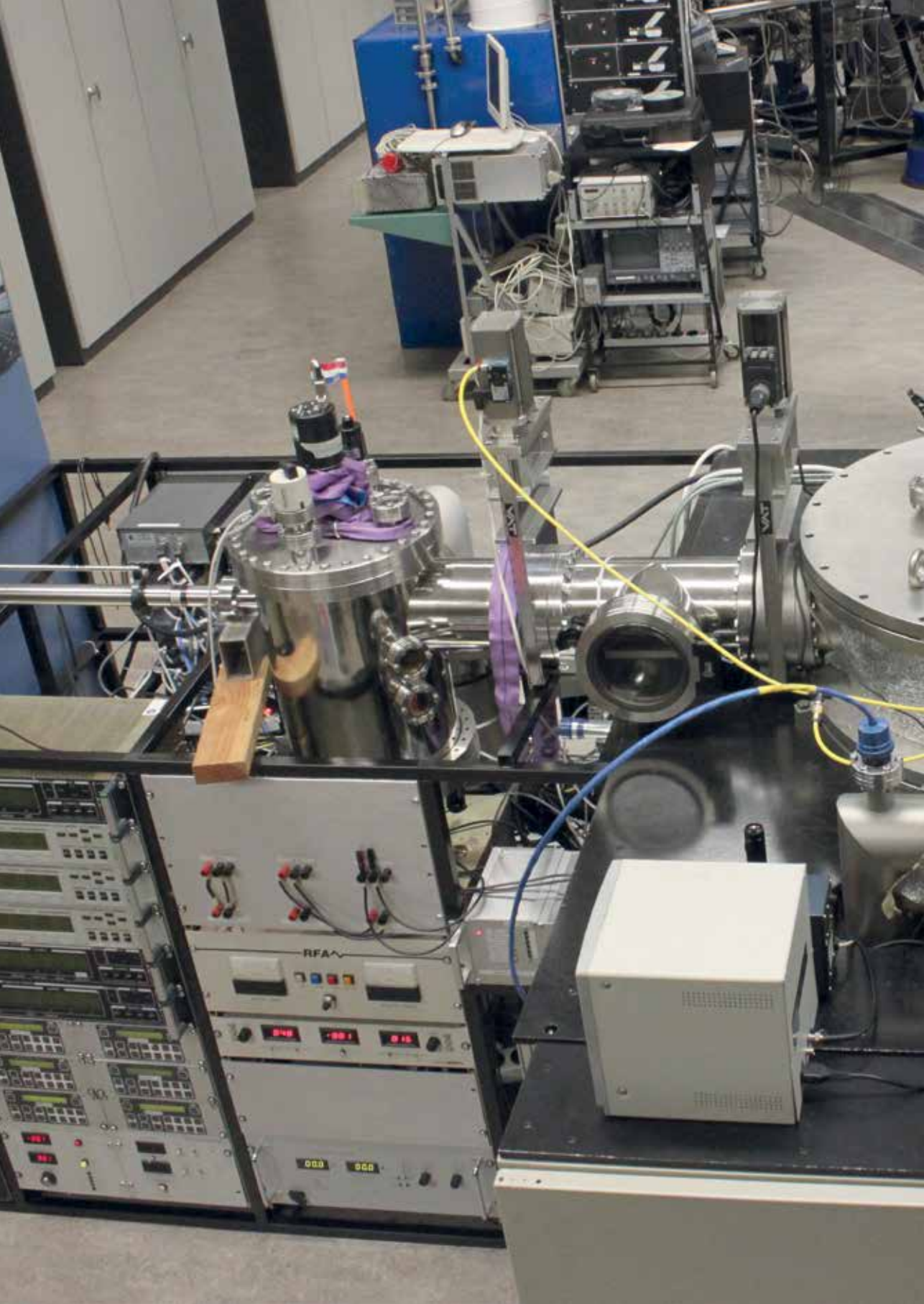


Eindverslag Perspectiefprogramma FLASH

Fundamentals and Application
of Silicon Heterojunction solar cells



Toegepaste en Technische wetenschappen



Eindverslag

Perspectiefprogramma FLASH

Fundamentals and Application
of Silicon Heterojunction solar cells

Inhoud

Werking heterojunctie zonnecellen 4

Evolutie van zonneceltechnologie 5

FLASH-programmagegevens 8

FLASH-projecten 9

Verliezen bij metaalcontact beperken 11

Erwin Kessels (TU/e) / Bart Macco (TU/e)

Zonnecel als thermodynamisch concept 13

Erwin Kessels (TU/e) / Sjoerd Smit (TU/e)

Zicht op milieubelasting en productiekosten 15

Wilfried van Sark (UU) / Atse Louwen (UU)

Twee nieuwe lagen 18

Ruud Schropp (TU/e) / Henriette Gatz (TU/e)

Opschalen van nieuwe productietechnieken 20

Ruud Schropp (TU/e) / Yinghuan Kuang (TU/e)

Begrip van ionenbombardement 22

Ruud Schropp (TU/e), J.K. Rath (UU) / Kees Landheer (UU)

Rol van defecten bij ladingsverlies 24

Arno Smets (TUD) / Ravi Vasudevan (TUD)

Ladingsvangers onklaar maken 27

René van Swaaij (TUD) / Dimitris Deligiannis (TUD)

Simuleren van grenslaageffecten 30

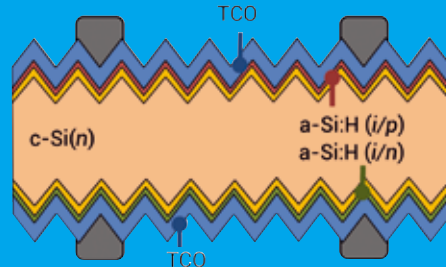
Gilles de Wijs (RU), Rob de Groot (RU) / Ebrahim Hazrati (RU), Karol Jarolimek (RU)

Werking heterojunctie zonnecellen

Zonnepanelen bestaan uit meerdere aan elkaar geschakelde zonnecellen. De meeste zonnecellen zijn gemaakt van silicium. Invallend licht maakt een negatief geladen elektron los van een siliciumatoom. Hierdoor blijft een positief geladen 'gat' over. Het elektron gaat door de zonnecel heen naar de achterkant, waardoor deze kant negatief geladen wordt. Als je de boven- en onderkant van de cel met elkaar verbindt, gaat er een elektrische stroom lopen. Silicium kun je in verschillende vormen maken. In de kristallijne soort bevinden de siliciumatomen zich in een regelmatig rooster. In amorf silicium, dat veelal gemaakt wordt in de vorm van ultradunne films, liggen de siliciumatomen daarentegen wanordelijk door elkaar. Hoe regelmatiger het kristalrooster, des te efficiënter het silicium het geabsorbeerde zonlicht omzet in elektriciteit, maar des te moeilijker en duurder het is om te maken.

Voordelen heterojuncties

Zonnecellen die een grensvlak tussen kristallijn en amorf silicium bevatten, zogeheten heterojunctie zonnecellen, combineren de hoge efficiëntie van kristallijn silicium met de goedkopere en materiaalzuinigere productiemethode van dunne film amorf silicium. Daarnaast zorgt een dun toplaagje van amorf silicium bovenop de kristallijn siliciumplak ervoor dat defecten aan het oppervlak van het kristallijne materiaal elektronisch worden gedeactiveerd (ook wel passivatie genoemd), wat ladingsverliezen vermindert en daarmee de efficiëntie van de zonnecel verbetert.



Opbouw zonnecel

Het hart van een heterojunctie zonnecel bestaat uit kristallijn silicium. Aan de boven- en onderkant daarvan wordt vaak een dun laagje amorf silicium gelegd, om defecten aan het oppervlak van het kristallijn silicium te passiveren. Door aan de bovenkant een laagje silicium te leggen dat zodanig gedoteerd (opzettelijk verontreinigd met een ander element) is dat het voornamelijk de positief geladen gaten geleidt en aan de onderkant een laagje dat juist selectief werkt voor elektronen, maak je er een zonnecel van. Om de stroom af te voeren, worden de boven- en onderkant daarnaast nog gecoat met transparante geleidende oxides (TCO). De dikte van dit TCO wordt zo gekozen dat deze laag tevens functioneert als anti-reflectielaag. Helemaal aan de buitenkant zitten de metalen contacten die de elektriciteit wegleiden naar het stroomcircuit. Ten tijde van de start van het FLASH-programma was het hoogst behaalde rendement van zo'n configuratie 23 procent, in een labsetting. Zes jaar later heeft het Japanse bedrijf Kaneka, waarmee de Nederlandse onderzoeksgroepen verenigd in het FLASH-programma samenwerken, op een 180 vierkante centimeter grote wafer een rendement van 26,6 procent gerapporteerd.

Evolutie van zonneceltechnologie

In het FLASH-programma zochten onderzoekers naar manieren om in een zonnecel zonlicht efficiënter om te zetten in elektriciteit, tegen lagere kosten. Daarnaast hebben de wetenschappers onderzocht of het mogelijk is een aantal van de zeldzame materialen die de huidige zonnecellen bevatten te vervangen door grootschaliger beschikbare alternatieven.

