

Openbaar eindrapport TKI Urban Energy project BC-tandem

Inleiding en achtergrond

De tegenwoordige zonnepanelen worden hoofdzakelijk gemaakt met zonnecellen op basis van silicium *wafers*: dunne plakken silicium van hoge kwaliteit. Daarmee kan een rendement (d.w.z. het rendement van de omzetting van de energie in het zonlicht naar elektrische energie) bereikt worden van ca. 25%. Dat rendement wordt begrensd door de materiaaleigenschappen van de halfgeleider silicium tot een waarde onder de 30%.

Een hoger rendement heeft aanzienlijke voordelen: minder benodigd oppervlak, en minder kosten gerelateerd aan oppervlak, zoals installatiekosten (voor bijv. materiaal en personeel). Daarom vindt er al enkele jaren bijzonder veel onderzoek en ontwikkeling plaats aan zogenaamde *tandemzonnecellen* die een perovskiet zonnecel combineren met een silicium zonnecel. “Perovskiet” is strikt genomen de naam voor een categorie materialen (met een bepaald kristalrooster), maar in dit verband gaat het om een halfgeleider waarvan goede kwaliteit zonnecellen kunnen worden gemaakt. In combinatie met silicium, zet de perovskietzonnecel het kortgolfige licht om in elektrische energie, en de siliciumzonnecel het langgolfige licht. Met zo’n combinatie is al een totaalrendement van 35% bewezen, en kan misschien wel richting de 40% worden bereikt.

Het is nog niet zeker dat deze perovskiet-silicium tandem-PV-technologie (PV staat voor photovoltaïcs: de opwek van zonnestroom) succesvol grootschalig zal gaan worden toegepast, maar de voortgang is positief, en er wordt vrij breed verwacht dat het over 3-5 jaar zover zal zijn.

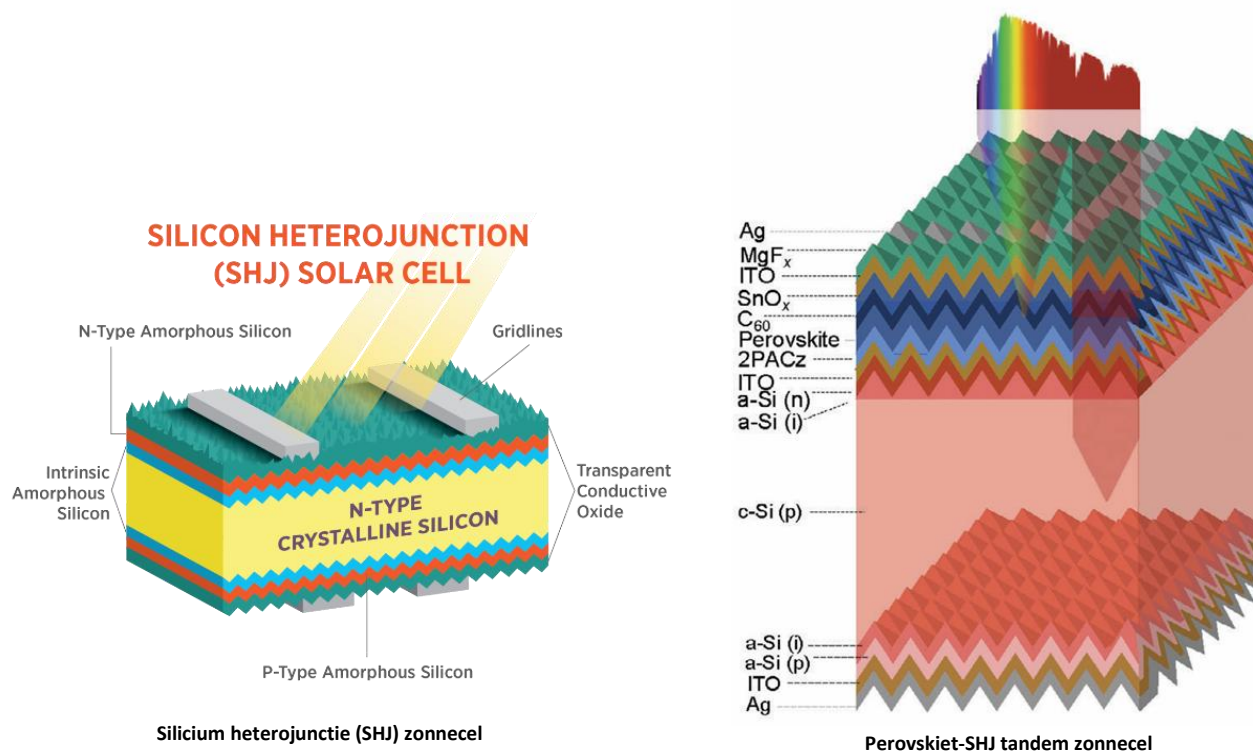
Eén van de vormen waarin deze tandemtechnologie kan worden uitgevoerd is door het aanbrengen van de perovskietzonnecel bovenop (in contact met) de siliciumzonnecel: dit heet dan een monolitische tandemcel of 2-terminal (2T) tandemcel. De aanduiding 2-terminal heeft betrekking op het aanwezig zijn van (slechts) 2 contacten: één aan de voorzijde van de perovskietzonnecel, en één aan de achterzijde van de silicium zonnecel. Omdat de PV-industrie sterk ingericht is op het werken met silicium wafers, is er veel aandacht voor specifiek deze 2T uitvoeringsvorm, omdat de verandering van productietechnologie dan als het ware ‘alleen maar’ gaat om het aanbrengen van additionale laagjes (*coatings*) op de wafer.

Deze 2T tandemtechnologie was het onderwerp van dit project. Specifiek was dit project gericht op de ontwikkeling van een variant die nauw aansluit bij een sterkte (expertise) van de Nederlandse industrie: waarbij de cel volledig vanaf de achterzijde elektrisch aangesloten kan worden – achterzijde-contact (*back contact*) tandemcellen.

Copyright and license

Copyright © 2026 in part by TNO and BC-tandem project partners. This report is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License, except where otherwise noted. For other uses, please approach the relevant copyright holder.
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>





Figuur 1 Illustraties van de generieke zonnecelconcepten aan de basis van dit project. Aan deze generieke zonnecelconcepten vindt wereldwijd intensief ontwikkeling plaats.

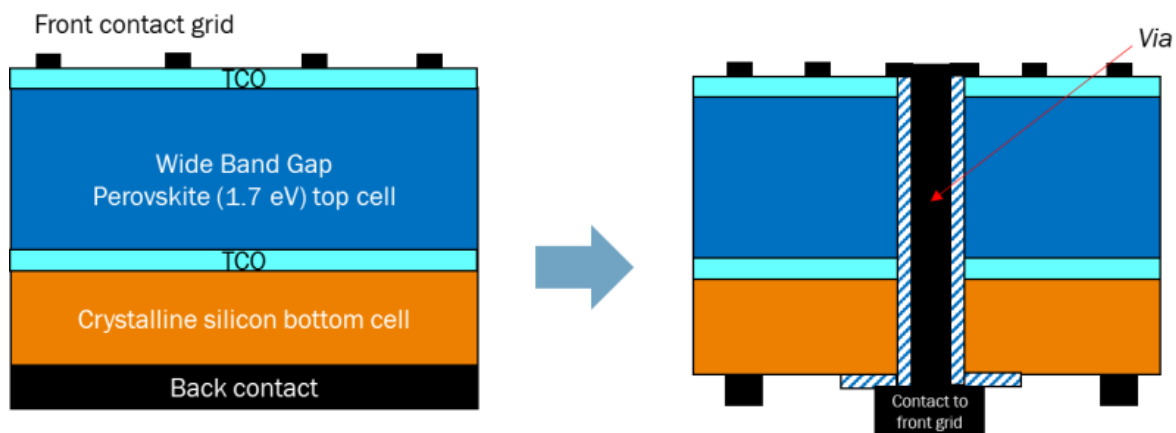
Links: Opbouw van een *silicon heterojunction* zonnecel (bron: <https://www.energy.gov/cmei/systems/crystalline-silicon-photovoltaics-research>). Dit type silicium zonnecel vormt veelal de basis voor perovskiet-silicium tandemzonnecellen.

Rechts: Opbouw van een perovskiet-silicium tandemzonnecel met schematische weergave van de absorptie van de energierijke fotonen uit het zonniespectrum in de perovskiet, en de minder energierijke (nabij-infrarood) fotonen in het silicium. (bron: O. Er-Raji, et al., Tuning Self-Assembly of Hole-Selective Monolayers for Reproducible Perovskite/Silicon Tandem Solar Cells. *Small Methods* 2025, 9, 2401758. <https://doi.org/10.1002/smt.202401758>, CC BY 4.0 licentie).

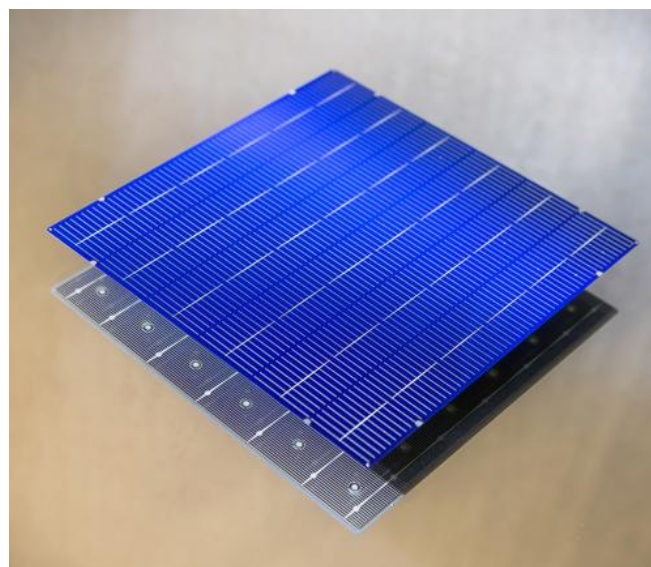
Het BC-tandem project was gericht op het ontwikkelen van een variant van deze tandemzonnecel met achterzijde-contactering.

Uitgangspunten en doelstellingen van project en partners

Het uitgangspunt van het project was dat de meest praktische manier om een achterzijdecontact-tandemzonnecel te maken, is om in een 2-terminal tandemcel kleine geleidende kanalen (*via's*) te maken van voor- naar achterzijde. Die *via's* verbinden dan het voorzijdecontact van de zonnecel met een aansluitpunt aan de achterzijde (Figuur 2, 3). Dit heet een *metal wrap through* (MWT) structuur.



