 1 is beschermd door barriere folies. Deze folies zijn aangebracht met een vacuüm laminatie proces. Een encapsulant is toegepast om de cel te verbinden met de beschermfolie. De ingepakte tandem cel bleef maanden stabiel onder indoor condities.

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

Dit project heeft een belangrijke bijdrage geleverd aan de ontwikkeling van flexibele perovskiet/CIGS tandem cellen. Deze technologie maakt het mogelijk om aanzienlijk hogere efficiënties te bereiken dan mogelijk is met enkelvoudige junctie cellen. Hiervoor zijn nieuwe materialen en formuleringen ontwikkeld, zijn recombinatie verbindingen ontwikkeld en toegepast, is een elektrisch en optisch model gerealiseerd en zijn schaalbare depositie processen toegepast om een werkende demonstrator

te maken. De beste flexibele perovskiet/CIGS tandem cellen met een oppervlak van 1,44 cm² halen rendementen van meer dan 20%.

De afgelopen jaren zijn perovskiet zonnecellen sterk in opkomst. Er zijn kleine, rigide, enkelvoudige junctie laboratorium cellen met efficiënties van meer dan 25% behaald. Ook zijn er inmiddels rigide perovskiet tandem cellen gemaakt met een efficiëntie van meer dan 27% en berekeningen laten zien dat aanzienlijk hogere efficiënties mogelijk zijn. Deze ontwikkelingen laten zien dat de efficiëntie van flexibele dunne film zonnecellen nog aanzienlijk verbeterd kunnen worden. Dit maakt nieuwe toepassingen mogelijk, kan de energie terugverdientijd verlagen en de afhankelijkheid van kritische ruwe materialen verlagen.

Flexibele zonnecellen kunnen geïntegreerd worden in producten waar integratie van kristallijn silicium moeilijk is. Goed geïntegreerde producten kunnen esthetische oplossingen bieden die het draagvlak voor duurzame energie niet ondermijnen. Bovendien kunnen geïntegreerde oplossingen stroom opwekken nabij het gebruik van de opgewekte energie.

In huidige perovskiet tandem zonnecellen is de bodem zonnecel vaak zeer gevoelig voor oxidatie processen. Blootstelling aan lucht moet daarom voorkomen worden. Dit maakt fabricage duurder en toepassing risico voller. De perovskiet topcel met een bandkloof van 1.6 eV is aanzienlijk stabiel en nagenoeg ongevoelig voor blootstelling aan de lucht tijdens het fabricage proces.

Voor de ontwikkeling van flexibele tandem zonnecellen ligt het daarom voor de hand om de bestaande en bewezen CIGS technologie toe te passen als bodem cel tot het moment dat er een betere technologie beschikbaar komt.

[Spin off binnen en buiten de sector](#)

Gedurende de projectperiode zijn er geen spin-off ontstaan uit dit specifieke project. Wel zijn er bedrijven in de regio die zeer veel belangstelling hebben in (geïntegreerde) dunne film PV technologie.

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

Er zijn nog geen publicaties van het project. Er is wel een manuscript geschreven dat binnenkort ingediend gaat worden.

[Vermelding waar meer exemplaren van dit rapport te bestellen zijn](#)

Een kopie van het verslag kan aangevraagd worden door een mail te sturen naar Sjoerd Veenstra e-mail adres: sjoerd.veenstra@tno.nl

[Vermelding van contactpersoon \(personen\) voor meer informatie](#)

Voor meer informatie kunt u contact opnemen met Sjoerd Veenstra (TNO).