Het FLASH-programma was een van de eerste STW Perspectiefprogramma's dat als één consortium werd ingediend, vertelt programmaleider Ruud Schropp van de Universiteit Utrecht en de Technische Universiteit Eindhoven. 'Het programma bestond uit vier op elkaar aansluitende thema's, waarvoor we één centrale gebruikerscommissie hebben ingesteld. Op de eerste plaats hebben we het begrip verdiept van de interfaces tussen de verschillende lagen in een zonnecel, en van de oppervlakken van die lagen. Een belangrijk aandachtspunt daarbij was hoe je er voor zorgt dat je die oppervlakken optimaal passeert, dat wil zeggen dat je ervoor zorgt dat aanwezige defecten op het oppervlak geen elektrische lading wegvangen. Daarnaast hebben we gekeken wat er gebeurt als je die lagen met elkaar integreert in een werkende zonnecel. Eén zonnecel van 1 cm² maakt echter nog geen paneel, dus hebben we ook bestudeerd wat er gebeurt als je zo'n cel van labschaal opschaaft naar productieschaal. En tot slot hebben we de heterojunctietechnologie op economische en milieuaspecten vergeleken met de bestaande kristallijne siliciumcellen.'

Natuurlijke ontwikkeling

Het FLASH-programma was het resultaat van een natuurlijke ontwikkeling in het landschap van Nederlandse zonnecelonderzoekers, vertelt Schropp over de totstandkoming ervan. 'Rond 2010 kende het Nederlandse zonnecelonderzoek twee grote speerpunten: kristallijn en amorf silicium. ECN had bijvoorbeeld een hele sterke kristallijne poot, en er was een aantal goede dunne-filmgroepen. Door deze sterktes in een programma te verenigen, konden we internationaal toponderzoek uitvoeren.' Heterojuncties hadden grote beloften: ze hadden een hoger rendement dan kristallijne wafers, ze zouden goedkoper gemaakt moeten kunnen worden omdat je minder materiaal en lagere procestemperaturen nodig hebt, en ze zouden om die redenen ook minder milieubelastend zijn.

Gevraagd naar de belangrijkste opbrengsten van het programma telt Schropp op zijn vingers af: 'We hebben een aantal nieuwe transparante materialen ontwikkeld om efficiënt elektrisch contact te maken met het silicium. Ook hebben we fundamenteel begrip opgedaan over hoe je defecten moet uit-



Apparaten van Meyer Burger

schakelen, en op welke plaatsen in de stapeling van verschillende lagen in de cel je dat vooral moet doen. We kunnen nu beter bepalen waar ladingsverliezen kunnen gaan optreden, en hoe je dat kunt voorkomen. Er zijn kristallijne dunne lagen ontwikkeld die gedoteerd zijn, maar transparanter dan gewone laagjes. En misschien nog wel het belangrijkste: we hebben een aantal promovendi opgeleid, die nu met gedegen kennis de markt op gaan.'

Hecht netwerk

Naast de inhoudelijke kennis, heeft het programma ook iets anders opgeleverd: een hecht en vanzelfsprekend nationaal netwerk van onderzoekers en bedrijven die zich bezighouden met zonnecellen en dunne lagen. Want dit Perspectiefprogramma was feitelijk de eerste gelegenheid waarbij er echt op nationale schaal werd samengewerkt, herinnert voorzitter van de centrale gebruikerscommissie Arthur Weeber van ECN zich. 'Eerder waren er natuurlijk ook al wel samenwerkingsverbanden, maar die waren meer bilateraal van aard. Zo hadden de deelnemende universiteiten nooit met zijn allen aan dit onderwerp gewerkt. En aan de Radboud Universiteit, waar men veel ervaring heeft met computer simulaties, had men nog niet eerder aan zonnecellen gerekend. Ik vind dan ook een van de belangrijkste opbrengsten van het programma het netwerk dat we ermee hebben opgebouwd. Samenwerking binnen Nederland is nu standaard in dit veld. Er zijn veel nieuwe samenwerkingsprojecten uit voortgekomen, onder andere in TKI- en Europees verband. De losse groepen zijn sterker geworden. En de wetenschappelijke kennis is veel dichterbij de toepassing gekomen.'

Dramatische marktontwikkelingen

Gedurende de looptijd van het programma heeft de zonnecellenmarkt een dramatische verandering ondergaan, die aan de start van het programma niet voorzien was. De prijs van zonnepanelen is enorm gedaald, met name vanwege investeringsmaatregelen en daarmee gepaard gaande overcapaciteit van de productie in China. Een aantal industriële partners die betrokken

waren aan het begin van het programma, heeft het dan ook niet gered tot aan het einde. Ook zijn er wat overnames en fusies geweest waardoor sommige bedrijven inmiddels onder een andere naam opereren dan zes jaar geleden. Meyer Burger Netherlands B.V. was er daar een van, vertelt Dana Borsa, manager research bij dat bedrijf. 'Toen het programma begon, heette mijn werkgever nog OTB Solar, een relatief klein bedrijf gevestigd in Eindhoven dat machines ontwikkelde en verkocht aan zonnecelfabrikanten voor de depositie van plasmagebaseerde antireflectiecoatings zoals siliciumnitride. Tijdens de looptijd van het programma zijn wij eerst overgenomen door Roth & Rau en later door Meyer Burger, een groot internationaal bedrijf. Door de overnames is onze focus veranderd, en zijn wij op zoek gegaan naar gespecialiseerde technologieën om ons productportfolio te differentiëren van die van ons moederbedrijf.' Eén van deze technologieën is atoomlaagdepositie van aluminium-oxidelagen. Borsa's afdeling is betrokken bij de productie en ontwikkeling van apparatuur om dunne lagen te deponeren. 'Voor ons als machinebouwer is het belangrijk om op de hoogte te blijven van alle laatste technologische ontwikkelingen en om nieuwe applicaties te identificeren voor onze producten. Wij willen zo vroeg mogelijk weten welke typen lagen en materialen het meest veelbelovend zijn voor de toekomst, en hoe we die kunnen maken met onze machines. Binnen het FLASH-programma was voor ons met name de nieuw opgedane kennis op het gebied van atoomlaagdepositie van (gedoteerde) indiumoxidelagen interessant. Deze soort lagen kunnen nieuwe applicaties vormen voor onze machines, en de kennis opgedaan binnen dit programma helpt ons in de ontwikkeling en optimalisatie van onze producten, met als resultaat groei en een sterkere positie op de markt.' Nederland huisvest een aantal belangrijke machinebouwers voor de zonnecelindustrie, benadrukt ook Weeber. 'Vanuit de wetenschap kunnen we deze apparatuurbouwers ondersteunen met bruikbare processen, waarmee zij wereldwijd kunnen concurreren.'

Zonnige toekomst

De toekomst voor zonnecellen ligt wat Schropp en Weeber betreft in de heterojunctiecel, met enkele belangrijke aanpassingen. 'We richten ons nu op cellen met gepassiveerde selectieve contacten. Door metaaloxides in plaats van zuivere metalen te gebruiken als contact, wordt het mogelijk nog dunneren cellen te maken. Dat bespaart materiaal en daarmee geld. En hoewel het FLASH-programma in deze vorm geen vervolg heeft, zijn er wel verschillende vervolgprojecten ingezet in het kader van de TKI-regeling van de overheid. Die projecten hebben meestal een wat kortere looptijd, en liggen nog wat dichter tegen de toepassing aan.' Toch zal het nog even duren voordat heterojunctiecellen in grote hoeveelheden op Nederlandse daken te zien zullen zijn, zegt Weeber. 'Fabrikanten willen evolutie, geen revolutie. Voor de productie van heterojunctiecellen moeten zij volledig nieuwe fabrieken gaan bouwen. En dat gaan ze pas doen als die technologie significant beter en goedkoper is dan de kristallijne zonnepanelen die nu overal op de daken liggen.'

FLASH programmagegevens



Budget

3,8 miljoen euro, waarvan
0,9 miljoen euro werd
bijgedragen door de
deelnemende bedrijven en
instituten (cash steun 206 k€,
in kind steun 652 k€)

Omvang

9 projecten met
7 promovendi,
3 postdocs
en 6 technici

Looptijd

2010 - 2016

Universiteiten

Technische Universiteit Delft
Technische Universiteit Eindhoven
Radboud Universiteit Nijmegen
Universiteit Utrecht

Partners

ECN
Hanwha Q CELLS
Meyer Burger Netherlands
OM&T
Oxford Instruments
Tempres Systems

Projectleiders

Prof.dr. R.E.I. Schropp
programmaleider
Universiteit Utrecht,
Technische Universiteit Eindhoven

