

Nederlandse bedrijven actief in de toeleverketen voor de zonnecelproductie

Zonne-energie met galvanotechniek

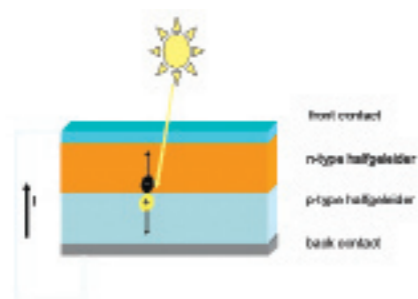
De totale energiebehoefte van de huidige wereldbevolking is 12-15 terawatt ofwel honderdduizend miljard kilowattuur per jaar. Er zijn maar vijf energiebronnen – olie, gas, kolen, nucleaire brandstof en de zon – die aan deze energiebehoefte kunnen voldoen. Van deze energiebronnen heeft zonne-energie in theorie de grootste potentie. De energie van de zon is voldoende om in één uur in de volledige energiebehoefte van de aarde te voorzien. Door het verwachte tekort aan energie uit fossiele brandstoffen en de zorg over de opwarming van de aarde door CO₂ uit fossiele brandstoffen is de markt voor zonne-energie de laatste jaren zeer snel gegroeid [1].

Wereldwijd hebben meerdere grote bedrijven uit de halfgeleider- en elektronica-industrie zonne-energie activiteiten gestart en zijn er verschillende nieuwe innovatieve *start-ups* ontstaan. In deze industrie wordt veel geld geïnvesteerd in onderzoek en ontwikkeling van nieuwe zonnecelconcepten en productieprocessen. Nieuwe galvanische processen vormen een deel van deze ontwikkelingen, dat volgens verschillende voorspellingen in de toekomst alleen maar zal toenemen.

ENERGIE UIT ZONLICHT

De energie van de zon wordt op twee manieren gebruikt om energie op te wekken. Ten eerste wordt met zonnewarmte water verhit dat gekoppeld is aan een warmwatervoorziening van een gebouw. In de vorm van *concentrated solar power* (CSP) centrales wordt met zonnewarmte ook elektriciteit opgewekt. Zonlicht wordt door middel van een veld met een groot aantal spiegels geconcentreerd op één punt. In de punt wordt vloeistof opgewarmd, waaruit met stroom-

turbines stroom wordt gemaakt. Ten tweede wordt met het fotovoltaïsche (PV) effect de energie van de zon direct in stroom omgezet. Halfgeleider-materialen met een band/gat-energie in het energiespectrum van zonlicht (1-2 eV) kunnen dit zonlicht absorberen (zie figuur 1). Door n- en p-type halfgeleiders te koppelen, kan het geabsorbeerde zonlicht in stroom worden omgezet. De navolgende



Figuur 1: Principe van het fotovoltaïsche effect, waarbij door absorptie van zonlicht via een gat/elektron-paar stroom wordt gegenereerd.

discussie beperkt zich tot de productie van deze fotovoltaïsche cellen.

BLOEIENDE ZONNECELPRODUCTIE-INDUSTRIE DANKZIJ FEED-IN TARIEF

De grootschalige toepassing van zonnecellen wordt belemmerd door de te lange economische terugverdientijd. De energie die de productie van zonnecellen vergt wordt echter al één tot vier jaar terugverdiend [2]. Een huidige commercieel beschikbare zonnecelmodule genereert ± 120 kWh per vierkante meter per jaar tegen aanschafkosten van ± 600 euro per vierkante meter. Met een kleinverbruikerelektriciteitsprijs van ± 0,02 eurocent/kWh is de economische terugverdientijd 20 tot 25 jaar. Zonne-energie uit PV wordt daarom vooral op enige schaal toegepast in landen als Spanje en Duitsland, waar een zogenaamd *feed-in-tarief* (FIT) bestaat. Hierbij wordt door de overheid een vergoeding betaald voor de opgewekte elektriciteit die teruggeleverd wordt aan het elektriciteitsnet. Verder is in Italië en Japan door de relatief hoge energieprijzen