Figuur 2. Schematische illustratie van de principiële doelstelling van het project, aan de hand van dwarsdoorsneden van tandemzonnecellen. Links: een 2-terminal tandemcel die het startpunt vormde van dit project. De verticale schaal is niet in proportie: de perovskietcel is ca. 1 µm dik, de silicium cel 100 µm. Rechts: het onderwerp van dit project: toevoegen van de mogelijkheid van achterzijde contactering van het voorzijde metaalraaster (*contact grid*). Om zo'n back-contact variant te maken wordt een metalen kanaaltje aangebracht, verbonden met het voorzijde *contact grid*, en met een achterzijde aansluitpunt. Het blauw gearceerde materiaal is een isolerend omhulsel. TCO is een transparante contactlaag. De metalen structuren (contact grids, en *via*) zijn schematisch in zwart aangegeven.

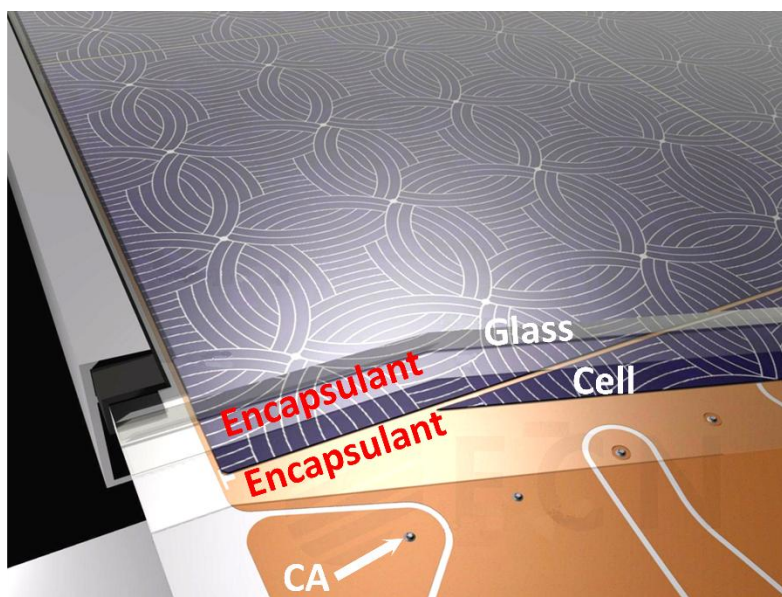


Figuur 3. Foto van een silicium MWT zonnecel, gemaakt door TNO en partners, boven een spiegel om ook de achterzijde te kunnen zien. Het doel van dit project was om een vergelijkbare technologie te ontwikkelen voor tandem-zonnecellen.

Afgezien van de doelstelling om een technologie voor een MWT tandemzonnecel te ontwikkelen, was een doelstelling van het project ook om de technologie voor het maken van

zonnepanelen daarvan te ontwikkelen. Figuur 4 laat de opengewerkte structuur van een MWT zonnepaneel zien.

Tenslotte was een doelstelling om stabiliteit van de nieuwe technologie te testen, met name vanuit het oogpunt van het toegevoegde element van de via's: kunnen die goed geïsoleerd worden van de lagen in de zonnecel (zodat ze geen kortsluiting, *shunt*, veroorzaken) en blijven ze dat ook. Hebben ze effect op andere aspecten van de stabiliteit van de zonnepanelen, in vergelijking met de tandemtechnologie zonder via's. (het is belangrijk om dat in vergelijking te beoordelen, omdat ook de basistechnologie zonder via's nog niet geheel stabiel is).



Figuur 4. Opengewerkte figuur van een MWT zonnepaneel. CA = conductive adhesive, wat het contact van de zonnecel naar het onderliggende metaalpatroon verzorgt. Het doel van dit project was deze generieke zonnepaneeltechnologie specifiek aan te passen voor de meer kwetsbare tandemzonnecellen.

Achterzijde-contact zonnecellen (zoals MWT zonnecellen) worden veel gebruikt door Nederlandse modulefabrikanten, vanwege hun iets hogere rendement dan traditionele zonnecellen, en betere uiterlijk. Ook belangrijk is de flexibiliteit om de achterzijde-contact zonnecellen in variërende patronen te kunnen plaatsen en in variërende patronen in serie te schakelen. Dat maakt de technologie bijzonder geschikt voor speciale toepassingen zoals bijvoorbeeld *vehicle integrated PV* (VIPV), zoals de producten van Lightyear. Voor tandemzonnecellen heeft het gebruik van achterzijde-contactering nog extra voordelen: het wordt vermeden dat er stress op de kwetsbare perovskietzonnecel wordt uitgeoefend door het aanbrengen van metaalstrips voor cel-interconnectie, en zowel bij de paneelfabricage als later in gebruik worden ook thermomechanische spanningen verminderd.

Voor alle projectpartners was een belangrijke doelstelling om een positie uit te bouwen in de ontwikkeling van kennis en innovaties van tandem-PV-technologie.

- TNO is een onderzoeksorganisatie met onder andere als doelstelling de Nederlandse en Europese industrie te helpen bij en met innovaties in hernieuwbare energie. TNO kan de in dit project ontwikkelde technologie verder ontwikkelen, licenseren, overdragen naar industrie, verder ondersteuning aan industrie geven, etc.
- Lightyear Layer ontwikkelt zonnepanelen (of meer in het algemeen, zonnepaneeltechnologie) voor gebruik op voertuigen om de afhankelijkheid van netstroom te verminderen. Omdat het beschikbare voertuigoppervlak beperkt is, is rendement buitengewoon belangrijk. Lightyear gebruikt achterzijdecontact-

zonneceltechnologie. Dit maakt de technologie van dit project zowel belangrijk voor Lightyear Layer en haar klanten, als dat het Lightyear Layer een voorsprong geeft als mogelijke vroege toepasser van deze technologie.

- 3SUN is de grootste Europese producent van zonnecellen, en heeft tandem-PV-technologie in haar R&D roadmap. 3SUN is historisch nauw betrokken geweest bij achterzijdecontact-technologie (ook in samenwerking met TNO) en had als niet-gesubsidieerde partner de doelstelling de mogelijkheden van achterzijde-contact tandem-PV-technologie te evalueren en de ontwikkeling in dit project te ondersteunen.

De onderzoeksactiviteiten in dit project waren verdeeld over drie onderwerpen:

1. De MWT tandemceltechnologie: ontwikkeling van de zonnecel, dwz het proces en materialen om die te fabriceren, en het testen daarvan. Met doelstellingen voor serieweerstand, *shunt*weerstand, rendement, en stabiliteit. Perovskietzonnecellen tolereren slechts lagere temperaturen voor fabricage dan siliciumzonnecellen, wat een beperking in de fabricagemogelijkheden betekent, bijvoorbeeld speciale ontwikkeling of selectie vereist van geschikte materialen.
2. De MWT tandem-zonnepaneeltechnologie: ook hier het proces en materialen om de zonnepanelen te fabriceren, en het testen daarvan. Perovskietzonnecellen vereisen betere bescherming tegen vocht dan silicium zonnecellen, beperking van thermo-mechanische stress, en ook hier is weer de verminderde tolerantie van perovskiet ten opzichte van silicium voor hoge temperatuur een beperking.
3. Aan het eind van het project een beperkte evaluatie van aspecten van belang voor het uitzicht op daadwerkelijke toepassing, vanuit het oogpunt van kosten en bereikte stand van de technologie.

Omdat de tandemzonneceltechnologie als zodanig nog relatief jong en in ontwikkeling is, was het niet mogelijk om in dit project veel zonnecellen te fabriceren en testen, en ook niet om standaardformaat zonnecellen te fabriceren. De resultaten zijn behaald op klein formaat cellen en mini-zonnepaneeltjes ('mini-modules').

Behaalde resultaten, en knelpunten

1.1 MWT-tandemzonnecellen.

Naast MWT-tandemzonnecellen werden ook (en allereerst) silicium MWT-zonnecellen op basis van de zogenaamde heterojunctietechnologie (HJT) ontwikkeld. Dat had enerzijds de functie van een eerste test en ontwikkelplatform voor het MWT proces (het proces om de metalen kanaaltjes of via's te maken en te isoleren van de rest van de cel) dat later toegepast zou worden op tandemzonnecellen, en anderzijds maakte dit cellen beschikbaar voor een begin van ontwikkeling van de toekomstige tandem-zonnepaneeltechnologie. Deze MWT silicium HJT zonnecellen werden op industriële "M2" formaat wafers vervaardigd (nominaal 156.75mm x 156.75mm groot, ca. 0.15mm dik).

Dit gaf goede resultaten, te beoordelen aan de verschillen met traditionele silicium MWT HJT-zonnecellen. Zulke verschillen waren binnen de experimentele variatie afwezig. Bij dit type

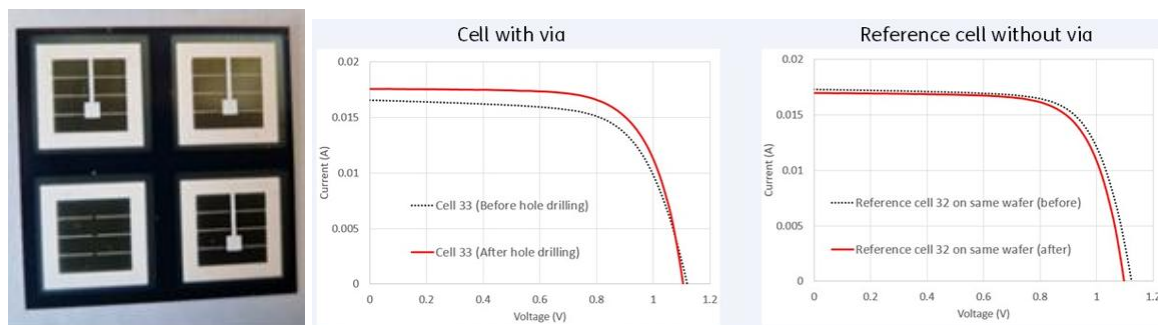
onderzoek met kleine fabricage-series is er vaak vrij veel variatie in de eigenschappen. Zo ook hier: variatie van de te beoordelen parameters (zoals uitgangsspanning) varieerden 0.5 tot 2.5 % tussen verschillende *samples* die nominaal identiek zouden moeten zijn. Bij echte proefproductie van grotere series in een later stadium kan betere statistiek worden verkregen.



Figuur 5. Een MWT silicium HJT zonnecel, vervaardigd met een proces dat sterk lijkt op het MWT tandemzonnecelproces. Afmeting 156.75mm x 156.75mm. Met dit type zonnecel kon met name Lightyear ontwikkeling voor de zonnepaneeltechnologie verrichten (als 'stand-in' voor de toekomstige tandemzonnecellen). Links voorzijde, rechts achterzijde. De losstaande witte puntjes op de achterzijde zijn de contacteringspunten die verbonden zijn met de voorzijde via de metalen kanaaltjes (via's).