Prof. dr. ir. W.M.M. Kessels
Technische Universiteit Eindhoven

Dr. J.K. Rath
Universiteit Utrecht

Dr. W.G.J.H.M. van Sark
Universiteit Utrecht

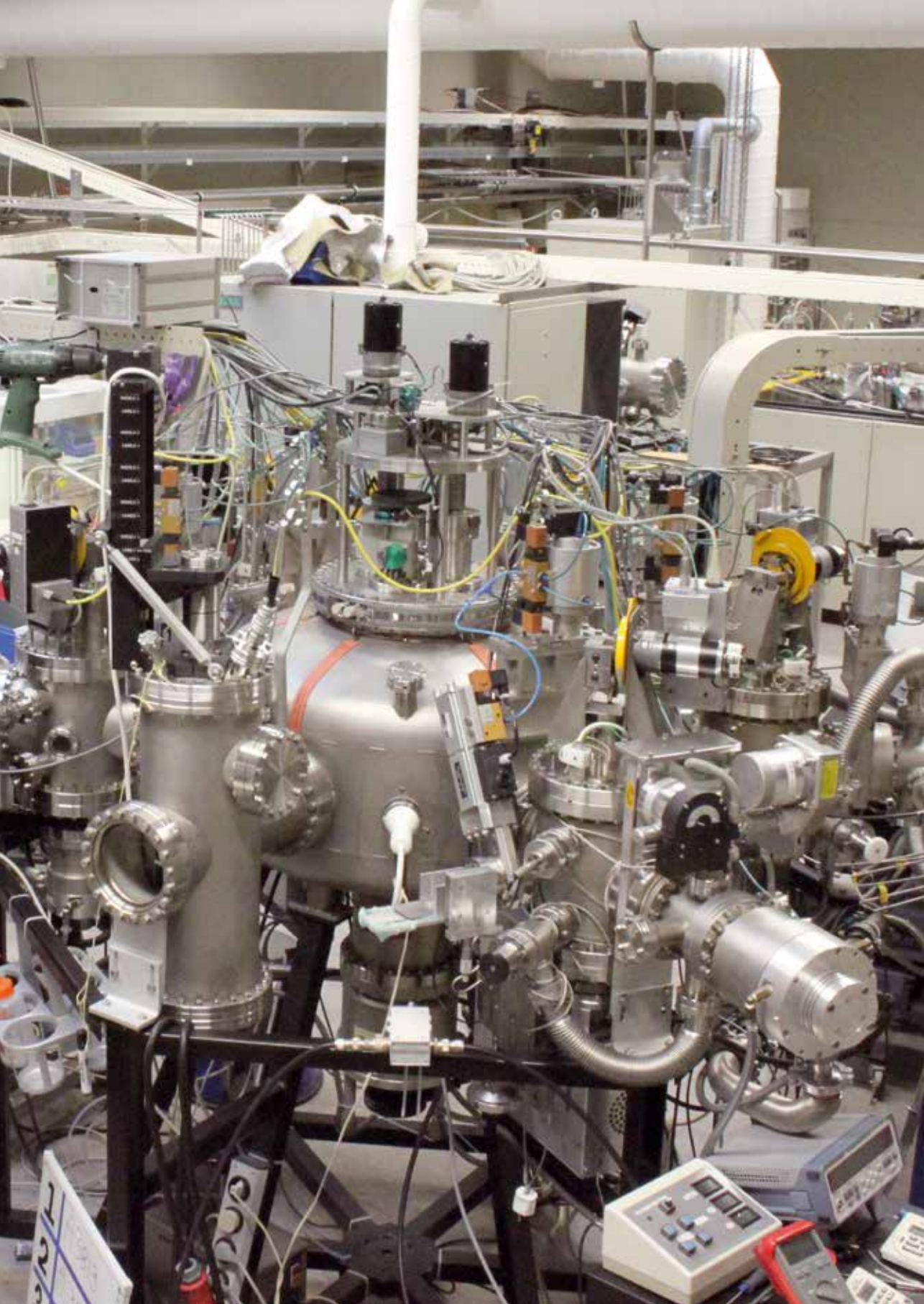
Prof.dr.ir. A.H.M. Smets
Technische Universiteit Delft

Dr. R.A.C.M.M. van Swaaij
Technische Universiteit Delft

Dr.ir. G.A. de Wijs
Radboud Universiteit Nijmegen

Projecten
Perspectiefprogramma
FLASH

Fundamentals and Application
of Silicon Heterojunction solar cells



Verliezen bij metaalcontact beperken

Erwin Kessels (TU/e) / Bart Macco (TU/e)

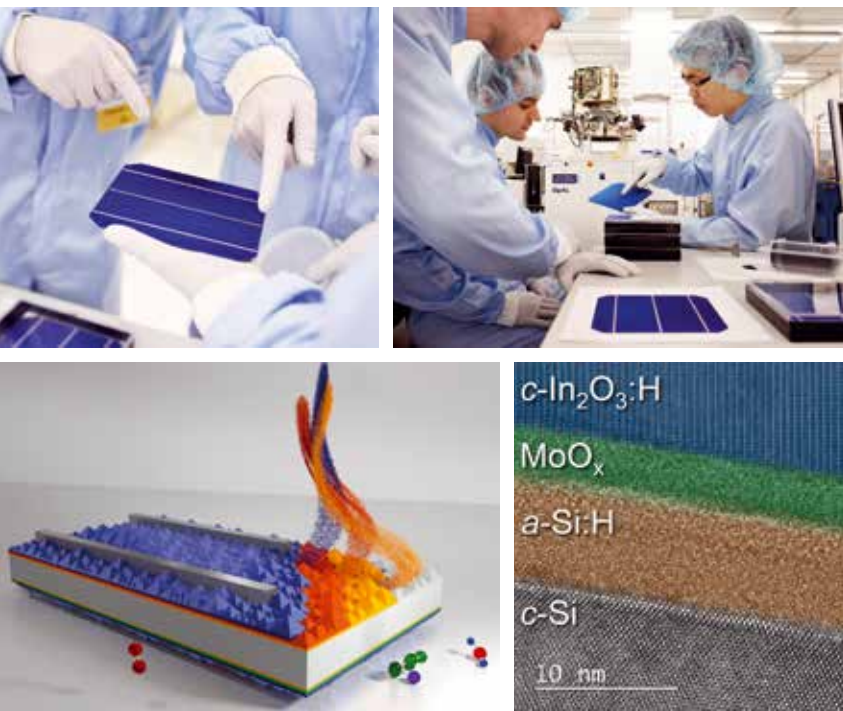
project 12171

In een traditionele silicium zonnecel gaat de meeste elektrische lading verloren op de plek waar het metaal contact maakt met het silicium. Om het rendement van de zonnecel te kunnen verhogen, is het dus van belang om dat contact te verbeteren, door middel van zogeheten passiverende contacten. Promovendus Bart Macco onderzocht aan de Technische Universiteit Eindhoven nieuwe depositietechnieken om innovatieve, zeer transparante oxidelagen te maken voor zulke passiverende contacten, waarbij minder verliezen optreden.

‘Om de verliezen tussen het silicium en het metaal te minimaliseren, wilden we een elektrisch contact maken dat selectief is en alleen de positieve of de negatieve ladingen doorlaat. Bovendien moeten de materialen in die contacten zo transparant mogelijk zijn,’ vertelt Macco. Hij gebruikte atoomlaagdepositie (ALD) om dunne lagen indiumoxide te maken, gedoteerd met waterstofatomen. Met atoomlaagdepositie leg je een dun laagje materiaal neer op een oppervlak. Het voordeel van deze techniek ten opzichte van het vaak gebruikte sputteren, is dat het ALD-proces veel minder schade toebrengt aan de onderliggende lagen. Daarnaast maakt ALD het mogelijk om zo’n laag heel selectief te doteren: te voorzien van een klein gehalte aan een ander materiaal, dat er bijvoorbeeld voor zorgt dat negatieve ladingen makkelijker door het materiaal heen bewegen. Van indiumoxide was al bekend dat het veel gewenste eigenschappen heeft: het is transparant voor de meeste golflengtes die zonlicht bevat, en de elektrische geleidbaarheid ervan is hoog. Toch functioneerde de eerste laag met waterstof gedoteerde indiumoxide die Macco met ALD produceerde niet zo goed als verwacht. Dat bleek te komen door de structuur van het metaaloxide: er was een amorfe laag ontstaan. Door de laag na depositie nog een minuut of tien te verhitten tot 200 graden Celsius, werd de laag polykristallijn en haalde hij de verwachte goede geleiding en transparantie.

Zicht op kristallisatie

Macco onderzocht het kristallisatieproces nauwkeurig met behulp van verschillende elektronenmicroscopietechnieken, en bracht zo in kaart onder welke omstandigheden welke structuur ontstaat. ‘ALD is



Onderzoek aan passiverende contacten voor zonnecellen. Zonnecel waar nanolaagjes op aangebracht zijn (linksboven). Zonnecellen met een dun laagje indiumoxide aangebracht met de ALD-apparatuur in de NanoLab@TU/e clean room (rechtsboven). Artistieke weergave van een zonnecel met nanolaagjes (linksonder). Opname met elektronenmicroscopie van een doorsnede van een zonnecel met nanolaagjes (rechtsonder).

de sleutel gebleken tot een beter begrip van de werking van indiumoxide,' zegt promotor Erwin Kessels. 'We snappen nu veel beter wat de invloed van de kristalstructuur en de hoeveelheid ingebakken waterstof is. Dat opent de weg naar nieuwe toepassingen van dit materiaal, ook op andere soorten zonnecellen zoals nanoraden of perovskiet.' 'Daarnaast heeft een beter begrip van het ALD-proces er ook toe geleid dat we nu kunnen gaan kijken of we ook andere oxidelagen zoals zinkoxide op een beheerste manier kunnen maken,' voegt Macco toe.

Dit soort passiverende contacten is inmiddels niet meer weg te denken uit het zonnecelonderzoek, zeggen beide heren. 'Alle recordbrekende zonnecellen maken gebruik van dit soort contacten. En in die cellen zijn de verliezen op de grenslaag met het oxide inmiddels kleiner dan die in het bulk kristallijn silicium.'