I. ELEKTROCHEMISCHE FRONTCONTACTMETALLISATIE VOOR SILICIUM ZONNECELLEN

De productie van kristallijn silicium zonnecellen begint met de productie van een silicium grondstof en het gieten en zagen van wafers. De wafers worden eerst met alkalische ets gereinigd en getextureerd. Vervolgens wordt de n-type halfgeleider gemaakt door thermische diffusie van fosfor. Na reinigen en plasma-etsen van de waferrand wordt met *plasma-enhanced chemical vapour deposition* (PE-CVD) een siliciumnitride antireflectie laag aangebracht. Ten slotte wordt aan beide zijden van de wafer een metaalcontact aangebracht door zeefdrukken. Het frontcontact, de kant waar het zonlicht invalt, bestaat uit een aantal parallelle zilversporen met loodrecht daarop twee zilveren busbars voor de afvoer van de gegenereerde stroom. De zilversporen worden gevormd door een hoge-temperatuurreactie van de zeefdruk-pasta, die bestaat uit een mengsel van zilver- en glasdeeltjes. De glasdeeltjes zorgen, door reactie met de antireflectie laag en het silicium, voor een goed hechtend spoor met een laagohmig contact. De zilverdeeltjes sinteren tot een elektrische geleidend spoor. De frontcontacten moeten een hoge elektrische geleidbaarheid hebben om weerstandsverliezen te minimaliseren. Daarnaast moeten de frontcontacten een zo klein mogelijk deel van het zonneceloppervlak bedekken voor een zo groot mogelijk fotovoltaïsch actief oppervlak. Nadeel van de gezeefdruchte zilversporen is echter de relatief hoge elektrische weerstand van 2 tot 3 keer die van bulkzilver. Voor minimale weerstand moeten de huidige frontcontacten minstens 120 µm breed zijn, waarmee ze circa 5% van het zonneceloppervlak bedekken. Er zijn echter methoden ontwikkeld, waarin de oppervlaktebedekking door frontcontacten is verkleind door elektrodepositie van een 20 µm zilverlaag op een 80 µm breed gezeefdruchte zilverspoor. Hierbij worden de voordelen van het zeefdrukken, de goede hechting en het laagohmige

contact, gecombineerd met de hoge geleidbaarheid (1,2-1,5 maal bulkzilver) van elektrochemisch neergeslagen zilver. Door de resulterende verlaging van de spoorbreedte van 120 naar 100 µm is in industriële productie een absolute efficiëntieverhoging van 0,4% bereikt. *Cost-of-ownership*-calculaties laten zien dat deze rendementwinst ruimschoots opweegt tegen de verhoging van de productiekosten door toevoeging van het elektro-depositieproces. Additioneel kan de elektro-depositie van een nikkel/koper/tin laagstelsel in plaats van zilver ook de materiaalkosten nog verlagen.

Door lichtgeïnduceerde (LiP) of lichtgeassisteerde elektro-depositie wordt bij elektrochemische frontcontactmetallisatie gebruik gemaakt van het fotovoltaïsch vermogen van de zonnecel. Door tijdens het proces de zonnecel te belichten, kan de gegenereerde fotovoltaïsche stroom worden benut voor de elektrochemische metaaldepositie. Industriële productielijnen voor frontcontactmetallisatie, waaronder installatie voor lichtgeïnduceerde depositie, zijn commercieel beschikbaar en in gebruik bij zonnecelfabrikanten. De voor de hand liggende doorontwikkeling naar geheel elektrochemische frontcontactmetallisatie is gaande. De grootste moeilijkheid hierbij is om het laagohmige elektrische contact met silicium van de gezeefdruchte zilverlijnen te verkrijgen. Selectieve etsprocessen of laser-ablatie zijn nodig om de isolerende siliciumnitride antireflectie laag te doorbreken, en thermische diffusieprocessen voor de vorming van intermetallische grenslagen tussen silicium en het metaal van het frontcontactspoor. Verdere ontwikkelingen zijn nodig om deze methoden industrieel toepasbaar te maken.