Vervolgens werd een tussenstap genomen richting het testen van hetzelfde proces voor (kleinere) tandemcellen: in deze tussenstap werd gebruik gemaakt van perovskietcellen op silicium wafers (niet op silicium zonnecellen – en daarom geen echte tandemcellen). Dit maakte de experimenten en beoordeling/analyse eenvoudiger, met name het beoordelen of er negatieve effecten van het proces op de perovskietzonnecel optraden. Productie van perovskiet-op-wafer is experimenteel ook minder bewerkelijk dan perovskiet-op-silicium-zonnecel. Kortgezegd waren ook hier uiteindelijk, na keuze van juiste materialen en processen, geen significante verschillen tussen referentie-zonnecellen (zonder via's) en de MWT-zonnecellen. De variatie in een experiment was hier wel groter dan bij de silicium-zonnecellen, door het meer experimentele karakter van de perovskiet-zonnecelproductie, en ook doordat perovskiet-zonnecellen van zichzelf de eigenschap hebben te variëren afhankelijk van hun gebruiksgeschiedenis (hoe lang een bepaalde lichtinstraling of spanningsbias aanwezig is geweest). Door de variaties was het ook niet mogelijk om de in de projectdoelstellingen opgenomen waarden voor interne weerstanden in de zonnecel goed te verifiëren. Deze zonnecellen werden eveneens gebruikt voor ontwikkeling van de zonnepaneeltechnologie.

Figuur 6 geeft een beeld van hoe deze zonnecellen er in de praktijk uitzagen (slechts een paar cm² groot), en de variaties in de eigenschappen.



Figuur 6. (overgenomen uit de appendix van dit rapport). Links: Foto van bovenaanzicht van 3 MWT-perovskietzonnecellen en 1 referentie perovskietzonnecel, op een silicium wafer (ca. 35mm x 35mm). Rechts: vergelijking van de stroom-spanningskarakteristieken.

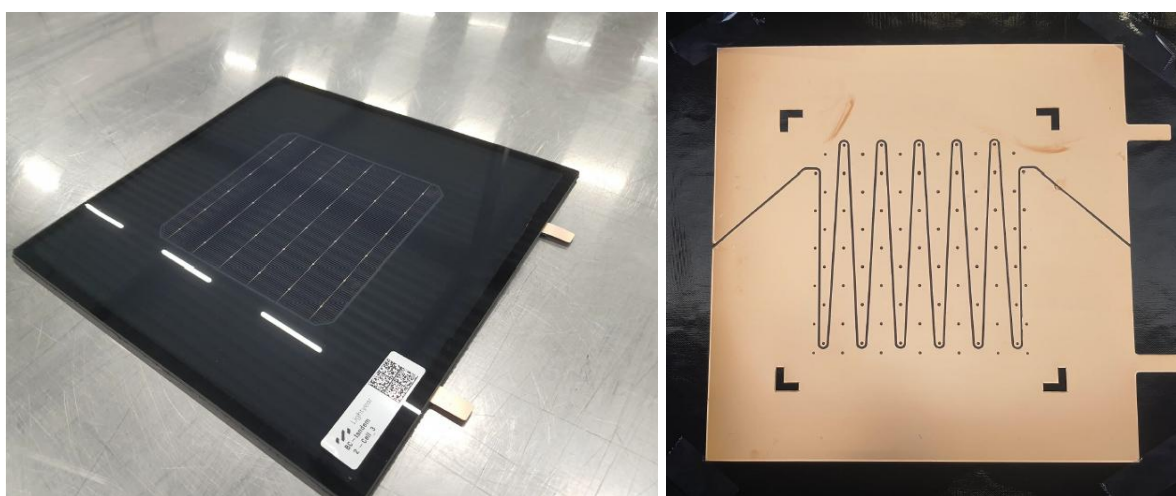
Als volgende stap is het MWT-proces toegepast op tandemcellen, in eerste instantie op eenzelfde wijze als in Figuur 6. Dit gaf opnieuw goede resultaten, zonder significante verschillen tussen referentie-zonnecellen (zonder via's) en de MWT-zonnecellen. Echter, de kwaliteit van de stroom-spanningskarakteristieken was in dit geval voor alle cellen minder, omdat er meerdere zonnecellen op één wafer gecreëerd waren, wat vermoedelijk een bepaald soort kortsluiting veroorzaakte (een hypothese die wordt uitgelegd op de laatste pagina van de appendix van dit rapport). Daarom werd een nieuwe proces-run voor MWT-tandemzonnecellen uitgevoerd met één cel per wafer. Die resultaten waren positief, zonder blijk van kortsluiting, en een celrendement van ongeveer 25%.

De MWT-perovskietcellen op wafers zijn ook getest op de bekende gevoeligheid/kwetsbaarheid van perovskietcellen: onder belichting bij openklemspanning, en onder belichting met daarbij ook verhoogde temperatuur, en onder zogenaamde *reverse bias*, iets dat kan optreden bij gedeeltelijke beschaduwing van een zonnepaneel. Ook hier werd gevonden dat de resultaten niet wezenlijk verschillend waren tussen referentie en MWT-cellen, vergeleken met de experimentele variatie tussen cellen in het algemeen. Details worden gegeven in de appendix van dit rapport en in een toekomstig publicatie (waarin ook *reverse bias* resultaten worden toegevoegd).

Samenvattend zijn de resultaten, met inachtneming van de beperkingen door klein celformaat en variaties in perovskiet-processing in het algemeen, zeer veelbelovend. Een duidelijk knelpunt was de beperkte beschikbaarheid en het beperkte formaat van de tandemcellen op zich, zoals eerder opgemerkt gerelateerd aan het ontwikkelingsniveau van de tandemtechnologie op zich (wereldwijd). Als na opschaling van de tandemcel-procestechnologie de gewone tandemcellen en MWT-tandemcellen op groot formaat (volledig wafer-formaat) kunnen worden gemaakt, kunnen daarmee nauwkeuriger testen worden gedaan van het productieproces en de celstabiliteit. Zulke opschaling wordt daarom nu nagestreefd. Voor voorbeelden van voortgang op het gebied van procestechnologie en resultaten van zulke grote tandemcellen, zie bijv. recente publicaties van het eveneens door RVO en TKI energie gesubsidieerde onderzoeksproject Fit-for-Market (<https://projecten.topsectorenergie.nl/projecten/fit-for-market-37043>).

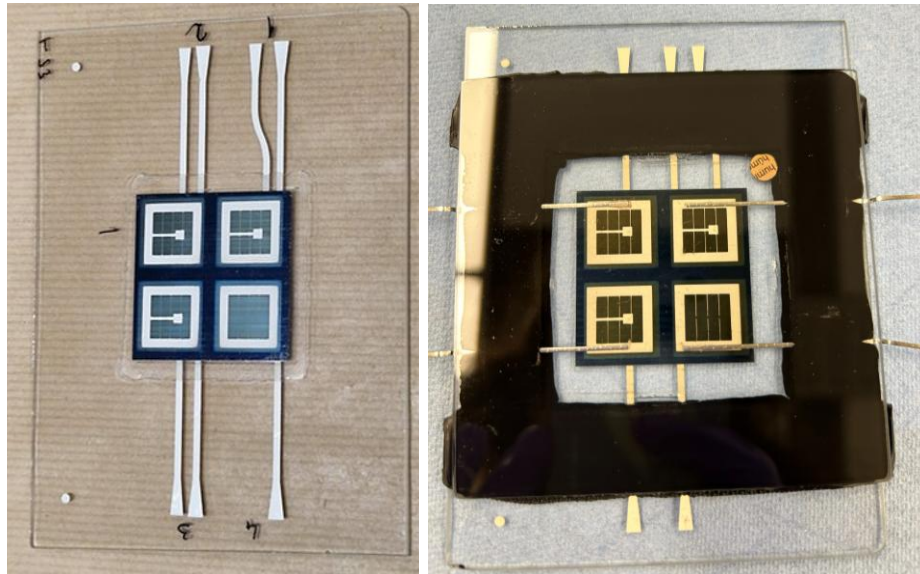
1.2 MWT-tandem-zonnepaneeltechnologie en resultaten.

Met de MWT silicium HJT zonnecellen van standaard (*full wafer*) formaat is een fabricageproces voor zonnepanelen ontwikkeld dat gebruikt maakt van materialen en temperaturen die naar verwachting compatibel zullen zijn met perovskiet zonnecellen. Het proces was gebaseerd op Lightyear's proces voor *vehicle integrated* PV zonnepanelen (striktenomen zonnepaneel-halffabrikaten). Figuur 7 laat een foto zien van het eindresultaat. De module functioneerde naar behoren; met stroom-spanningskarakteristieken naar tevredenheid (geen verandering van openklemspanning, geen *shunt*; enkele mOhm toename van serie weerstand maar de significantie daarvan is niet goed te beoordelen voor een 1-cells-zonnepaneel).

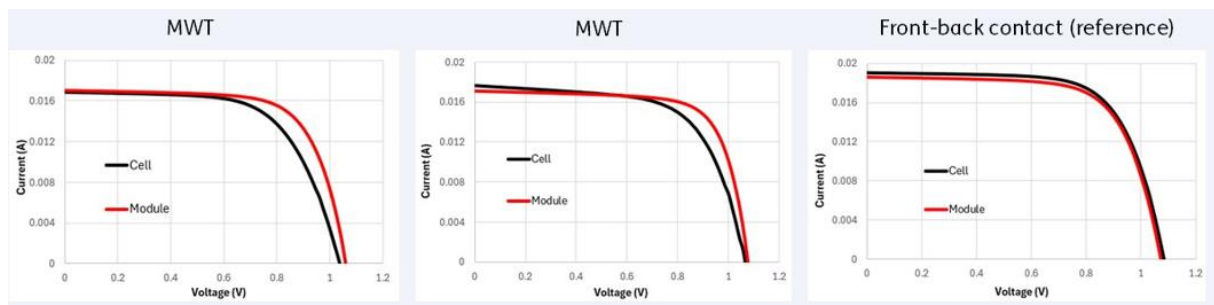


Figuur 7. Links: Mini-zonnepaneel van één silicium MWT HJT zonnecel, gemaakt in de Lightyear productielijn, met materialen en procesparameters die compatibel zouden moeten zijn met perovskiet (dus met MWT tandem zonnecellen). Deze silicium MWT zonnecel is gemaakt met processen die later in dit project zijn toegepast voor de tandem MWT zonnecellen. Rechts: de gepatroneerde koperfolie waarop de zonnecel is bevestigd, die de achterzijde-contactering verzorgt.

Het Lightyear proces gebruikt een gepatroneerde koperfolie (vergelijkbaar met een flexibel *printed circuit board*) voor achterzijde-contactering en onderlinge verbindingen van de zonnecellen. Een alternatief contacteringsproces is ontwikkeld door TNO waarmee de zonnepanelen van zowel achter- als voorzijde licht kunnen invangen (*bifacial* zonnepanelen). Dat proces is toegepast om experimentele mini-zonnepanelen te maken van de MWT tandemzonnecellen. Figuur 8 geeft foto's van deze test-zonnepaneeltjes.