Het Eindhovense onderzoek heeft dan ook een vervolg gekregen in verschillende TKI-projecten. Voor de promovendus leverde het project naast een doctorstitel ook flink wat andere successen op: hij won onder andere de Student Award Competition bij de ALD 2016 conferentie in Dublin, de NEVAC prijs 2013, en de James Harper Award van de Thin Film Division van de American Vacuum Society in 2015.

Zonnecel als thermodynamisch concept

Erwin Kessels (TU/e) / Sjoerd Smit (TU/e)

project 12167

Hoe kun je kennis over de fysica van zonnecellen gebruiken om betere zonnecelontwerpen te maken? Over die vraag boog promovendus Sjoerd Smit zich aan de Technische Universiteit Eindhoven. 'Sjoerd heeft een compleet nieuwe draai gegeven aan het theoretisch begrip van zonnecellen,' vertelt promotor Erwin Kessels.

Een zonnecel is een halfgeleider: het materiaal bevat een zogeheten geleidingsband en een valentieband, en door licht in te vangen kun je een elektron vanuit de valentieband naar de geleidingsband promoveren en hem daarna wegvoeren als elektrische stroom. Logischerwijs zijn de meeste beschrijvingen van de werking van zonnecellen dan ook gebaseerd op halfgeleiderfysica. 'Sjoerd heeft echter gekozen voor een thermodynamische aanpak om de dynamiek in een zonnecel te beschrijven. Als je vanuit zo'n thermodynamisch uitgangspunt kijkt, krijg je een heel ander beeld. En met die beschrijving kun je bovendien voorspellen hoe je je zonnecel zodanig moet ontwerpen dat de efficiëntie ervan zo hoog mogelijk is,' vertelt Kessels.

In zijn boek *Physics of Solar Cells* stelde natuurkundige Peter Würfel als eerste voor om een zonnecel te beschrijven als thermodynamisch systeem. De Eindhovense promovendus heeft dat idee opgepikt en daarop voortgebouwd. 'Je kunt zeggen dat Sjoerd de huidige golf aan nieuwe ideeën over de werking van zonnecellen mede heeft getriggerd.'

Alles draait om orde

Vanuit het thermodynamische gezichtspunt draait de efficiëntie van een zonnecel allemaal om de entropie, de mate van wanordelijkheid in het systeem. Defecten waardoor lading verloren gaat, zorgen voor een verhoging van de entropie. Smit heeft een model ontwikkeld waarmee je die entropie kunt optimaliseren. Hij heeft dit model vervolgens gebruikt om te bepalen wat de optimale vorm van het doteringsprofiel in een kristallijn siliciumcel zou moeten zijn, dus hoeveel van welk 'vervuilend' element je op welke plaats zou moeten introduceren in het silicium. Daarnaast heeft hij aangetoond dat recombinatieprocessen bij de metalen contacten zorgen voor de

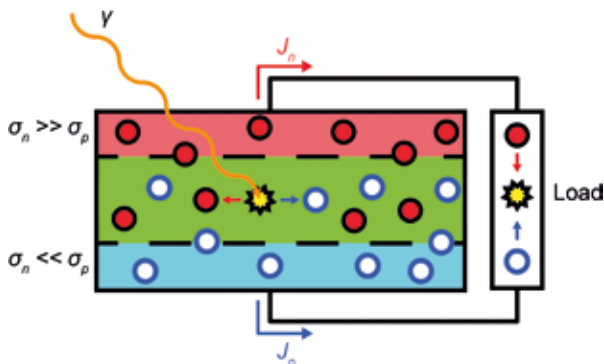


Discussie over de fysische parameters waarmee passiverende contacten geassocieerd kunnen worden.

grootste entropieveranderingen. Door een nieuw soort contacten in te voeren dat selectief is voor negatieve dan wel positieve ladingdragers, zou je de efficiëntie in theorie flink moeten kunnen verbeteren.

Weten waarom het werkt

Kessels: 'Sjoerd heeft drie manieren doorgerekend om dit soort passiverende contacten te maken. Samen met promovendus Bart Macco uit heeft hij het empirische en theoretische begrip van de werking van dit soort selectieve contacten verbeterd.' Macco voegt toe: 'Het was al eerder uit experimenten bekend dat selectieve contacten goed werkten, maar we snaptten eigenlijk nog niet goed waarom dat zo was. Sjoerd kon met zijn model wel die missende verklaring geven.' Kessels: 'Sjoerd heeft onderbouwd waarom passiverende contacten zo belangrijk zijn. Die bijdrage is nu heel hot in het veld. Op de roadmap voor de toekomstige ontwikkelingen van kristallijn silicium zonnecellen is een belangrijke rol weggelegd voor dit soort contacten. Sjoerds werk heeft een wiskundige basis gelegd voor een nieuw numeriek model om het ontwerp van nieuwe zonnecellen al op de tekentafel mee te kunnen optimaliseren.'



Schematische voorstelling van een zonnecel. In het groene deel worden de lichtdeeltjes geabsorbeerd. In het rode en blauwe deel worden de negatieve en positieve elektrische ladingen afgevoerd.

Zicht op milieubelasting en productiekosten

Wilfried van Sark (UU) / Atse Louwen (UU)

project 12172

Hoe verhouden nieuwe silicium heterojunctie zonnecelontwerpen zich wat kostenefficiëntie en milieubelasting betreft tot elkaar en tot conventionele zonnecellen? Dat was de centrale vraag waar promovendus Atse Louwen zich in zijn project aan de Universiteit Utrecht over boog.

Door grote databases met bestaande gegevens te combineren met eigen metingen van het gedrag van verschillende typen cellen in de Nederlandse dagelijkse praktijk, bracht Louwen in kaart hoe ontwerpbeslissingen de uiteindelijke milieubelasting en kostenefficiëntie van zonnecellen beïnvloeden. 'De expliciete doelstelling van dit project was om uitspraken te doen over de milieubelasting en productiekosten van de nieuwe technologieën die binnen de andere projecten bedacht werden,' licht projectleider Wilfried van Sark toe. 'Atse heeft zich dan ook met name gericht op heterojunctie cellen, en deze wat kosten en milieubelasting betreft vergeleken met wat er nu aan zonnecellen op de markt is.' Louwen stond in nauw contact met de onderzoekers van de andere projecten, vertelt hij. 'Ik heb hen veelvuldig gesproken om in kaart te brengen wat er nodig zou zijn om hun ontwerp op grote schaal te produceren. Van elk ontwerp heb ik de benodigde materialen en energiestromen geïnventariseerd, en vervolgens gekoppeld aan de milieubelasting in termen van broeikasgasemissies en energierugverdiëntijd.'

Energiestromen nauwkeurig geanalyseerd

De promovendus ging daarbij niet over één nacht ijs. Voor elk gebruikt materiaal onderzocht hij in de literatuur hoeveel energie het kost om dat materiaal te winnen en te verwerken tot een nuttige grondstof voor zonnecellen. Daarna bracht hij van elk ontwerp in kaart hoe het productieproces zou moeten verlopen, hoeveel energie daarbij verbruikt wordt en hoeveel broeikasgas erbij vrij zou komen. Tot slot berekende hij op basis van het rendement van zo'n cel de energierugverdiëntijd, dus hoe lang het duurt voordat de zonnecel zoveel energie heeft opgewekt dat hij de hoeveelheid energie heeft gecompenseerd die het heeft gekost om hem te maken. Om die terugverdiëntijd goed te kunnen bepalen, gebruikte Louwen de Utrecht Photovoltaic Outdoor Test Facility om van verschillende

typen zonnepanelen te meten wat het daadwerkelijke rendement ervan is onder dagelijkse, Nederlandse omstandigheden. 'Gerapporteerde rendementen van zonnecellen worden bepaald onder ideale standaardcondities,' licht Van Sark toe. 'In Nederland komen die omstandigheden vrijwel nooit voor.'

Realistische opbrengst

In zijn proefschrift laat Louwen zien hoe een serie van zonnepanelen met verschillende samenstelling en van verschillende fabrikanten, geplaatst op het dak van een van de Utrechtse universiteitsgebouwen, zich gedurende een jaar lang gedragen. 'We hebben gemeten wat de opbrengst was afhankelijk van temperatuur, de spectrale samenstelling van het licht, het ingestraalde vermogen en de ingestraalde hoek. En dan zie je dat zo'n paneel in de Nederlandse wolkenluchten over het algemeen maar 150 tot 450 watt per vierkante meter aan vermogen opvangt, in plaats van de 1000 watt per vierkante meter waarmee onder standaardcondities het paneelvermogen wordt bepaald,' zegt de promovendus.

Dit gegeven combineerde Louwen met grote databestanden met door hemzelf gemodelleerde gegevens van opbrengsten van panelen in Europa, Afrika en het Midden-Oosten. Zo bracht hij in kaart hoe de opbrengst van panelen varieert afhankelijk van de locatie waar ze zijn geplaatst, en vooral ook: waarom die variatie is zoals die is. Met dit uitgangspunt berekende de promovendus de energierugverdiëntijd van een zonnecel.