en sterke zonne-instraling zonne-energie al economisch rendabel. Naar verwachting zal in Nederland energie uit zonnecellen rond 2020 ook voor kleinverbruikers economisch rendabel zijn. Zeker als de kosten voor elektriciteit opgewekt uit fossiele brandstoffen zullen toenemen. In Duitsland heeft het Feed-In Tarief ook geleid tot een bloeiende zonnecelproductie-industrie, die naar schatting 3.000 banen in de high-techproductiesector heeft gecreëerd [3]. Nederland is op het gebied van zonne-energie een bescheiden speler, mede door een beperkt en inconsistent stimuleringsbeleid. Op onderzoeksgebied wordt er zowel op universiteiten als in onderzoeksinstituten wel op hoog niveau aan onderzoek en ontwikkeling gedaan op zonnecelgebied. Naast een bescheiden zonnecelproductie-industrie is er in Nederland een behoorlijk aantal bedrijven actief in de toeleverketen voor de zonnecelproductie, waarvan de totale jaarlijkse omzet op enkele honderden miljoenen euro's wordt geschat. Dit is bijvoorbeeld te zien in het initiatief van de Brabantse Ontwikkeling Maatschap-

pij, waarin onderzoeksinstituten en de industrie uit voornamelijk Zuidoost-Nederland de krachten bundelen om de impact van de Nederlandse maakindustrie in de internationale zonnecelmarkt te vergroten.

ONDER EEN DOLLAR PER WATTPIEK

Alle nieuwe ontwikkelingen in de zonnecel-industrie richten zich er op om energie uit zonnecellen economische rendabeler te maken. Het belangrijkste criterium hierbij zijn



Dr. Arjan Hovestad presenteerde zijn bevindingen op de Dag van de Oppervlaktetechnologie 2009. De Vereniging voor Oppervlaktetechnieken van Materialen VOM organiseert de volgende editie op 2 december te Zeist (www.VOM.nl)

II. ABSORBERELEKTRO-DEPOSITIE VOOR CIGS DUNNEFILM ZONNECELLEN

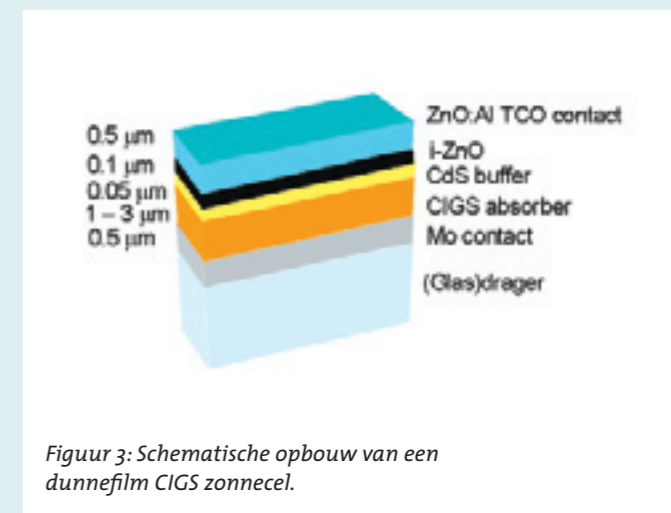
Dunnefilm zonnecellen vormen nog een maar een klein deel van de zonnecelmarkt. Van de drie typen dunnefilm zonnecellen zijn a-Si (amorf silicium (a-Si)) en CdTe (cadmiumtelluride) commercieel verkrijgbaar en komen de eerste CIGS-zonnecellen nu op de markt. Dunnefilm zonnecellen bestaan uit een stapeling van dunne lagen in de orde van enkele honderden nanometers tot enkele micrometers dik. In zowel a-Si en CdTe worden industrieel geen galvanische processen ingezet en zijn er ook weinig ontwikkelingen in deze richting. Dit in tegenstelling tot de CIGS-cellen. In Figuur 3 wordt de opbouw van een CIGS-zonnecel gegeven. De CIGS-zonnecel wordt in een opeenvolging van vooral PVD-depositieprocessen opgebouwd op het substraat. Eerst wordt hierop het molybdeen achtercontact gesputterd gevolgd door éénstaps- of tweestaps-depositie van de CIGS-absorberlaag. Daarop wordt door natchemische *chemical bath deposition* (CBD) de cadmiumsulfide bufferlaag aangebracht. Vervolgens wordt met RF-sputteren een tweelaags zinkoxide frontcontact aangebracht. De hoogste efficiëntie kan worden bereikt als de CIGS-absorberlaag in één stap door co-evaporatie van de verschillende metalen wordt aangebracht.