Figuur 8. Test-zonnepaneeltjes van de MWT-tandemzonnecellen. Op basis van dezelfde 4-cellen-op-een-wafer als in Figuur 6. Links: half-fabricaat waarbij de cellen aan de achterzijde zijn gecontacteerd op een glasplaatje met geleidende patronen. Rechts: volledig zonnepaneel ('laminaat') met voorzijde glas en rand-sealing.



Figuur 9. Stroom-spanningskarakteristieken van MWT-perovskietzonnecellen op een wafer, en het daaruit vervaardigde minizonnepaneel ('module'). Globaal zijn de karakteristieken voor en na modulefabricage hetzelfde. De karakteristieken van de MWT cellen zijn na modulefabricage zelfs iets verbeterd (meer rechthoekige vorm). De mogelijke redenen hiervoor zijn op dit moment niet met zekerheid te geven.

Materialen en processen zijn iets anders dan in het Lightyear-proces maar functioneerden ook hier, na optimalisatie, naar behoren. De gebruikte materialen zijn eerder bewezen als geschikt voor tandemzonnepanelen in bijv. het eerder genoemde Fit-for-Market project, maar nog niet eerder voor achterzijdecontact-zonnepanelen. Minipaneeltjes zoals in Figuur 8 zijn allereerst gemaakt voor de MWT-perovskietcellen (d.w.z. de perovskietcellen vervaardigd op een wafer, maar niet op een siliciumzonnecel, dus geen tandemcel), en later ook voor de daadwerkelijke MWT-tandemcellen. Resultaten voor de MWT-perovskiet-minipaneeltjes zijn gepresenteerd in Figuur 9. Net als bij de celresultaten, wordt beoordeling van de resultaten hier beïnvloed door de 'natuurlijke' variatie van perovskiet-zonnecel-eigenschappen, dat wil zeggen de variatie in de tijd als gevolg van bijvoorbeeld de historie van belichting, temperatuur, etc. Die variatie in aanmerking nemend, zijn er net als voor de cellen zelf, geen duidelijke verschillen in zonnepaneel-performance te zien gerelateerd aan het wel of niet aanbrengen van de MWT-via's. Die resultaten zijn dus veelbelovend, maar net als bij de cellen, geldt ook hier de opmerking dat vervaardigen van meer cellen en zonnepanelen, gebaseerd op cellen van gebruikelijke afmetingen, hier bevestiging met meer precisie zal moeten geven.

Mini-zonnepanelen met MWT-tandemcellen zijn ook gemaakt, later in het project. Deze zonnecellen waren minder stabiel in de tijd, in de zin dat sommige cellen een kortsluiting lieten zien na verloop van tijd. Ditzelfde fenomeen trad ook op bij alle MWT-tandemcellen nadat ze tot mini-zonnepaneel waren verwerkt. Op het moment wordt de reden voor deze kortsluiting gerelateerd aan het via-isolatieproces (de isolatie van het metalen kanaaltje in de via van de rest van de zonnecel). Er waren ook al eerder in het onderzoek aanwijzingen dat dit proces kritisch is, waarna al verbeteringen waren doorgevoerd. Een nieuwe productierun van MWT-tandemcellen met verdere verbeteringen resulteerde in stabielere resultaten; de minizonnepanelen van deze cellen worden momenteel gemaakt.

1.3 Vooruitzichten voor toepassing, vanuit technisch-economisch perspectief.

De MWT-tandemzonnecellen hebben vanwege het experimentele karakter nog geen rendementswinst laten zien ten opzichte van de beste silicium zonnecellen. We weten van resultaten in andere onderzoeken echter dat dit mogelijk is (tot 35% rendement aan toe is aangetoond). In de beoordeling van de technisch-economische vooruitzichten is ervan uitgegaan dat zo'n hoger rendement voor de MWT-tandemzonnecellen zeker mogelijk zal zijn, en tandem-PV-technologie economisch aantrekkelijk zal maken. De analyse richtte zich daarom alleen op de vergelijking tussen zonnepanelen met conventionele tandemcellen, en die met MWT-tandemcellen.

Er werd uitgegaan van grootschalige productie (GW-niveau) in Europa. De kostenstructuur van zo'n productie is onderzocht in een Europees onderzoeksproject waarin 3SUN deelnam, en gebruikt als basis.

Er zijn 2-3 extra productiestappen voor de MWT-tandemzonnecellen nodig ten opzichte van de conventionele tandemcellen, maar die stappen zijn uitvoerbaar met standaard industriële procesapparatuur en vormen daarom geen technische beperking. Economisch gezien resulteren ze natuurlijk in extra productiekosten. Die kosten moeten dan gecompenseerd worden, ofwel financieel, door een hoger rendement of andere besparingen, ofwel doordat ze een ander aantrekkelijk aspect geven, bijvoorbeeld bepaalde nieuwe toepassingen ontsluiten (zoals *vehicle integrated PV*). Voor wat betreft rendement is het niet de verwachting dat er veel winst te behalen is met de MWT-uitvoering (maximaal 0.1 procentpunt), vanwege de vergaande optimalisatie van de technologie voor zonnepanelen in het algemeen, en de relatief hoge spanning en lage stroom van tandemzonnecellen in het bijzonder (door de lage stroom nemen in 'gewone' zonnepaneeltechnologie de Ohmse verliezen af, terwijl normaal gesproken juist op dat punt achterzijdecontact-zonnepanelen een voordeel opleverden).

Op het gebied van kostenbesparing is de evaluatie van het project dat er kansen zijn op kostenbesparing bij de zonnepaneelproductie, omdat de MWT-technologie kan besparen op het materiaal dat wordt gebruikt voor cel-interconnectie. Daarnaast zijn sterke punten dat de productietechnologie voor zonnepanelen op basis van MWT-zonnecellen verder is te automatiseren en in bepaalde opzichten eenvoudiger wordt, en dat achterzijdecontactering voor tandem-PV tot robuustere zonnepanelen zou kunnen leiden vanwege de verminderde stress op de perovskiet (dat laatste is niet bewezen in dit project).

Voor geavanceerde toepassingen als die van Lightyear waarbij achterzijdecontactering de voorkeur heeft, is het techno-economische voordeel duidelijker en sterker: De MWT-tandemtechnologie van dit project maakt het grote voordeel van hoger rendement van tandem-zonnecellen relatief eenvoudig beschikbaar voor VIPV, zonder veel aanpassingen in de paneelproductie.

Natuurlijk zijn er ook nog onzekerheden en aspecten die verder onderzocht moeten worden. Die onzekerheden betreffen zowel het algemene concept van tandem-PV (met name de stabiliteit van perovskietzonnecellen) als aspecten voor de MWT-celtechnologie, zoals eventuele effecten van de via's op *yield* (productie-uitval) of stabiliteit. Die zijn weliswaar voor zover mogelijk beoordeeld in het BC-tandem project, maar bij opschaling naar proefproductie kan dat in meer detail, met betere statistiek, beoordeeld worden.

Perspectief voor toepassing en spin-off

Bijna alle grote zonnecel- en zonnepaneel-producenten hebben voor zichzelf het vooruitzicht om op termijn tandem PV in commerciële productie te nemen. De ontwikkeling bij de meeste bedrijven bevindt zich nog grotendeels in de fase van laboratoriumonderzoek. Sommige bedrijven zijn echter al verder en streven ernaar om in de nabije toekomst met pilotproductie van perovskiet/silicium tandemzonnecellen te beginnen. De vooruitzichten voor het moment van marktintroductie van tandem-PV hebben daarom een aanzienlijke onzekerheid; meningen en uitspraken variëren tussen al zeer binnenkort (bijvoorbeeld 2027) en kort na 2030.

De resultaten in het project voor MWT-tandem-technologie waren, vooralsnog, succesvol. De toepassing van MWT-technologie op tandemzonnecellen en -panelen lijkt veelbelovend en relatief eenvoudig toepasbaar. Daarom wordt er nu gekeken naar de mogelijkheden voor opschalen van het onderzoek: naar ten eerste testen van de technologie met zonnecellen met standaard afmeting (veel groter dan in dit project), en ten tweede testen bij groter productievolume (meer zonnecellen), om nauwkeuriger de prestaties en toepassingen van zonnecellen en -panelen in kleine proefproductie te kunnen optimaliseren en beoordelen.

Bij de toepassing in VIPV heeft de technologiecombinatie van tandem-PV en achterzijdecontactering veel toegevoegde waarde, en daarom is dat een veelbelovende markt voor verdere ontwikkeling en eerste commerciële toepassing. Toepassing in andere deelmarkten waarbij rendement en achterzijdecontactering een grote rol spelen wordt momenteel verkend. Afgezien van de toepassing in tandem-PV, heeft de in dit project ontwikkelde technologie ook veel potentie voor het toevoegen van achterzijde-contactering aan silicium HJT-zonnecellen.

Bijdrage van het project aan de doelstellingen van de TKI Urban Energy (duurzame energiehuishouding, versterking van de kennispositie)

De TKI Urban Energy ondersteunt de ontwikkeling en toepassing van energie-innovaties voor de duurzame transformatie van woningen, commerciële gebouwen, woonwijken en industrieterreinen, bijvoorbeeld door middel van zon-PV. Meer specifiek ondersteunt TKI UE de ontwikkeling van PV met een hoog rendement en kostenreductie, die beide in potentie mogelijk worden gemaakt door tandem-PV-technologie. Het project BC-tandem heeft bijgedragen aan deze doelstelling door het genereren van Nederlandse kennis over nieuwe bouwstenen voor de productie van tandemzonnecellen en -zonnepanelen. De toepassing van deze kennis zal afhankelijk zijn van de voortgang van tandemtechnologie in het algemeen tot marktintroductie. Het project heeft kennis ontwikkeld die dan toegevoegd kan worden aan zulke tandemtechnologie. Zoals in de inleiding beschreven, wordt in de industrie geschat dat marktintroductie van tandemtechnologie op een termijn van zo'n 3-5 jaar kan gebeuren, en voor speciale toepassingen al eerder. De kennis van dit project voor achterzijdecontactering kan naar verwachting dan op zo'n zelfde termijn mee-geïntroduceerd worden.

De recente Europese *'Net Zero Industry Act'* (NZIA) en *'Industry Accelerator Act'* (IAA) bieden diverse mechanismen voor ondersteuning voor productie van zonnecellen en zonnepanelen in Europa. Op de middellange termijn zal de tandemtechnologie waarschijnlijk een belangrijke rol gaan spelen bij PV-productie in Europa. Het project BC-tandem heeft daarvoor dan de kennispositie versterkt, specifiek voor achterzijdecontact-technologie die relevant is voor speciale toepassingen zoals op maat gemaakte zonnepanelen, en vergaand geautomatiseerde productie.

Overzicht van openbaar verkrijgbare publicaties van BC-tandem resultaten

Twee eerdere publicaties van het project zijn gekopieerd aan het eind van dit rapport. Een uitgebreidere publicatie wordt verwacht in het *European Journal of Photovoltaics*: Melvin ten Kate *et al.*, "Back-Contact 2-Terminal Perovskite-Silicon Tandem Solar Cells and Modules by Metal Wrap-Through Technology".