Weinig verschil

'Het blijkt uiteindelijk niet zo heel veel uit te maken welk ontwerp je kiest voor een heterojunctie cel en hoe je de cel vervolgens maakt,' concludeert Louwen. 'Zolang je ervoor zorgt dat de omzettingsefficiëntie vergelijkbaar blijft, valt er niet veel milieuwinst of kostenbesparing te realiseren door voor een ander ontwerp of andere productieprocessen voor de lagen te kiezen.' Dat komt met name omdat de relatief dikke plak kristallijn silicium zowel voor de kosten als voor de milieubelasting een veel grotere invloed heeft. 'Je moet dat silicium zuiveren en kristalliseren, je hebt er veel van nodig, en je gooit relatief veel materiaal weg tijdens het zagen van de wafers,' legt de promovendus uit.



Zonnepanelen testfaciliteit bij de Universiteit Utrecht.

Het devies is dus: zorgen dat die kristallijn siliciumplak zo dun mogelijk kan worden. Op één ander terrein is ook nog een substantiële kostenbesparing te realiseren, voegt Louwen toe: 'Je kunt het zilver dat nu nog vaak gebruikt wordt in de metaalcontacten vervangen door iets anders. Dat zilver wordt op aarde in relatief lage concentraties gevonden: het kost veel energie om dat te winnen en op te zuiveren voor gebruik in zonnecellen.'

Tot slot combineerde Louwen alle gegevens die hij had verzameld in een grootschalige studie naar de ontwikkelingen in de zonnecel-industrie van de afgelopen veertig jaar. Hieruit concludeerde hij dat tussen 2011 en 2018 het omslagpunt is bereikt: in die periode is de cumulatieve energieproductie vanuit het totaal aan geïnstalleerd PV-vermogen groter dan de cumulatieve hoeveelheid energie die door de PV-industrie als geheel is gebruikt. Datzelfde geldt voor de broeikasgasemissies. Dit betekent dat vanaf nu, ondanks dat de industrie vrij sterk blijft groeien, de industrie als geheel een positieve bijdrage blijft leveren aan broeikasgasreductie.

Twée nieuwe lagen

Ruud Schropp (TU/e) / Henriette Gatz (TU/e)

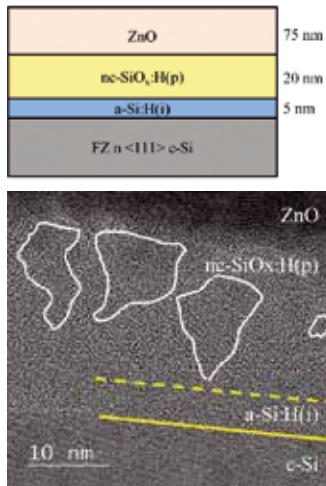
project 12169

Hoe meer licht je in de kristallijne silicium laag van een zonnecel kunt invangen, des te meer elektriciteit je ermee kunt produceren. Om ervoor te zorgen dat zoveel mogelijk van het zonlicht dat bovenop de cel valt de in het midden gelegen laag kristallijn silicium bereikt, onderzocht Henriette Gatz aan de Universiteit Utrecht en de Technische Universiteit Eindhoven alternatieve materialen voor de gedoteerde amorf silicium laag. Daarnaast ontwikkelde ze een alternatief voor de huidige zeldzame materialen bevattende transparante geleidende oxidelaag.

Gatz onderzocht de mogelijkheid om een nanokristallijn siliciumoxide te gebruiken ter vervanging van de huidige vaak gebruikte amorf siliciumlaag gedoteerd met borium. De promovenda wist met een Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition techniek lagen nanokristallijn siliciumoxide te groeien van 20 nanometer dik. Hoewel deze lagen twee keer zo dik zijn als de amorf siliciumlagen die in andere ontwerpen worden gebruikt, bleek de transmissie van licht significant hoger te zijn. Daarnaast bleek toevoeging van siliciumoxide ervoor te zorgen dat de passivatie van de cel beter behouden blijft onder hogere temperaturen. Dit laatste is een belangrijk voordeel: de productie van een zonnecel kent verschillende stappen om de verschillende lagen te maken. Als de temperatuur verhoogd kan worden zonder de eigenschappen van de cel nadelig te beïnvloeden, kunnen er meer verschillende soorten processen en materialen worden gebruikt om bijvoorbeeld de elektrische contacten te maken.

Alternatief oxide

Voor een silicium heterojunctie zonnecel waarbij een deel van de elektrische contacten aan de bovenkant wordt gemaakt, is het van belang dat de transparante geleidende oxidelaag bovenaan een zo hoog mogelijke geleiding heeft. Tegelijk moet deze laag zoveel mogelijk licht doorlaten naar de ondergelegen kristallijn siliciumlaag. De meest gebruikte legering om deze laag te maken, is op dit moment indiumtinoxide. Hoewel het uitstekend dienst doet, heeft dit materiaal een belangrijk probleem: het element indium is schaars. Gatz ging op zoek naar een alternatief met dezelfde eigenschappen, maar dat bestaat uit elementen die in overvloed beschikbaar zijn.



Schematische en elektronenmicroscopische doorsnede van een c-Si cel met SiO_x p-laag en ZnO contactlaag.



Henriette Gatz (rechts) tijdens de 'best collaboration award' op een conferentie.

Zij ontwikkelde met behulp van atoomlaagdepositie een met borium gedoteerde zinkoxide laag. Met behulp van technieken als reflectie-transmissiespectroscopie, ellipsometrie en elektronenmicroscopie bestudeerde ze de interne structuur van de laag en relateerde ze deze aan defecten en de levensduur van elektronen in het materiaal.

Veelbelovend alternatief

Het zinkoxide bleek een veelbelovend indiumvrij alternatief te vormen, waarmee vergelijkbare fotostroomdichtheden in het silicium kunnen worden gegenereerd. Helaas werd de algehele efficiëntie van de cel wel iets lager dan wanneer er gebruik wordt gemaakt van indiumtinoxide. De reden hiervoor is nog niet geheel duidelijk. Omdat de promovenda en passant een nieuwe, veiligere methode ontwikkelde om de zinkoxidelaag te maken, lijkt het echter alsnog de moeite waard te zijn om de toepasbaarheid van zinkoxide voor fotovoltaïsche toepassingen verder te onderzoeken en zo zonnecellen volledig indiumvrij te maken.

Opschalen van nieuwe productietechnieken

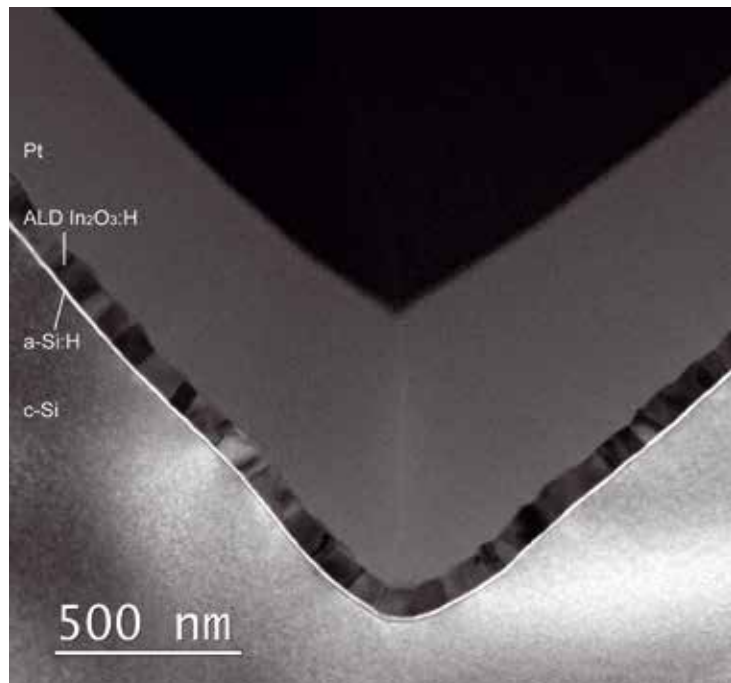
Ruud Schropp (TU/e) / Yinghuan Kuang (TU/e)

project 12170

Postdoc Yinghuan Kuang heeft aan de Technische Universiteit Eindhoven en in nauwe samenwerking met ECN specifieke bevindingen uit de andere projecten opgeschaald naar daadwerkelijke cellen. Hij testte een aantal van de veelbelovende materialen en productiemethoden op 6 inch wafers.

‘Yinghuan Kuang heeft zich met name gericht op het doorontwikkelen van het veelbelovende met waterstof gedoteerde indiumoxide als passiverende transparante oxidelaag,’ vertelt projectleider Ruud Schropp. ‘En dat is gelukt: hij wist op een volledig waferoppervlak van 6 inch met behulp van atoomlaagdepositie kwalitatief goede lagen indiumoxide te maken.’

Indiumoxide heeft een betere elektrische geleiding en laat zowel rood als blauw licht beter door naar de onderliggende lagen dan het huidige gebruikte materiaal indiumtinoxide (ITO).



Hoge-resolutie transmissie elektronenmicroscopie weergave van een getextureerde c-Si zonnecel met indiumoxide contactlaag.

Dit materiaal wordt over het algemeen gemaakt door het op de siliciumwafer te sputteren. Dit proces zorgt er echter voor dat er defecten ontstaan op de grenslaag tussen het silicium en het metaaloxide, waardoor je lading verliest. Met atoomlaagdepositie blijkt er ook op grote oppervlakken minder schade te ontstaan, waardoor het algehele rendement van de cel verbetert. Deze depositiemethode wordt dan ook op dit moment gebruikt om ook zonnecellen van andere soorten materialen te verbeteren, zoals perovskietcellen.