In de industriële productie wordt door huidige beperkingen in de opschaling van co-evaporatie vaak de voorkeur gegeven aan een tweestapsproces. Hierin worden eerst de afzonderlijke componenten neergeslagen, waarna door snelle verhitting, *rapid thermal processing* (RTP), deze componenten reageren tot het

gewenste CIGS-halfgeleidermateriaal. In één uitvoeringsvorm worden alle componenten – koper, indium, gallium en seleen of zwavel – in de eerste stap aangebracht. In een tweede uitvoeringsvorm wordt het seleen of zwavel pas in de tweede stap als reactieve component tijdens de RTP toegevoerd. In deze laatste methode wordt door een aantal CIGS-zonnecelproducenten elektro-depositie toegepast om koper, indium en gallium neer te slaan. Al deze drie metalen zijn door bekende elektro-depositieprocessen aan te brengen, waarbij de afzonderlijke laagdiktes worden gebruikt om de samenstelling van de uiteindelijke CIGS-absorberlaag te controleren. Verschillende installaties voor elektro-depositie, waaronder enkele roll-to-roll lijnen voor metaalfoliesubstraten, zijn in de industrie beschikbaar. De mogelijke toekomstige schaarste van indium en gallium heeft ontwikkelingen in gang gezet om, als alternatief voor CIGS, koper/tin/zink/selenide of sulfide (CZTS) gebaseerde zonnecellen te ontwikkelen. Door de vele bestaande processen om koper, tin en zink en hun legeringen elektrochemisch neer te slaan, worden hierbij ook elektro-depositieprocessen onderzocht. Een bijzonder legeringselektro-depositieproces is de directe elektrochemische depositie van CIGS. De fotoabsorbers CIGS en cadmiumtelluride, de bufferlagen, cadmiumsulfide, zinksulfide en indiumselenide, of frontcontact oxides, zoals zinkoxide, kunnen door elektro-depositie worden aangebracht. Deze verbindingen zijn halfgeleiders waarvan het elektro-depositiemechanisme afwijkt van de traditionele elektro-depositie van metalen of metaallegeringen.

Afhankelijk van de vrije vormingsenthalpie van de verbinding verschuift de elektro-depositiepotentiaal ten opzichte van de evenwichtspotentiaal van de minst edele component enkele honderden millivolt in positieve richting. Cadmiumtelluride kan bijvoorbeeld bij potentialen negatiever dan +0,1 V ten opzichte van SHE worden neergeslagen, terwijl cadmium alleen bij potentialen negatiever dan -0,5 V ten opzichte van SHE kan worden neergeslagen. Een voordelig effect van dit mechanisme is dat de elektro-depositie zelfregulerend is in een potentiaalgebied, waarin de halfgeleider stoichiometrisch wordt neergeslagen (de stoichiometrie drukt de verhouding uit waarin chemische verbindingen met elkaar reageren en de verhouding tussen uitgangsstoffen en reactanten –red.). Voor cadmiumtelluride zijn met elektro-depositie CdTe-zonnecellen van goede kwaliteit gemaakt, maar industrieel wordt nu de voorkeur gegeven aan sputterdepositie. Het voordelige effect van een positieve potentiaalverschuiving is voor CIGS-elektro-depositie ook aanwezig. En complicatie in vergelijking met cadmiumtelluride is echter dat CIGS een quaternaire verbinding is met een zeer complex elektro-depositiemechanisme heeft.