Meer informatie over dit rapport en de technologie kunt u opvragen bij:

- TNO Solar Energy, Westerduinweg 3, 1755 LE Petten
- Algemeen emailadres: secretariat-se/sta@tno.nl
- Project coordinator (TNO): bart.geerligts@tno.nl

Projectsubsidie

Het project is uitgevoerd met PPS toeslag/PPS innovatie subsidie van het Ministerie van Economische Zaken, voor het TKI Energie.

www.tki-urbanenergy.nl. Het projectnummer is 2121201.

Poster-presentatie op de 5^e tandemPV workshop, 13-15 mei 2025, Hasselt (BE)

TandemPV workshop 2025 ID 109

Back-contact 2T tandem solar cells by metal wrap-through technology

Introduction

Back-contact (BC) solar cells have multiple advantages over devices with a front contact:

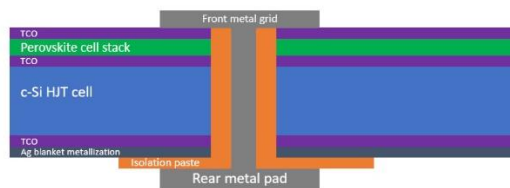
- Improved energy performance
- Flexibility in module design
- Reduced stress from interconnection
- Improved aesthetics

With the emergence of silicon-perovskite (Si/PVK) tandem cells, it would be of great advantage to apply BC technology to tandem devices as well.

Therefore, the potential of applying metal wrap-through (MWT) technology as back-contact technology to 2T tandem cells is investigated.

Design

2T tandem MWT design

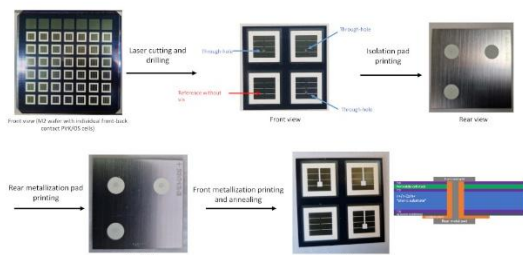


Through-holes are drilled in the device and filled with metallization paste print, forming a conductive channel ('via') from the front electrode towards the rear side. Isolation layer is applied to the inside of the through-holes to electrically isolate the via metallization from the cell stack.

Approach

MWT perovskite-on-silicon-ohmic-substrate cells

To determine the suitability of MWT for 2T PVK/Si cells, the MWT technology is first tested on small area (1 cm²) single-junction perovskite cells on silicon ohmic substrate as back contact (PVK/OS) devices, as they are considered a good representative to study the MWT process on the perovskite stack.



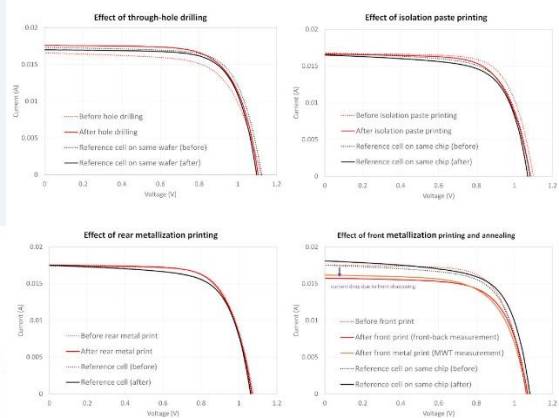
TNO innovation
for life

Melvin ten Kate, Yu Wu, Eric Kossen, Nicolas Guillevin, Victor Rosca, Johan Bosman, Anne Biezemans, Marcel Simor, Giulia Lucarelli, Valerio Zardetto, Mark Steltenpool, Bart Geerligs
TNO Energy and Materials Transition, Solar Energy, the Netherlands

✉ melvin.tenkate@tno.nl

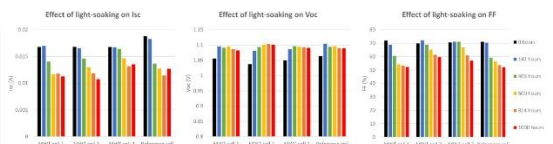
Results

Influence of MWT process steps on IV characteristics



IV curves of the PVK/OS cells after each process step. The reference cell located on the same chip underwent the same handling, but without laser drilling and actual printing. MWT PVK/OS cells were obtained without any considerable losses, demonstrating the suitability of this approach to apply MWT BC technology for perovskite cells on silicon.

Light stability



Light-soaking tests on PVK/OS cells (in N₂ atmosphere under green light illumination comparable to 1 sun intensity) indicate that the via does not have a negative influence on the cell performance, as compared to a reference without via.

Conclusions and Outlook

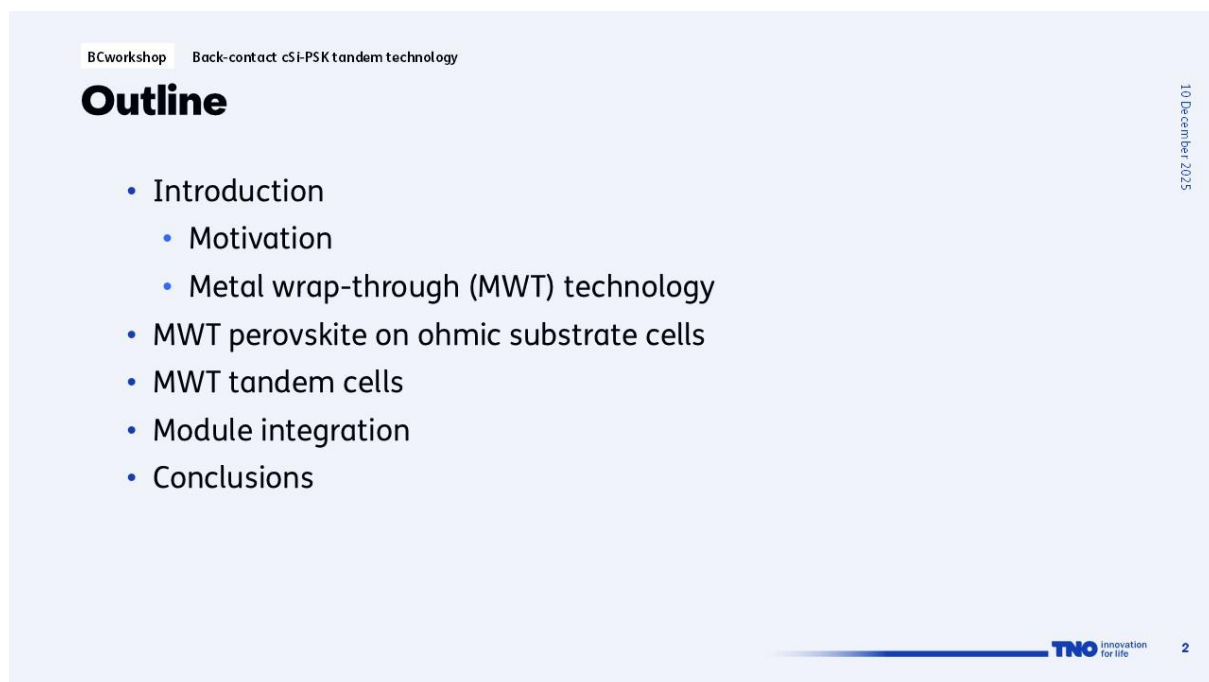
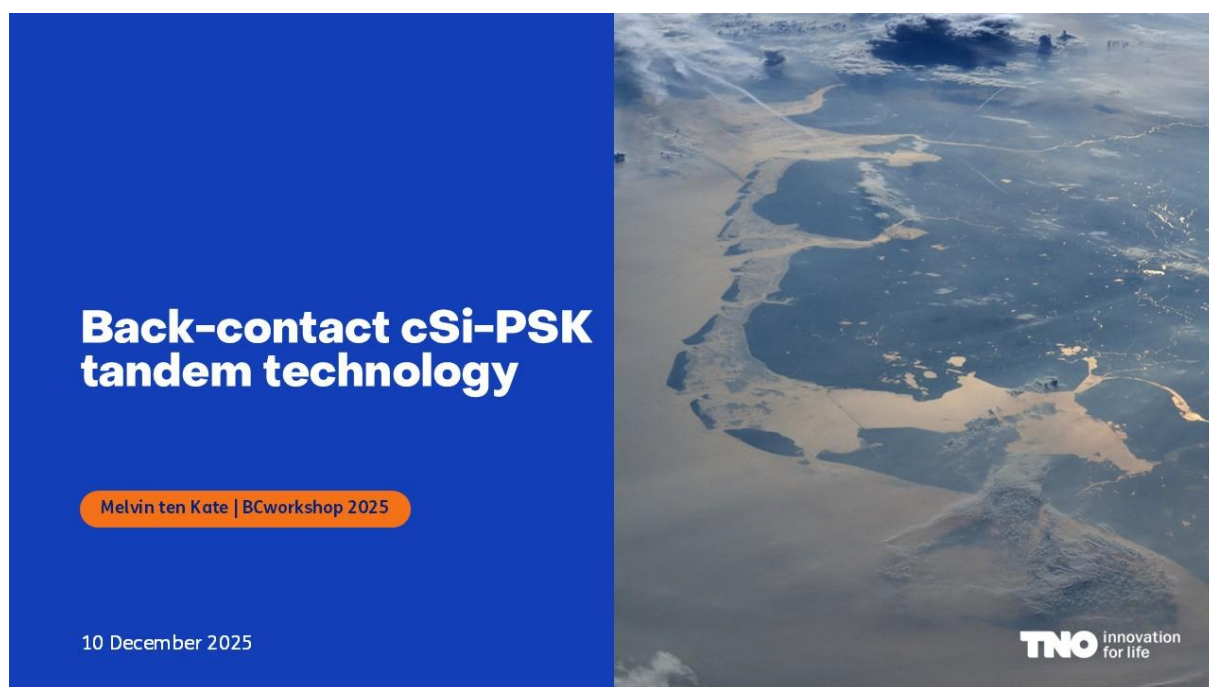
The results on the MWT PVK/OS cells demonstrate the suitability of the approach to apply the MWT technology to 2T PVK/Si cells. Further studies focus on applying the MWT technology to actual PVK/Si tandem cells, as well as on cell thermal stability and cell encapsulation.

Acknowledgments. This work was supported by TKI-Energie from the Toeslag voor Topconsortia voor Kennis en Innovatie (TKI's) of the ministry of Economic Affairs and Climate, project BC-tandem. The project partners Lightyear Layer B.V. and 3SUN S.R.L. are acknowledged for their collaboration and support.