'Daarnaast heeft Yinghuan Kuang gekeken naar een alternatief materiaal voor gedoteerd amorf silicium als selectieve laag voor de geleiding van positieve ladingen,' zegt Schropp. Met behulp van radio frequency Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition maakte Kuang een laag van 20 nanometer dik nanokristallijn silicium met een overschot aan positieve ladingsdragers. Hoewel deze laag twee keer zo dik is als een conventionele amorf siliciumlaag, bleek hij veel meer licht door te laten, en elektriciteit minstens even goed te geleiden als het alternatief. ECN heeft vervolgens aangetoond dat dit materiaal ook met succes op grotere wafers kan worden gedeponeerd, waardoor het interessant lijkt voor toepassing in daadwerkelijke zonnecellen.

Begrip van ionenbombardement

Ruud Schropp (TU/e), J.K. Rath (UU) / Kees Landheer (UU)

project 12164

Er zijn verschillende manieren om een dunne laag amorf silicium bovenop een plak kristallijn silicium te zetten. Een van die manieren is Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition (PECVD). Aan de Universiteit Utrecht onderzocht promovendus Kees Landheer hoe dit proces eigenlijk werkt, en welke parameters de uiteindelijke eigenschappen van de gedeponeerde laag bepalen.

‘Je verwarmt een substraat van silicium tot 130 graden Celsius. Dan neem je silaangas, daar zet je een radiofrequente ontlading op, en dan krijg je een plasma. De ionen uit dat plasma versnel je naar het substraat, en als je dat goed doet, damp je een laagje amorf silicium op.’ Zoals Kees Landheer het vertelt, klinkt het simpel. Maar het maken van een goed grensvlak tussen amorf en kristallijn silicium is allesbehalve eenvoudig.

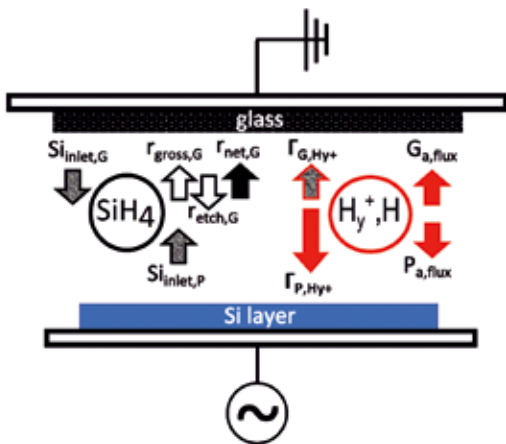
‘Als je de ionen teveel versnelt, schiet je gaten in het substraat. Als je ze te weinig versnelt, dan zijn de ionen te weinig mobiel en krijg je geen mooie laag die overal even dik is. Daarnaast moet je ervoor zorgen dat er voldoende waterstof uit het silaangas op het oppervlak terecht komt om een goed gepassiveerde amorf siliciumlaag te kunnen maken. Het is al met al dus een subtiel spel,’ verklaart promotor Ruud Schropp. ‘Kees heeft het PECVD-proces gemodelleerd, en relaties gelegd tussen de eigenschappen van het plasma en die van de resulterende lagen.’

Speciale meetapparatuur

De promovendus heeft onder andere met een speciaal voor dit doel gebouwd meetapparaat de energie van de ionen gemeten bij verschillende plasmacondities. Met levensduurmetingen kon hij laten zien hoe goed de wafers gepassiveerd waren. Het bleek moeilijk te zijn om de intensiteit en energie van het ionenbombardement rechtstreeks te correleren aan de manier waarop de laag silicium aangroeit. ‘We kunnen op basis van de instellingen van het plasma nog niet voorspellen of een aangegroeide laag kristallijn wordt of amorf,’ zegt Landheer. ‘Wel hebben we een begin gemaakt met het aanleggen van een bibliotheek van gegevens over de relatie tussen

een aantal inputparameters en karakteristieken van de daaruit voortvloeiende laag. Dat is een complex model dat we in de toekomst steeds geavanceerder moeten gaan maken,' voegt Schropp toe.

De ontwikkelde depositie- en meettechniek is inmiddels verhuisd naar een lab in India en wordt daar verder ingezet voor dit type werk aan zonnecellen. 'En de kennis die we hebben opgedaan over het PECVD-proces is niet alleen relevant voor de productie van zonnecellen, maar ook voor de depositie van andere soorten lagen in de micro- en nanoelektronica. Vanuit de industrie is er steeds meer belangstelling voor deze productie bij lage temperatuur, waarbij een ionenbombardement zorgt voor een hoge elektrische kwaliteit van de lagen. Dit werk heeft laten zien dat zowel voor depositie per stuk als voor depositie aan de lopende band de juiste condities zijn te vinden. Dat biedt de industrie ook handvatten om te besparen op de productiekosten van zonnecellen,' sluit Schropp af.



Schematische voorstelling van de reactor waarin aan de linkerkant de silaanstromen en aan de rechterkant de bewegingen van het waterstof zijn weergegeven.



Promotie van Kees Landheer in Utrecht.

Rol van defecten bij ladingsverlies

Arno Smets (TUD) / Ravi Vasudevan (TUD)

project 12166

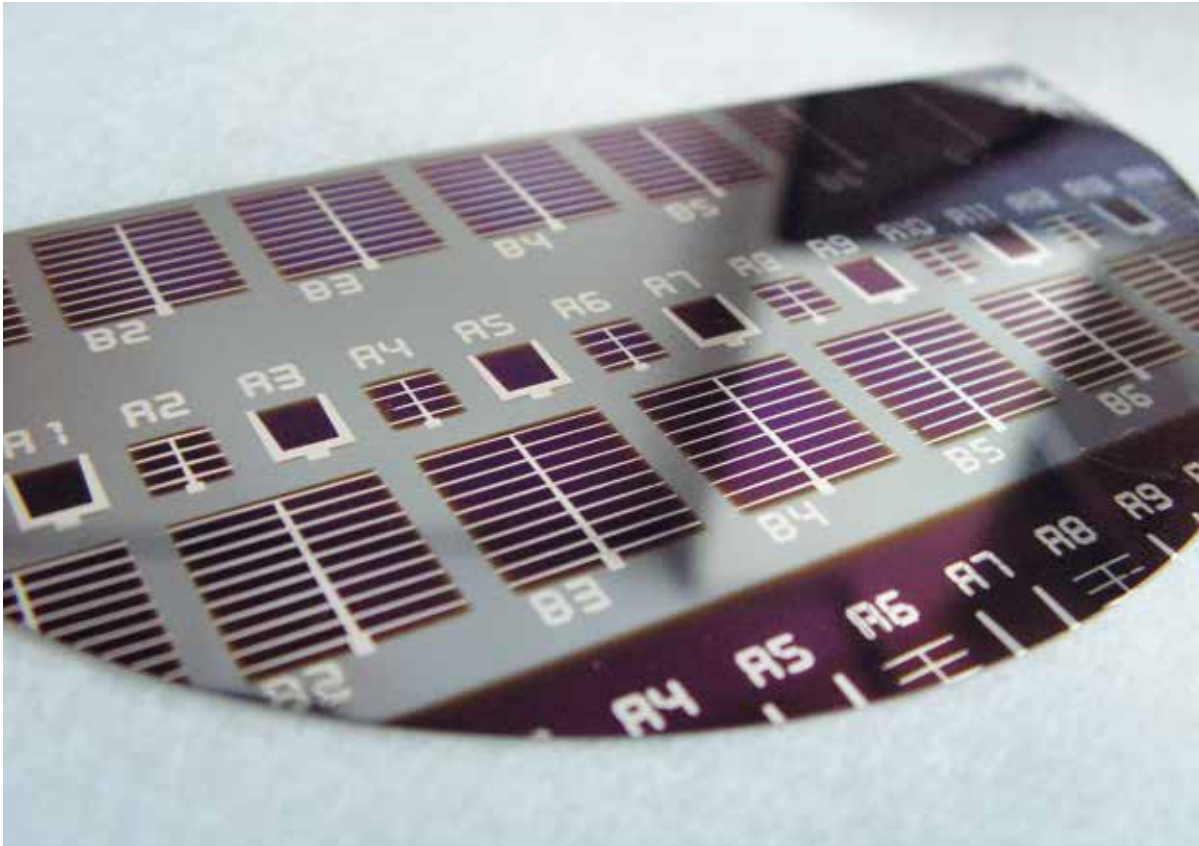
Zodra je een laagje amorf silicium op het kristallijne silicium legt, schakel je defecten uit, die zorgen voor extra ladingsverliezen. Ravi Vasudevan heeft tijdens zijn promotieonderzoek aan de Technische Universiteit Delft gekeken welke soort defecten wanneer dominant zijn, en hoe de verschillende defecten de kwaliteit en prestaties van de uiteindelijke cel beïnvloeden.