Het potentiaalgebied voor zelfregulerende stoichiometrische depositie is beperkt en er kan naast CIGS onder meer koperseleenide en indiumselenide worden gevormd. Om stoichiometrisch CIGS te vormen, worden daarom elektro-depositieoplossingen gebruikt met lage concentraties van de verschillende metaalzouten. Gevolg



Figuur 3: Schematische opbouw van een dunnefilm CIGS zonnecel.

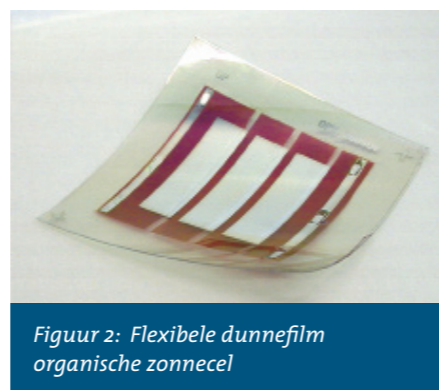
is dat er nanokristallijne lagen worden gevormd met een te hoge defectstructuur om als effectieve fotoabsorber te kunnen functioneren. Daarom moeten elektrochemisch neergeslagen CIGS-lagen via een extra RTP-proces tot stoichiometrisch grofkristallijn CIGS worden gereageerd. In Frankrijk is door IRDEP met een dergelijk tweestaps-elektro-depositieproces van CIGS op laboratoriumschaal een rendement van 13,8% bereikt. Dit proces wordt sinds 2009 door een start-up-bedrijf in Frankrijk tot industriële productie doorontwikkeld.

de kosten per Wattpiek (Wp) van een zonnecel. De Wp is het maximale vermogen dat een zonnecelmodule kan leveren. In Nederland is één Wp ongeveer gelijk aan een energieopbrengst van gemiddeld 0,85-0,88 kWh per jaar. Het piekvermogen van een zonnecel wordt bepaald door de efficiëntie, dat wil zeggen het percentage van het vermogen van het opvallende zonlicht dat omgezet wordt in elektrisch vermogen. Het is dus vanzelfsprekend dat de zonnecelindustrie probeert om de efficiency en daarmee de energieopbrengst per vierkante meter van de zonnecellen te vergroten en tegelijkertijd de productiekosten per vierkante meter te verlagen. Het streven hierbij is een prijs van minder dan 1 dollar per Wp.

DUNNEFILM ZONNECELLEN

De huidige zonnecelmarkt wordt, met een marktaandeel groter dan 90%, gedomineerd door kristallijn-silicium zonnecellen. Deze eerste generatie zonnecellen bestaat uit monokristallijne of poly/multikristallijne silicium wafers met typisch een efficiëntie van 15-16% voor commercieel verkrijgbare modules. Door optimalisatie van de productieprocessen wordt voor deze cellen gepro-