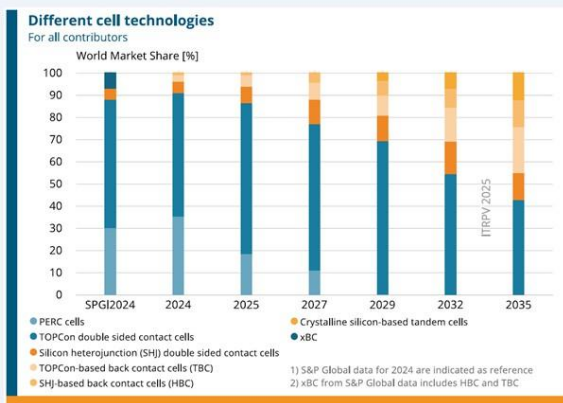
See poster ID 120 (Riley Ratnasingham, TNO) regarding the development of bifacial 2T tandem devices.

Presentatie op de 13th workshop on back contact solar cell and module technology, 9-10 december 2025, Amsterdam (NL)

Deze presentatie kan online gevonden worden op
https://www.backcontact-workshop.com/pdf/2025/26_TNO.pdf



Motivation



Market shares for different technologies. S&P Global (PGI) data for 2024 are indicated as reference.
Source: International Technology Roadmap for PV (ITRPV) 2024 results.

Back-contact (BC) solar cells

- Growth in back-contact technology
- Improved energy performance
- Flexibility in module design
- Improved aesthetics

cSi-PSK tandem solar cells

- Emerging technology
- Enabling efficiencies over 40%

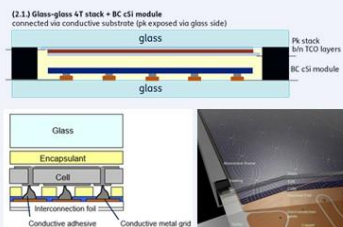
10 December 2025

Bring the advantages of back-contact technology to tandem

Back-contact technology for tandem

4T tandem

- 4T tandem consisting of perovskite cell and BC cell (e.g. IBC)
- TNO explores advantages of 4T BC tandem modules based on use of light transmitting conductive substrate

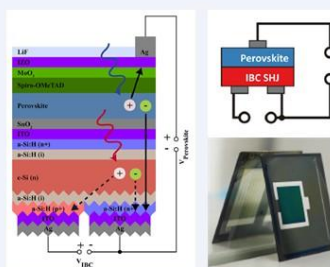


V. Rosca; Hybrid Tandem Module
Technology: Sunchain 2025 (Den Bosch)



3T tandem

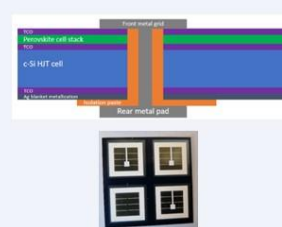
- 3T tandem consisting of perovskite top cell and BC bottom cell (e.g. IBC)



P. Tockhorn et al.; ACS Appl. Energy Mater. 2020, 3, 1381-1392

2T tandem (MWT)

- 2T tandem consisting of perovskite top cell and c-Si bottom cell
- Application of metal wrap-through (MWT) technology to obtain a BC device with all terminals at the rear side

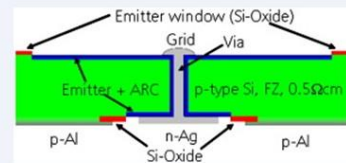


Focus of this presentation

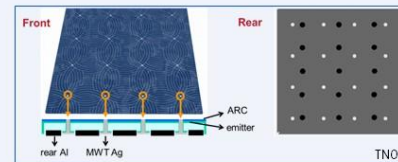
10 December 2025

Metal wrap-through (MWT) technology

- MWT is a known back-contact technology that has been applied for various c-Si cell technologies, like SHJ and PERC.
- A through-hole is made in the wafer, allowing to wrap the front metallization through the wafer to a contact pad at the rear side of the device.
- Depending on the architecture, some form of isolation at the via may be required to prevent a shunt.



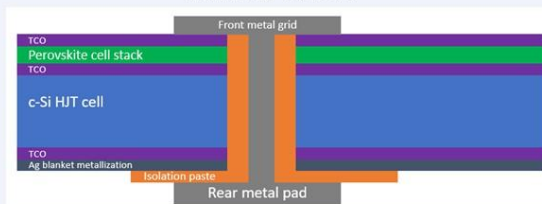
T. Fellmeth et al. Solar energy materials and solar cells 94.12 (2010): 1996-2001.



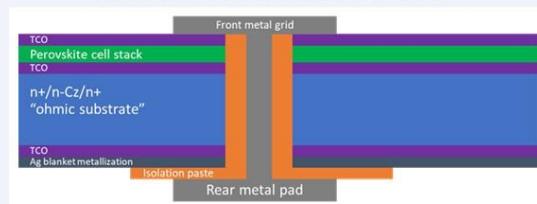
Investigate the potential of MWT technology as a back-contact technology for cSi-PVK 2T tandem cells

MWT architecture

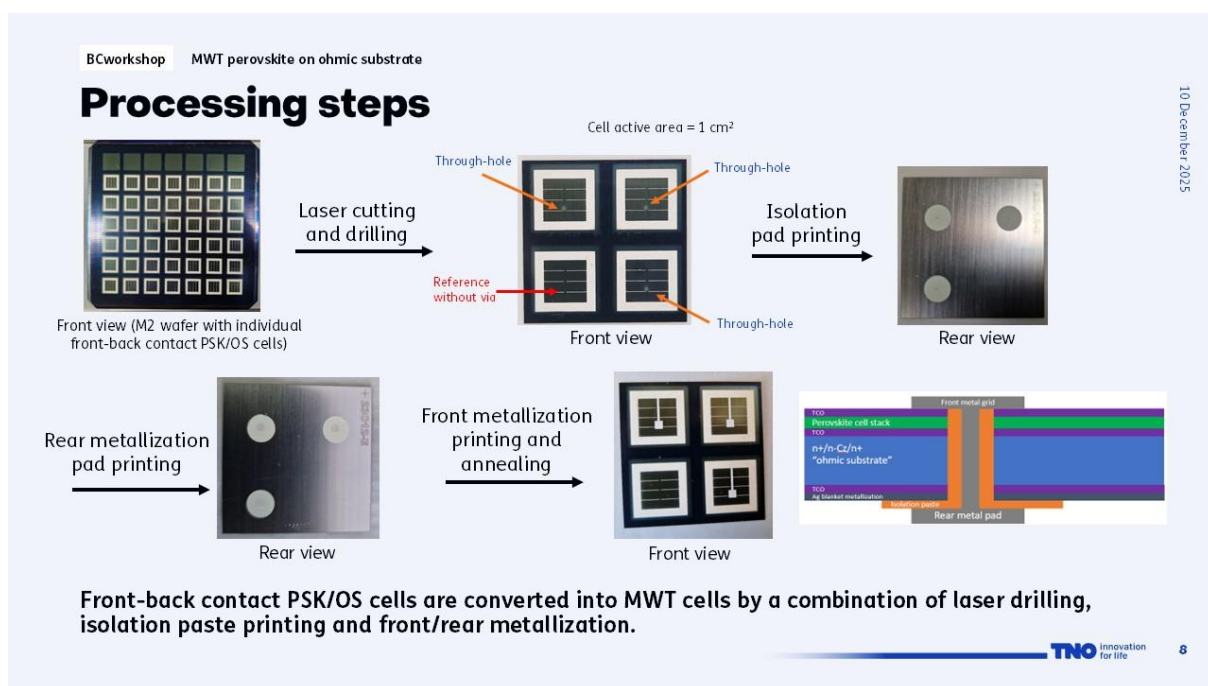
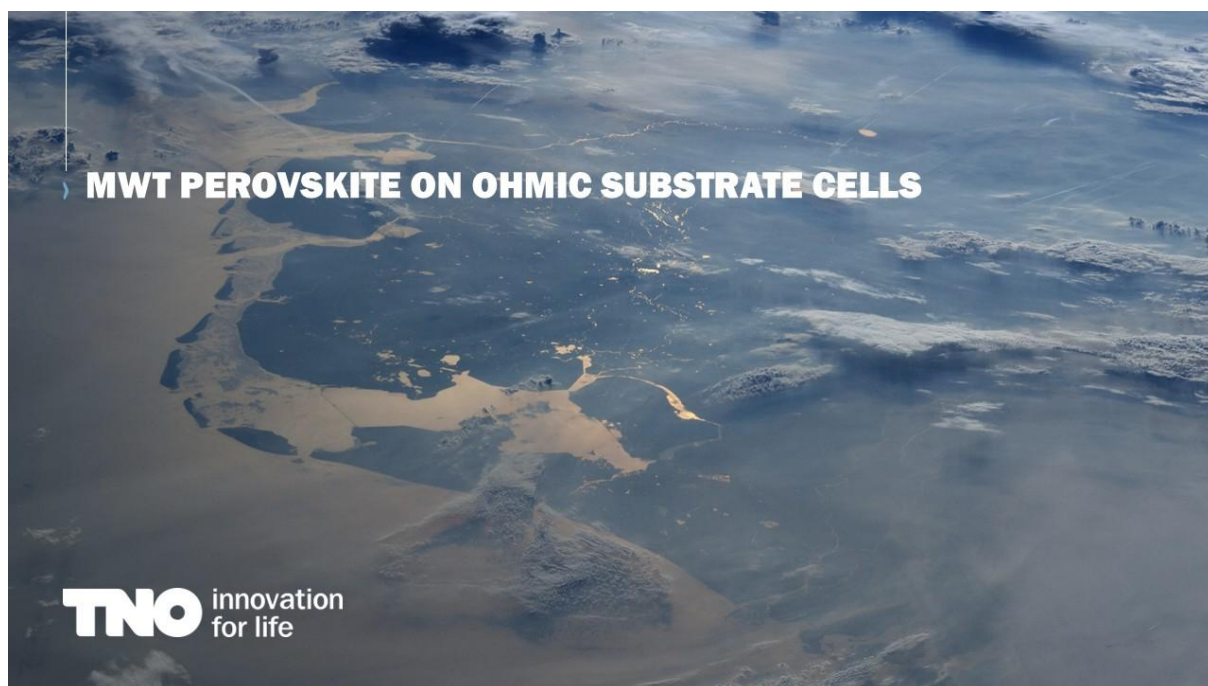
cSi-PSK 2T tandem



Perovskite on ohmic substrate (PSK/OS)

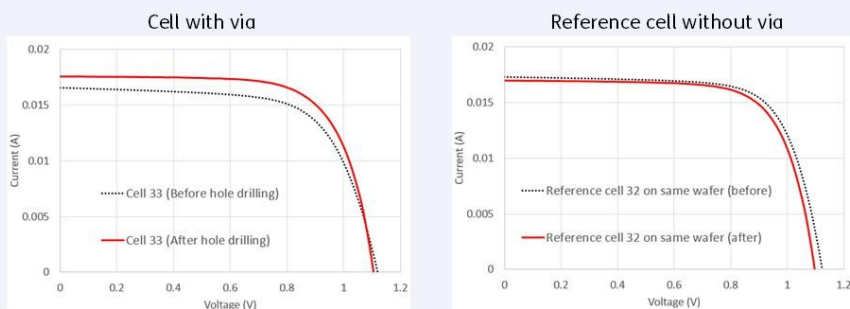


- Through-holes are drilled and filled with metallization paste print, forming a conductive channel (via) from the front electrode towards the rear side.
- An isolation layer is applied to the inside of the through-holes to prevent a shunt.
- MWT perovskite on ohmic substrate (PSK/OS) cells, with a similar architecture as the tandem, are studied first, as a simplified case.