‘In een heterojunctie silicium zonnecel, haal je de positieve ladingen er aan de ene kant, en de elektronen aan de andere kant uit,’ zegt projectleider Arno Smets. ‘De heterojuncties in de zonnecellen zijn dus een soort selectieve membranen, waar aan de ene kant negatief geladen elektronen uit komen, die vervolgens weer recombineren met de aan andere kant gecollecteerde positief geladen ‘gaten’. Om die selectiviteit te krijgen, plakken we een laagje amorf silicium aan beide kanten van de plak bulk kristallijn silicium. Met behulp van een extra gedoteerd laagje amorf silicium op het dunne laagje ongedoteerd amorf silicium, maken we de ene kant selectief voor positieve ladingen, en de andere voor negatieve ladingen. Op die manier kun je met een relatief simpel systeem opvallend hoge open klemspanningen bereiken.’

De grensvlakken tussen de verschillende lagen in de cel zorgen voor de meeste verliezen, vertelt Smets. ‘Er is dus meer begrip nodig over wat je moet doen tijdens de productie van de cellen om de kwaliteit van de grenslagen te optimaliseren. In dit project hebben we gemeten welke defecten voor de meeste verliezen zorgen, en hoe deze defecten zich gedragen bij verschillende temperaturen, belichtingstijden en in verschillende soorten wafers.’

Model voor beste behandeling

Ravi Vasudevan heeft op basis van deze metingen een model gemaakt dat de temperatuursafhankelijkheid beschrijft van de kwaliteit van de passivatie. Dat is van belang om te begrijpen hoe je je cel het beste kunt behandelen om de passivatie te optimaliseren. Daarnaast heeft hij in kaart gebracht hoe de ladingstransporten en het aantal en type defecten veranderen als gevolg van langdurige



Silicium zonnecel met diverse kleine en grote testoppervlakken.

blootstelling aan licht. 'Ravi heeft onder andere aangetoond dat de mate en soort van de dotering bepalen welk type defecten dominant wordt voor het uiteindelijke ladingsverlies,' vertelt Smets. 'Dit is een belangrijk inzicht: we wisten al dat je het absolute aantal defecten kunt minimaliseren door de depositiecondities te veranderen. En nu weten we ook dat je door die lagen op een slimme manier te doteren, zelf grotendeels kunt bepalen welke van de defecten die je overhoudt, de meeste invloed zullen hebben op de eindprestaties van de cel.' In feite kun je zo zelf de potentieel gevaarlijkste fouten bij voorbaat al onschadelijk maken.

'We hebben veel inzicht gekregen in welke defecten een rol spelen, en onder welke procescondities deze ontstaan of juist onschadelijk gemaakt worden,' vat de projectleider samen. 'Daarnaast weten we door de belichtingsmetingen ook hoe het systeem zich op de langere termijn zal gaan gedragen.' Zo kun je een afgewogen besluit nemen

voor je ontwerp: wil je een cel maken die nu optimaal presteert, maar die onder invloed van zonlicht steeds minder efficiënt wordt, of wil je juist een cel die misschien vanaf het begin een procentpunt minder rendement heeft, maar die over vijf jaar nog precies hetzelfde zal presteren?

Zijspoor: water splitsen

Als zijspoor van het onderzoek heeft de promovendus ook gekeken naar het gebruik van heterojunctie systemen om water te splitsen en zo energie op te slaan, sluit Smets af. 'Wij waren de eersten die dit deden, en het blijkt verrassend goed te werken. Silicium is het enige fotovoltaïsche materiaal dat enigszins tegen water kan. Bovendien heb je behoorlijk grote spanningen nodig om water te splitsen in zuurstof en waterstof. Die spanningen kun je met een uit meerdere lagen bestaand siliciumstelsel relatief makkelijk bereiken. Dit deel van het onderzoek heeft een mooie demonstrator opgeleverd waarmee we nieuwe toepassingen van deze heterojunctietechniek kunnen laten zien.'

Ladingsvangers onklaar maken

René van Swaaij (TUD) / Dimitris Deligiannis (TUD)

project 12168

Hoe kun je een kristallijn silicium wafer zo goed mogelijk schoonmaken en passiveren om een zonnecel te krijgen met een zo hoog mogelijke efficiëntie? Dat was de centrale vraag in het promotieonderzoek van Dimitris Deligiannis aan de Technische Universiteit Delft. Co-promotor René van Swaaij vertelt over de belangrijkste opbrengsten van het onderzoek.

Om de efficiëntie van een zonnecel te verbeteren, is het belangrijk om het oppervlak van het kristallijn silicium te passiveren. Door het oppervlak te bewerken, voorkom je dat ladingsdragers verloren gaan en niet bijdragen aan de hoeveelheid opgewekte elektriciteit. 'In dit project heeft Dimitris gekeken hoe die passivering precies werkt, wat de belangrijke parameters zijn, en hoe deze elkaar beïnvloeden. Vervolgens heeft hij de kennis die we hierover hebben opgedaan, toegepast op daadwerkelijke zonnecellen,' vertelt Van Swaaij. Aan de bulk van het silicium valt niet veel te verbeteren, aangezien men tegenwoordig silicium kan produceren van zeer hoge kwaliteit, zegt de projectleider. 'Vooral op het oppervlak vindt ongewenste recombinatie van positieve en negatieve ladingen plaats, waardoor je de ladingen kwijt raakt en dus minder elektriciteit creëert.' Op de interfaces tussen het kristallijn silicium en het amorf silicium, of tussen het amorf silicium en de metaaloxidel laag, vinden de meeste gebeurtenissen plaats waardoor ladingsverliezen optreden. Als je die oppervlakterecombinatie onder de duim krijgt, kun je verliezen minimaliseren.

Van schoonmaak tot lagentaart

Voordat je echter kunt beginnen met het deponeren van de laag amorf silicium, moet je het oppervlak van het kristallijn silicium eerst schoonmaken. 'Dimitris heeft gekeken hoe je dat het beste kunt doen, hoe je het amorf silicium moet deponeren en hoe je vervolgens een zo goed mogelijke zonnecel maakt van dat lagenpakket,' vat Van Swaaij vier jaar onderzoek samen.

Het was al bekend dat de dikte van de amorf silicium laag bovenop het kristallijne silicium de kwaliteit van de passivering bepaalt, maar niemand wist nog waarom dat zo was. Op basis van de heersende



Het meten van de prestatie van silicium zonnecellen als gevolg van het belichten onder een standaard spectrum in een zonn simulator.

theorie zou de mate van passivatie alleen moeten afhangen van het grensvlak tussen beide materialen, niet van de dikte van een van beiden. 'Wij hebben daar experimenten aan gedaan en modellen van gemaakt. Hieruit bleek dat voor de mate van passivatie vooral de volgende grenslaag belangrijk is. Als de passivatie van het kristallijn silicium heel goed is, wordt het grensvlak tussen het amorf silicium en de lucht belangrijker. Hoe dunner deze laag, des belangrijker wordt die overgang naar lucht. Dat is een belangrijk inzicht voor de ontwikkeling van een zonnecel: er blijkt dus een optimale dikte te zijn van de amorf siliciumlaag.'

Lange levensduur

Een andere factor die van belang is voor de passivatie, is de temperatuur. 'Door een zonnecel gedurende een bepaalde tijd tot een bepaalde temperatuur te verwarmen, kun je de levensduur van de ladingsdragers verlengen. Dat betekent dat ze langer en dus verder kunnen reizen door de cel heen, en dat de kans groter wordt dat ze een van de elektrodes bereiken. Door een combinatie van goed schoonmaken en het gebruiken van lagen met de juiste dikte, hebben we hele lange levensduren weten te bereiken, tot wel 20 milliseconden,' zegt Van Swaaij niet zonder trots.

Een ander hoogtepunt binnen het project was de posterprijs die promovendus Deligiannis kreeg voor de door hem uitgevoerde capaciteitsmetingen aan zonnecellen na langdurige belichting, die iets vertellen over de hoeveelheid defecten per oppervlakte-eenheid. 'Hoe langer je een zonnecel belicht, des te slechter zal hij gaan presteren. Met behulp van de capaciteitsmetingen hebben we laten zien hoe defecten de achteruitgang van de cellen onder belichting bepalen.'

Simuleren van grenslaageffecten

Gilles de Wijs (RU), Rob de Groot (RU) / Ebrahim Hazrati (RU), Karol Jarolimek (RU)

project 12165

‘Om te begrijpen wat er nu precies gebeurt op de overgang tussen het amorf en het kristallijn silicium, hebben we microscopische simulaties gemaakt van de elektronische eigenschappen.’ Zo vat projectleider Gilles de Wijs van de Radboud Universiteit Nijmegen zijn project kernachtig samen.

‘De bedoeling van dit enige computerproject binnen het programma was om een brug te slaan tussen experimentele resultaten en de fundamentele kennis over de werking van de grenslagen,’ vertelt De Wijs, die pas in een later stadium bij het project betrokken raakte. ‘Postdocs Ebrahim Hazrati en Karol Jarolimek hebben berekend hoe de posities van de valentieband en de geleidingsband veranderen als je door een grensvlak tussen amorf en kristallijn silicium heen beweegt.’ Dit grensvlak vormt het hart van de heterostructuurzonnecel. De verandering is een maat voor de hoeveelheid energie die je nodig hebt om een elektron of een gat vrij te maken. ‘Daarvoor zijn ze uitgegaan van de basale theorie, zonder a priori al veel aannames in dat model te stoppen,’ vertelt hij.