beerd de efficiëntie te verhogen en de productiekosten te reduceren. Daarnaast wordt een verlaging van de materiaalkosten nagestreefd door de dikte van de siliciumwafers te reduceren. Materiaalkostenreductie is ook een belangrijke drijfveer voor de ontwikkeling van de tweede generatie zonnecellen, de dunnefilm fotovoltaïsche cellen (TFPV). De zonnecellen bestaan uit een slechts 1-10 µm dikke multilaagstructuur met amorf silicium (a-Si), cadmiumtelluride (CdTe) of koper-indium/gallium-selenide/sulfide (CIGS) als fotovoltaïsch actief materiaal. Een geringer materiaalverbruik in combinatie met een theoretisch hogere energieopbrengst moet dunnefilm-zonnecellen een kostenvoordeel geven ten opzichte van de kristallijn silicium technologie. Productiekosten kunnen laag zijn doordat de zonnecellen in grote oppervlakken tegelijk worden geproduceerd en zelfs op flexibele ondergronden in roll-to-roll productie. Dunnefilm zonnecellen zijn de laatste jaren op de markt gekomen en meerdere bedrijven staan op het punt om productielijnen op te starten. Het rendement van de commercieel verkrijgbare dunnefilm modules is nog beperkt tot 6-12%. Op de langere termijn, vijf tot tien jaar, biedt organische



Figuur 2: Flexibele dunnefilm organische zonnecel

PV (OPV), de derde generatie zonnecellen, perspectief op nog goedkopere materialen en productie. De rendementen van OPV-cellen zijn echter nog beperkt tot maximaal 10% voor hoge kwaliteit laboratoriumcellen. In de Grätzel-cel wordt foto-elektrochemisch stroom gegenereerd door combinatie van nanoporeus titaandioxide gesensibiliseerd door organische kleurstoffen. In volledig organische cellen worden organische halfgeleiders gebruikt als fotoabsorbers. De OPV-cellen zijn nog niet commercieel beschikbaar, maar enkele bedrijven zijn bezig om industriële productie op te bouwen.

ELEKTRO-DEPOSITIE VOOR KOSTENEFFICIËNTIE EN HOGE PRECISIE

De productiemethoden van zonnecellen komen voort uit de halfgeleiderindustrie. Er worden vooral gasfasedepositie en thermische diffusieprocessen gebruikt om de verschillende lagen in een zonnecel te maken. Natchemische processen zijn grotendeels beperkt tot enkele reinigingsstappen. De noodzaak echter tot productiekostenverlaging heeft geleid tot de toepassing en ontwikkeling van natchemische en specifieke elektro-depositieprocessen voor zonnecelproductie. Elektro-depositie biedt de mogelijkheid om metalen van hoge zuiverheid aan te brengen met een in principe moleculaire resolutie. Elektro-depositie heeft zich ook bewezen als kostenefficiënte technologie voor grootschalige productie, waaronder roll-to-roll-depositie op flexibele folies (Figuur 2). In tal van voorspellingen wordt elektrodepositie daarom samen met printtechnieken genoemd als toekomstige productietechnologie voor lagekosten (flexibele) zonnecellen. Enkele ontwikkelingen van elektro-depositieprocessen voor kristallijn silicium en voor dunnefilm CIGS-zonnecellen worden in de kaderteksten beschreven.

CONCLUSIE

De markt voor zonne-energie is de laatste jaren sterk gegroeid. De zon is een gigantische bron van hernieuwbare energie als alternatief voor energie uit fossiele brandstoffen. Grootschalige elektriciteitsopwekking met zonnecellen wordt echter nog beperkt door de te hoge kostprijs van zonne-energie. Industriële ontwikkelingen in de zonnecelproductie richten zich daarom op reductie van de productiekosten en verhoging van de zonneefficiëntie. Galvanische processen kunnen hierbij een belangrijke rol spelen, omdat ze een bestaande basis van industrieel toegepaste elektro-depositieprocessen combineren met een potentie voor kosteneffectieve productie van vooral dunnefilm-zonnecellen. De komende jaren moeten uitwijzen of de verdere ontwikkeling van galvanische processen voor zonnecelproductie deze potentie industrieel kunnen waarmaken.

Dr. A. Hovestad, TNO

MEER INFORMATIE

Over zonnecelproductie hield de auteur een voordracht op de Dag van de Oppervlakte-technologie van 2010. De volgende Dag van de Oppervlakte-technologie zal worden gehouden op 2 december.