BCworkshop MWT perovskite on ohmic substrate

Through-hole drilling



- Through-holes are drilled in the PSK/OS cells by laser.
- Variations in IV are observed after via drilling, presumably related to transport and handling in air.
- The via drilling does not have a negative effect on the cell performance.

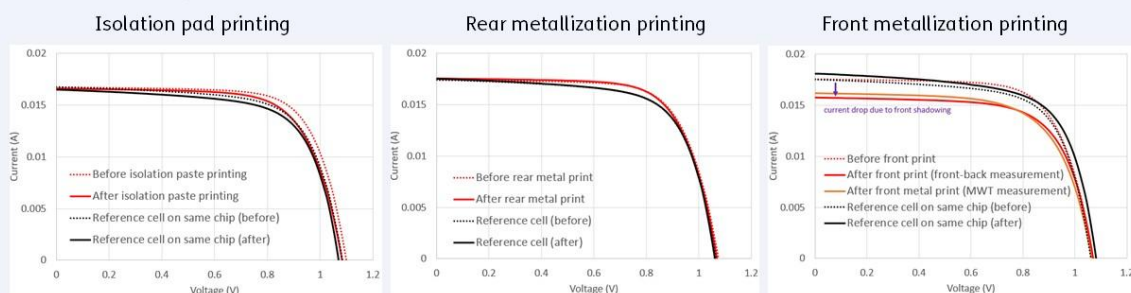
TNO innovation
for life

10 December 2025

9

BCworkshop MWT perovskite on ohmic substrate

Printing



- MWT PSK/OS cells were successfully made.
- Printing steps have no significant effect on the IV characteristics of the cells.
- Current drop for the MWT cells after front metallization print is due to shadowing.

TNO innovation
for life

10 December 2025

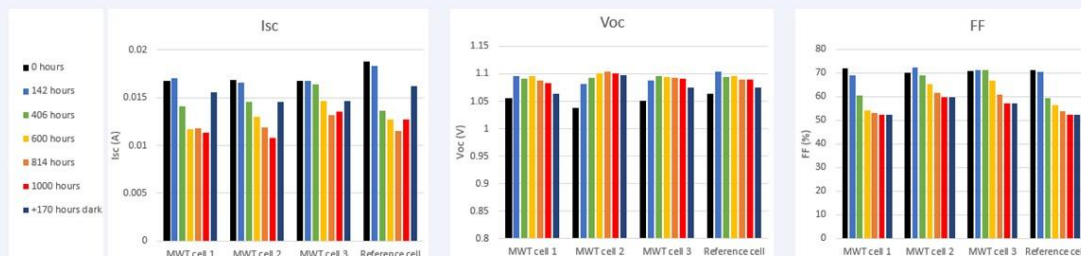
10

BCworkshop MWT perovskite on ohmic substrate

Light stability

Light stability tests (1000 h, green light at 1 sun intensity, under N_2 , at RT) with the MWT PSK/OS cells and front-back contact reference cells.

10 December 2025



- The MWT cells and reference cells show a similar light degradation and dark recovery behavior.
- The MWT via does not have a negative effect on the cell stability under light.

TNO innovation for life

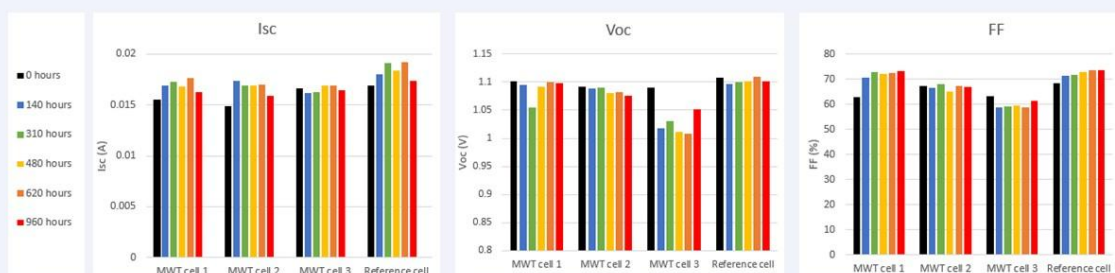
11

BCworkshop MWT perovskite on ohmic substrate

Temperature stability

Temperature stability tests (in dark, under N_2 , at 65 °C) with the MWT PSK/OS cells and front-back reference cells.

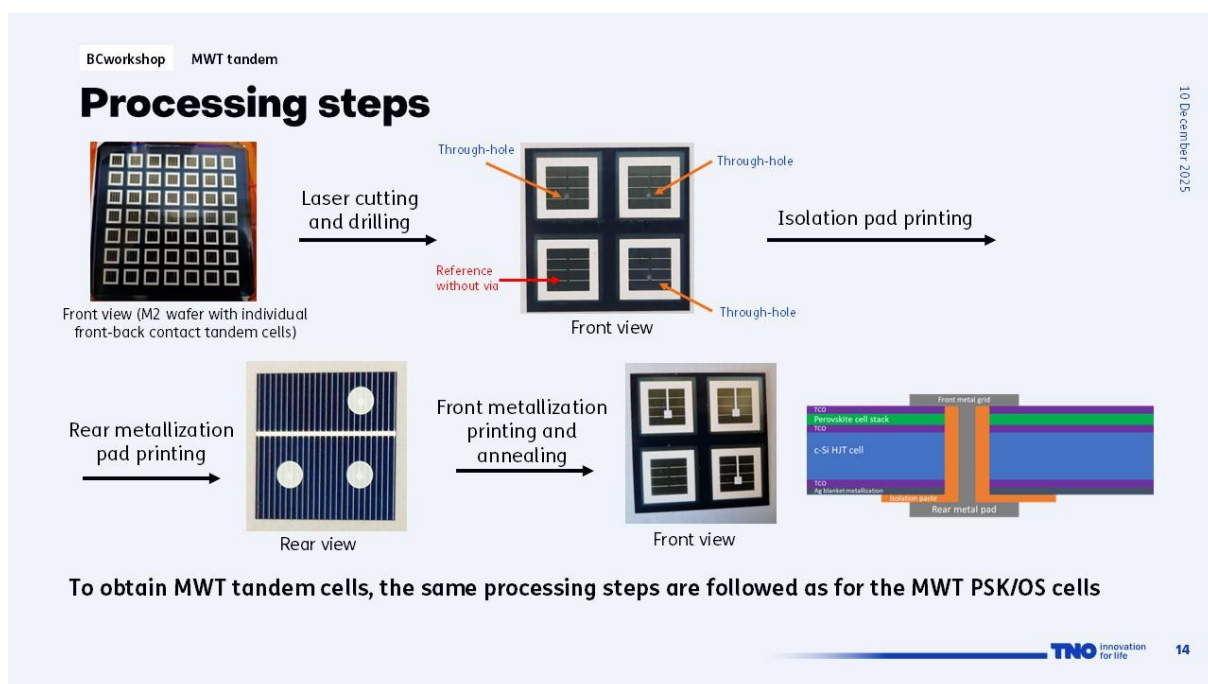
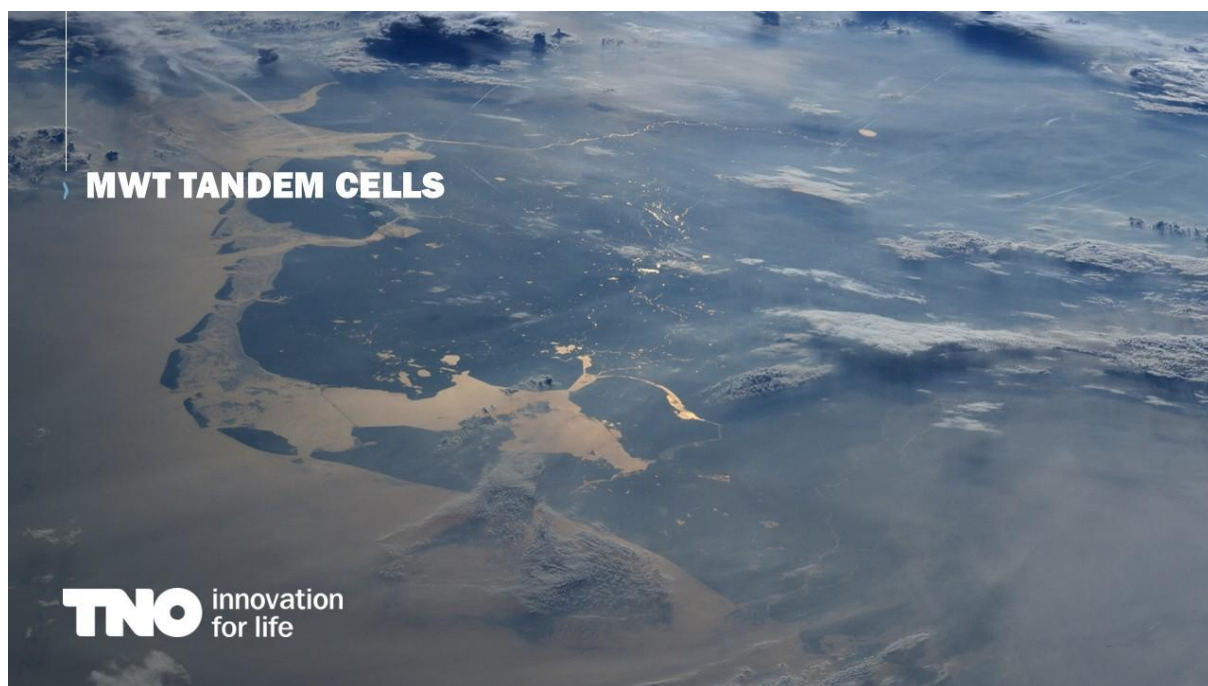
10 December 2025



- The MWT cells and reference cells show a similar behavior.
- Initial Isc increase can be attributed to recovery from the previous light stability test.
- The MWT via does not have a negative effect on the thermal stability.