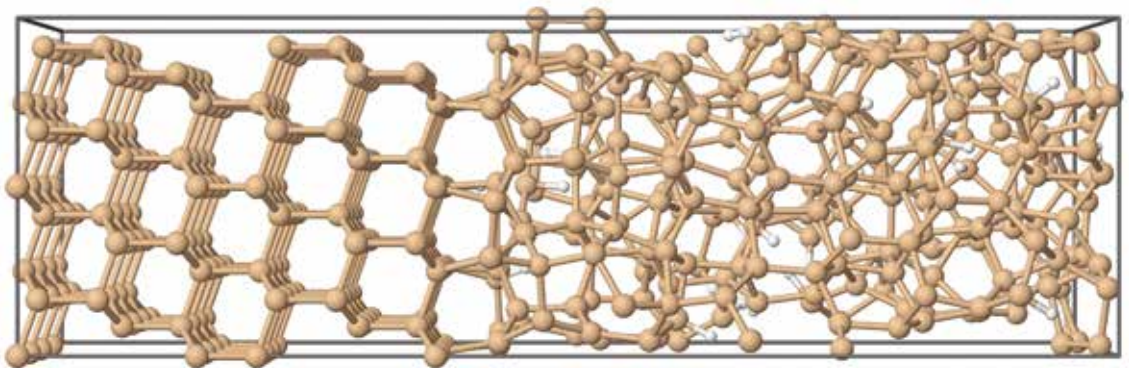
In de computer hebben de onderzoekers een structuur gebouwd die zo realistisch mogelijk is. Dat is altijd zoeken naar een compromis, vertelt De Wijs. ‘Waar de atomen in kristallijn silicium zitten is zeer nauwkeurig bekend, van de structuur van het amorf silicium is al veel minder bekend, en die van het grensvlak is echt een uitdaging. Hoe gedetailleerder een structuur, hoe langer en duurder de computerberekeningen worden. Maar je wilt je structuur wel zo realistisch mogelijk maken.

Vloeistof laten stollen

De Wijs legt uit hoe zo’n simulatie in zijn werk gaat: ‘Wat we doen is proberen te bepalen waar de atomen zullen gaan zitten door de natuur na te apen, aan de hand van een zogenaamde moleculair-dynamicasimulatie. Je geeft deeltjes een temperatuur mee en doet alsof de stof vloeibaar is. Die vloeistof laat je vervolgens virtueel afkoelen, totdat hij stolt en de atomen op een vaste plaats terechtkomen. Door de chemische wisselwerking tussen de deeltjes goed na te doen, kom je zo in principe tot een structuur die onder gegeven

procesomstandigheden het meest realistisch is. Daarnaast is het belangrijk voldoende langzaam af te koelen, wat erg lastig is omdat een computer het proces ongeveer een miljoen maal een miljoen keer langzamer simuleert als dat het in het echt duurt.'

In de simulaties bleken meer defecten te ontstaan dan in echte zonnecellen. 'Dat heeft te maken met de snelheid van de simulatie,' verklaart de Nijmeegse onderzoeker. Dit was dan ook een eerste stap, zegt hij. 'In de dertig structuren die we binnen dit project hebben gesimuleerd bevatten de band gaps en de posities van de valentie en geleidingsbanden nog maar weinig systematische fouten. Met onze methode verkrijgen we inmiddels zeer realistische waarden. De volgende stap zou zijn dat we aan de waterstofconcentratie gaan draaien om te kijken naar de invloed van het aanwezige waterstof op de formatie van de defecten en op de uiteindelijke waarde van de band gap.'



De figuur toont een van gesimuleerde structuren. De bruine bollen zijn de siliciumatomen. Links het pure silicium kristal, en rechts het amorfe silicium waarin zich ook waterstof bevindt (witte bolletjes). Daar tussen zit het grensvlak. Elektronen en gaten ondervinden een potentiaalstap als ze door het grensvlak heen bewegen. De grootte van deze stap volgt ook uit de berekeningen.

Colofon

Eindverslag Perspectiefprogramma
Fundamentals and Application of
Silicon Heterojunction solar cells (FLASH)

Uitgever

Nederlandse Organisatie voor
Wetenschappelijk Onderzoek
Domein Toegepaste en
Technische Wetenschappen
Postbus 3021
3502 GA Utrecht
T +31 (0)30 600 12 11
F +31 (0)30 601 44 08
E ttw@nwo.nl
www.ttw.nwo.nl

Juni 2017

Tekst en interviews

Sonja Knols, Ingenieuse

Coördinatie en productie

Prof.dr. R.E.I. Schropp, Universiteit Utrecht,
Technische Universiteit Eindhoven
Dr. Leo Korstanje, NWO-TTW
Kitty Puijk, NWO-TTW

Fotografie

Betrokken instellingen

Bart van Overbeeke Fotografie,
pagina 10, 12 (links- en rechtsboven),
14 en binnenkant omslag)

Foto omslag

Zonnepanelen testfaciliteit
bij de Universiteit Utrecht

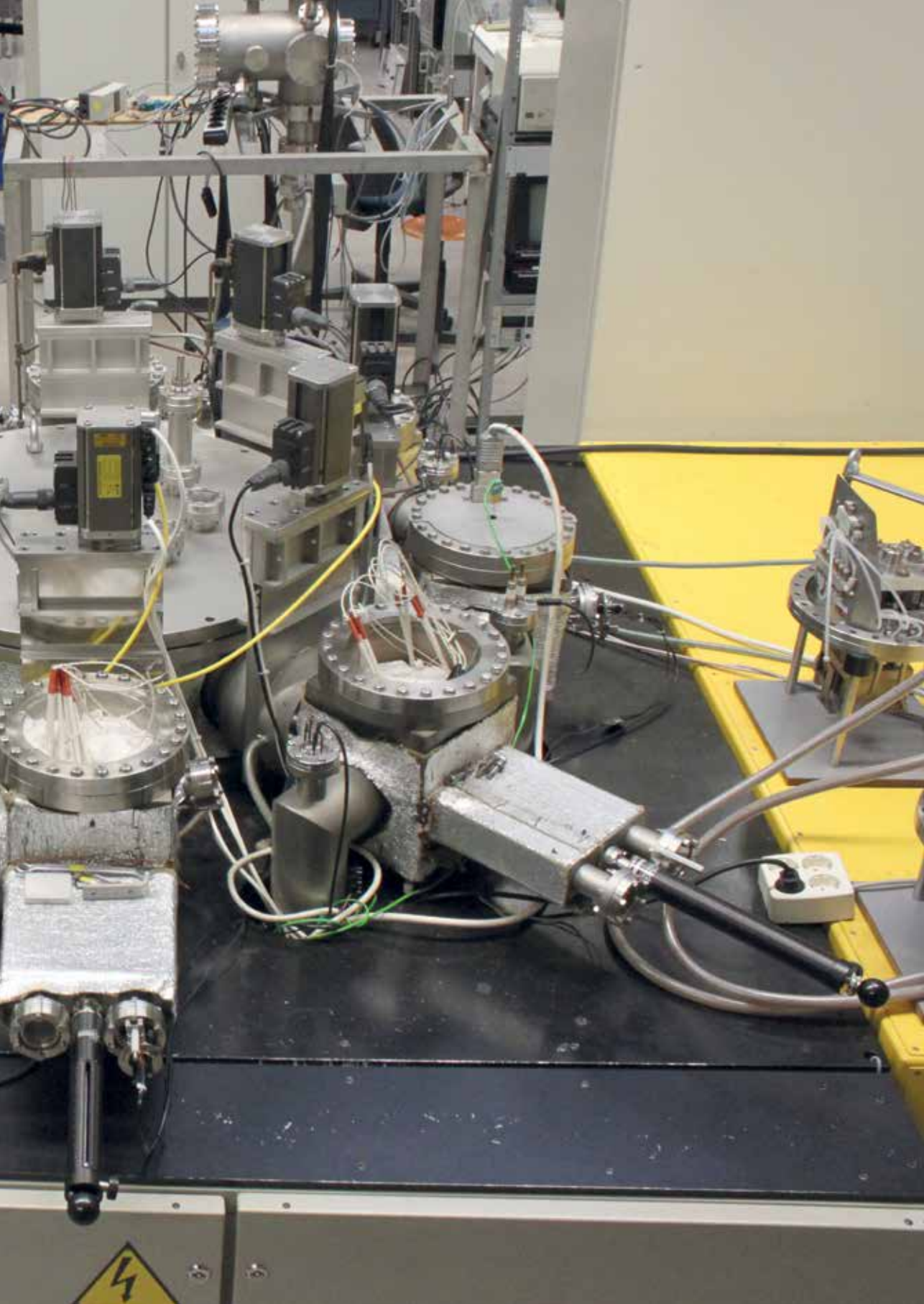
Ontwerp en realisatie

Argante Argante, Amsterdam

Drukwerk

Zwaan printmedia, Wormerveer





Uitgave

Nederlandse Organisatie
voor Wetenschappelijk Onderzoek

Bezoekadres

Van Vollenhovenlaan 661
3527 JP Utrecht

Postadres

Postbus 3021, 3502 GA Utrecht
Telefoon 030 6001 211
Fax 030 6014 408
ttw@nwo.nl
www.ttw.nwo.nl



Nederlandse Organisatie
voor Wetenschappelijk Onderzoek