- www.vom.nl
- www.tno.nl/solar
- www.cleantechholland.nl
- www.nederlandkrijgtnieuweenergie.nl
- www.epia.org

- [1] Global Market Outlook for Photovoltaics until 2014 (www.epia.org)
- [2] Zonne-energie, roadmap 2009, N.V. Brabantse Ontwikkelings Maatschappij (www.tno.nl/solar)
- [3] Statistical data on the German photovoltaic industry, June 2010, BSW-Solar (www.solarwirtschaft.de)

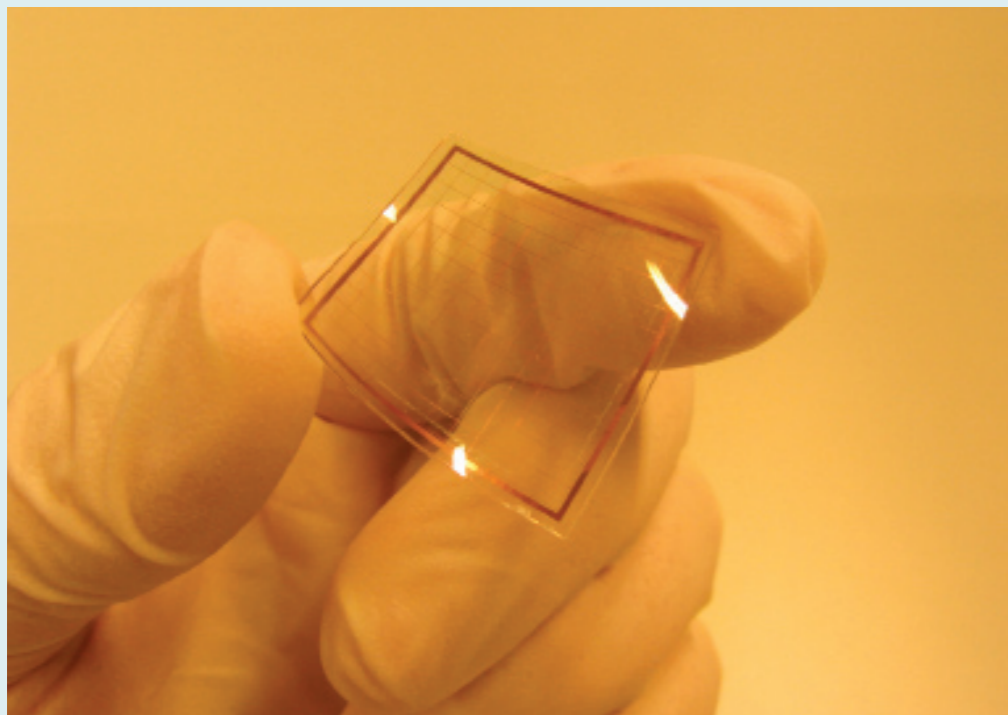
III. ELEKTRO-DEPOSITIE VAN TRANSPARANT GELEIDEND FRONTCONTACTEN

De tweede en derde generatie zonnecellen hebben allemaal een transparant geleidend oxide (TCO) als frontcontact voor de afvoer van de gegenereerde stroom. TCO's zijn halfgeleiders met een groot 'bandgat' (De hoogte hiervan bepaalt hoeveel energie er toegevoegd moet worden voordat een elektron de 'geleidingsband' in mag: de laagst-energetische band die vrij is van elektronen (de elektronen in de geleidingsband zijn verantwoordelijk voor de elektrische geleiding in een materiaal). De hoogst-energetische band waarin zich elektronen bevinden wordt de zogenaamde *valentieband* genoemd.