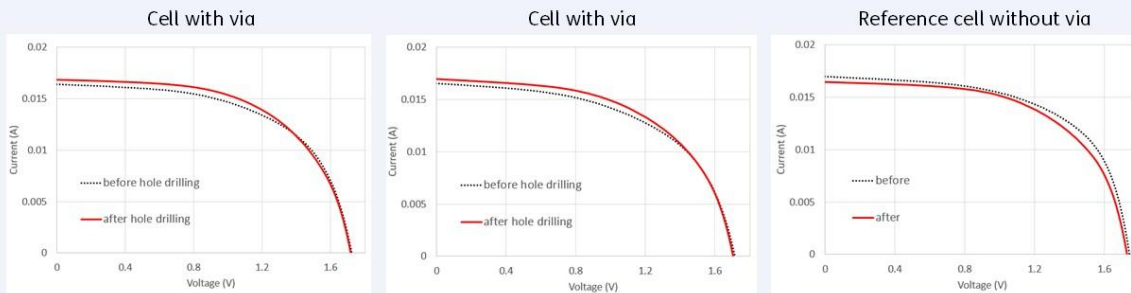
TNO innovation for life

12



BCworkshop MWT tandem

Through-hole drilling



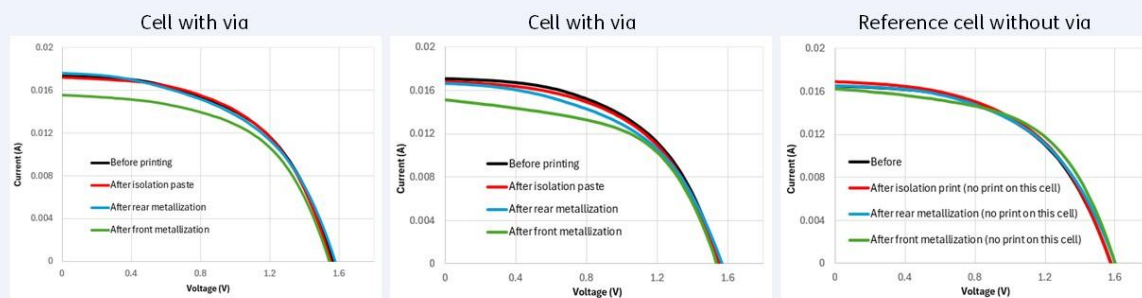
- The low FF of the tandem cells is partly attributed to the shadowed neighbouring cells during measurement, which act as a shunting pathway.
- Laser through-hole drilling does not have a significant effect on the IV characteristics of the tandem cells.

TNO innovation for life

15

BCworkshop MWT tandem

Printing

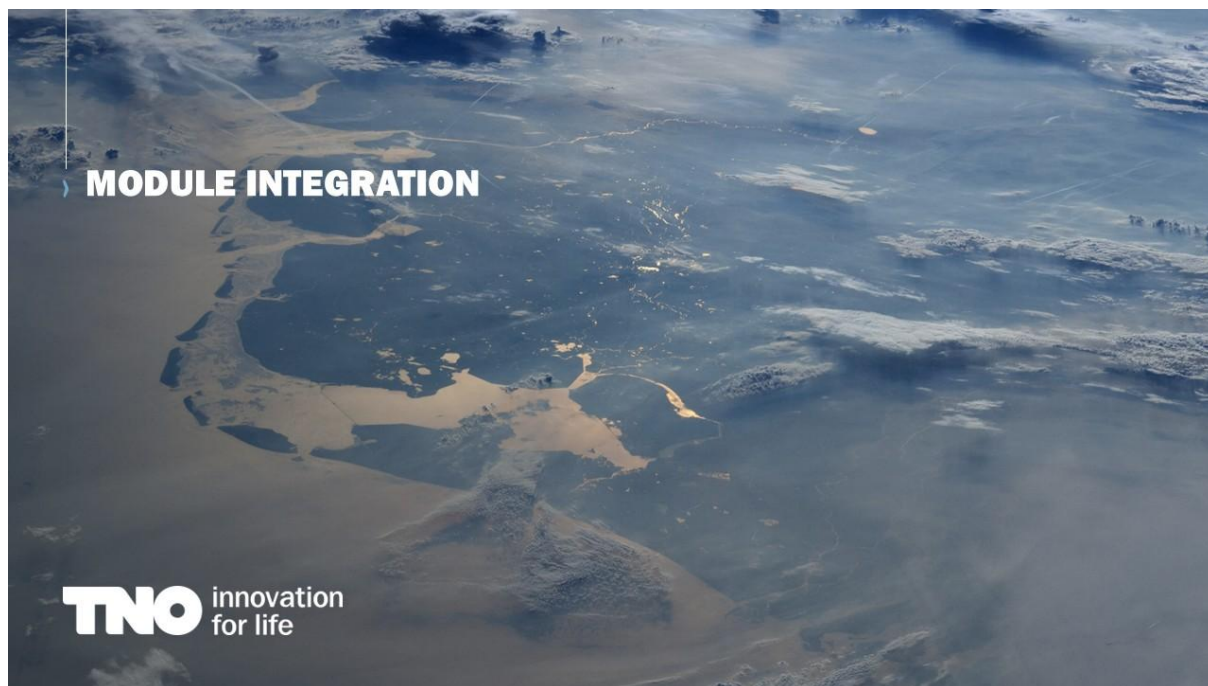


- MWT tandem cells were made successfully.
- Current drop for the MWT cells after front metallization printing is due to shadowing.
- Printing steps do not have a detrimental effect on the IV characteristics of the cell.

Main challenge is obtaining a good and stable via isolation.

TNO innovation for life

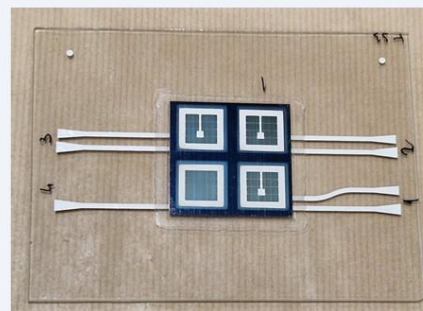
16



BCworkshop Module integration

Module integration

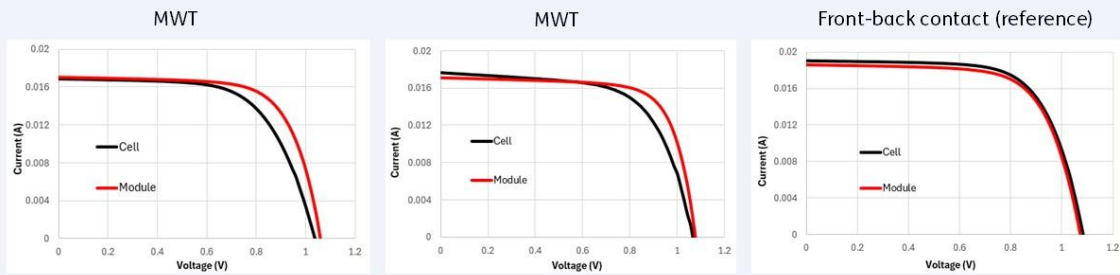
- Mini-module integration from the small 4-cell chips, allowing to contact all cells individually, both as back-contact, as well as front-to-back.
- Main challenges:
 - Ensure good packaging/sealing of the laminate having multiple terminals.
 - Optimization of the lamination step (at low temperature).
 - Preventing stress (cracking at the vias).
- First mini-modules with the MWT PSK/OS cells.



Laminated PSK/OS cells on a rear glass with silver tracks, using ECA for interconnection.

10 December 2025

Module integration



10 December 2025

- The MWT PSK/OS cells still perform well after rear side lamination and interconnection.

Conclusions

- MWT PSK/OS cells were successfully made.
- MWT vias do not have a negative effect on the light and temperature stability of the cells.
- MWT cSi-PSK 2T tandem cells have been made. Current aim is to improve the reliability of the via isolation process.
- Initial results on module integration of the MWT cells, demonstrating interconnection and lamination of the cells.
- An industrially viable process to obtain MWT tandem cells.

10 December 2025

BCworkshop Back-contact cSI-PSK tandem technology

Acknowledgements

TNO SE (Petten)

Bart Geerligs
Eelko Hoek
Eric Kossen
Martijn Ronchetti
Nicolas Guillevin
Victor Rosca
Yu Wu

TNO STA (Eindhoven)

Anne Biezemans
Giulia Lucarelli
Johan Bosman
Marcel Simor
Valerio Zardetto

Levitech

Mark Steltenpool

Funding

This work is supported by TKI-Energie from the Toeslag voor Topconsortia voor Kennis en Innovatie (TKI's) of the Ministry of Economic Affairs and Climate of the Netherlands, project BC Tandem.



Partners:



10 December 2025

TNO innovation
for life

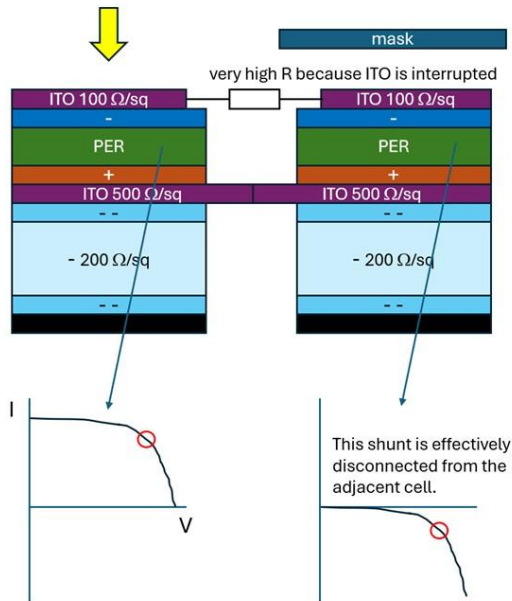
21

THANK YOU FOR YOUR TIME

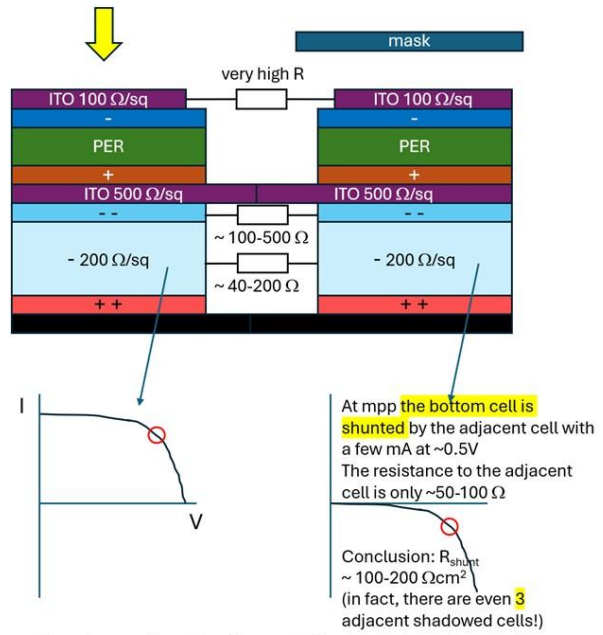


Melvin ten Kate (PhD)
TNO Solar Energy
Energy and Health Campus
Petten, the Netherlands
melvin.tenkate@tno.nl

TNO innovation
for life



PSC on ohmic substrate



Tandem cell with adjacent shadowed tandem cells