Doordat niet alle energieniveaus zijn toegestaan voor de elektronen, bevindt zich in geval van isolatoren en halfgeleiders tussen de valentieband en de geleidingsband een sprong in het energieniveau: de 'band gap' –red.). Door de hoge band gap waardoor de elektrische geleiding (tot $10^{-5} \Omega \text{ m}$) combineren met transmissie (>85%) van zichtbaar en infrarood licht. In industriële productie worden TCO-lagen, zoals indiumtinoxide (OPV), fluorgedoopt tinoxide (a-Si, CdTe) en aluminiumgedoopt zinkoxide (CIGS, a-Si) aangebracht met PVD- (RF-magnetron sputteren) of CVD- processen. Zinkoxide kan ook elektrochemisch worden neergeslagen uit een simpele pH-neutrale oplossing van een zinkzout. Kathodische reductie van bijvoorbeeld zuurstof of nitraat zorgt voor een pH-verhoging aan het substraatoppervlak, waardoor de opgeloste zinkionen neerslaan als zinkoxide. Door variatie in de depositiecondities kan de snelheidsbepalende stap in de elektro-depositie worden beïnvloed. Hierdoor kan de laagstructuur worden gevarieerd van een open structuur van nanostaafjes tot een gesloten multikristallijne laag. De poreuze nanostaafjesstructuur is potentieel toepasbaar in Grätzelcellen. De gesloten multikristallijne zinkoxidelagen zijn onderzocht als frontcontact voor een CIGS-zonnecel. De optische transmissie van 90% is vergelijkbaar met RF-gesputerd zinkoxide. Een probleem is echter de co-depositie van dopingionen, die nodig zijn om zinkoxide elektrisch geleidend te maken. Directe doping met aluminium, zoals in PVD-depositie, is nog niet mogelijk gebleken met elektro-

depositie. Alleen in een tweestapsproces, waarin een elektrochemische zinkoxidelaag neergeslagen uit een zinkchloride-oplossing door een thermische nabehandeling wordt gereageerd tot chloridegedoopt zinkoxide, zijn op laboratoriumschaal functionele TCO-frontcontacten op CIGS-cellen gemaakt. De noodzakelijke warmtebehandeling in combinatie met de geringere elektrische geleiding maken elektrochemische zinkoxidelagen vooralsnog geen industrieel bruikbaar alternatief voor PVD-zinkoxidelagen.

In vergelijking met metalen is de geleidbaarheid van de hoogste kwaliteit TCO's een factor 100-200 hoger, waardoor er in dunnefilm-zonnecellen 5-10% vermogensverlies in de TCO-frontcontacten plaatsvindt. Voor flexibele zonnecellen op kunstofdragers is de depositie van hoge kwaliteit TCO's bovendien moeilijk en kostbaar door de temperatuurbeporingen, die kunststoffen opleggen aan de depositieprocessen. De geleidbaarheid van TCO's kan echter niet worden verhoogd zonder een verlies in optische transmissie. Daarom worden frontcontacten bestaande uit een combinatie van TCO's met een metaalrooster ontwikkeld. Voordeel van het gebruik van een metaalrooster is dat de eisen aan de TCO-eigenschappen kunnen worden versoepeld. Dit maakt goedkopere en dunnere TCO's mogelijk met een hoge transparantie. Evenals de metalen frontcontacten op kristallijn silicium zonnecellen moeten de metaalroosters een minimale oppervlaktebedekking en lage weerstandsverliezen combineren. Elektrochemisch neergeslagen metaalroosters (Figuur 4) verhogen de geleidbaarheid van een TCO-frontcontact met een factor 10 tot 50, terwijl de transmissie met minder dan 5% wordt verlaagd. Hiermee is potentieel een absolute efficiëntiewinst van 1-2% voor dunnefilm-zonnecellen mogelijk, die opweegt tegen de productiekostenstijging door een additioneel elektro-depositieproces. Verdere ontwikkeling van gepatroneerde elektro-depositie van metaalroosters voor TCO's zal moeten uitwijzen of deze potentie tot een kostentechnisch rendabel industrieel proces leidt.



Figuur 4: Flexibele TCO frontcontact met metaalrooster