

Zonnige vooruitzichten op hogere rendementen

Van zonnecel naar zonnepaneel

Het opwekken van elektriciteit uit licht met behulp van zonnecellen is tegenwoordig meer dan alleen een aardigheidje voor zakrekenmachines en horloges. In scenario's voor onze toekomstige energievoorziening komt sinds kort fotovoltaïsche zonne-energie voor, ofwel het gebruik van zonnecellen.

Rendementsrecords voor diverse soorten zonnecellen worden met de regelmaat van de klok gebroken. Meestal gaat het om op kleine schaal in een laboratorium vervaardigde cellen. Eén zonnecel is echter geen zonnepaneel, laat staan een compleet fotovoltaïsch systeem en cellen worden niet in laboratoria gemaakt, maar in fabrieken. Onduidelijkheid troef, vooral waar het gaat om daadwerkelijke toepassing van zonnecellen nu en in de toekomst. Dit artikel is bedoeld om eens wat licht in deze duisternis te brengen.

Dr. W. C. Sinke

De heer Wim Sinke is als projectleider Zonnecellen verbonden aan het FOM-Instituut voor Atoom- en Molecuulfysica in Amsterdam en als part-time senior wetenschappelijk medewerker aan het ECN, Energieonderzoek Centrum Nederland Petten, in de business-unit Duurzame Energie.



Het absolute rendementsrecord voor een zonnecel ligt momenteel op 37 procent: van de energie in het zonlicht wordt 37 procent omgezet in elektrische energie. Hier tegen steekt de vijf tot veertien procent rendement voor commerciële zonnepanelen tamelijk schril af en de vraag, die men zich onmiddellijk stelt, is of die commerciële panelen niet veel beter kunnen.

Tandemcel

De cel met een rendement van 37 procent is gemaakt door het Amerikaanse bedrijf Boeing, bekend van

5. Polykristallijn silicium zonnepanelen op het dak van caravans. (foto: R&S Renewable Energy Systems)

zijn vliegtuigen. Het gaat hierbij om een zogenaamde tandemzonnecel, dat wil zeggen een stapeling van - in dit geval twee - verschillende soorten cellen (Figuur 1). Daarmee wijkt hij af van de cellen in de meeste commerciële panelen. De bovenste cel is van gallium-arsen (GaAs), een halfgeleidend materiaal dat onder meer wordt toegepast in lasers voor cd-spelers. Dit materiaal is optimaal gevoelig

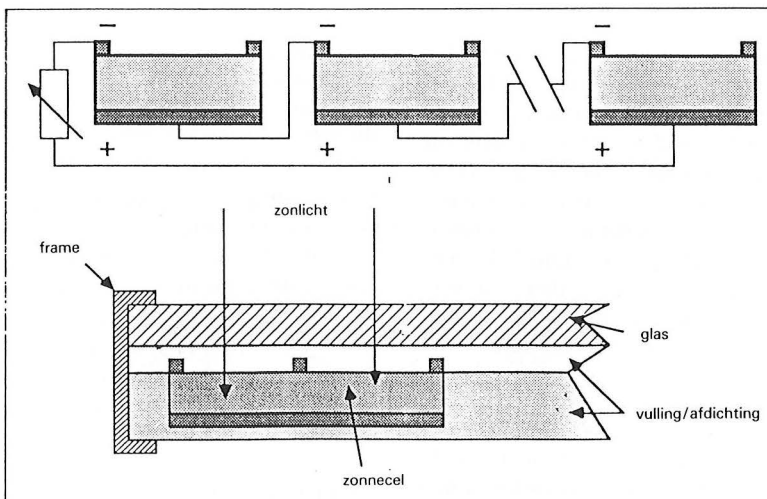
voor zichtbaar en ultraviolet licht en vrijwel transparant voor infrarood licht. Om het doorgelaten licht toch te benutten is een tweede cel aangebracht. Deze cel is van gallium-antimoon (GaSb), een aan GaAs verwant materiaal met een optimale gevoeligheid voor juist infrarood licht. De opbrengst van de tandemcel is de som van de opbrengsten van de individuele cellen. Van de 37 procent komt ongeveer 29 procent voor rekening van de GaAs-cel en acht procent van de GaSb-cel. Het bijzondere van de combinatie GaAs/GaSb is dat deze twee materialen zeer verschillend zijn (de halfgeleider bandafstanden zijn 1,4 en 0,7 elektronvolt), waardoor een grote winst ten opzichte van een enkelvoudige cel wordt geboekt.

Nadeel van dit soort halfgeleiders is dat ze duur zijn en in het algemeen moeilijk te bewerken. Bovendien is vooral GaAs zeer giftig. Bij een laboratoriumexperiment, als dat van Boeing, met een beperkt aantal cellen is dit alles niet van groot belang. Bij massaproductie en grootschalige toepassing kan dat wel het geval zijn. Boeing claimt dat de technologie die zij gebruikt in principe eenvoudig is en geschikt voor massaproductie van deze cellen. Het is overigens aardig om te vermelden dat het meten van een absoluut celrendement buitengewoon moeilijk is, vooral voor infrarood-gevoelige cellen als de GaSb-cel. NASA is van plan een ijkingsvoeren van zulke cellen, door ze in een vliegtuig mee te nemen naar zeer grote hoogten, waar de instraling niet wordt gestoord door atmosferische factoren.

Concentrator-cel

De Boeing-cel is een tandemcel, ontworpen voor gebruik onder geconcentreerd zonlicht. Dit is een tweede belangrijk verschil met cellen in commerciële panelen. Door zonlicht in geconcentreerde vorm op een cel te laten vallen is minder celoppervlak nodig. Dat kan een groot voordeel zijn in geval van cellen die worden gemaakt van zeer dure materialen of met behulp van kostbare processen. Bovendien leveren goed ontworpen concentrator-cellen altijd een hoger rendement dan hun collega's die voor gebruik onder natuurlijk zonlicht zijn bedoeld. Dit komt niet omdat de opgewekte stroom nu eenmaal groter is als er meer licht op de cel valt: bij de berekening van het rendement wordt immers bepaald wat er 'per zon' (1000 Watt/m² aan zonlicht) aan elektrisch vermogen uit de cel komt. Het hogere rendement is een gevolg van het feit dat de verhouding tussen gegenereerde stroom en verliesstromen gunstiger wordt naarmate de gegenereerde stroom toeneemt (zie artikel 'Silicium zonnecel breekt door' in het meinumnummer van PT/elektronica-elektrotechniek). Via een systeem van spiegels of

1. Boven: schematische doorsnede van een GaAs/GaSb-tandemzonnecel. In deze tandem zijn de cellen elektrisch van elkaar gescheiden door een transparante laag. Onder: indien gewenst kunnen drie GaSb-cellen in serie worden geschakeld met drie parallelle GaAs-cellen tot één minipaneel met twee elektrische aansluitingen.



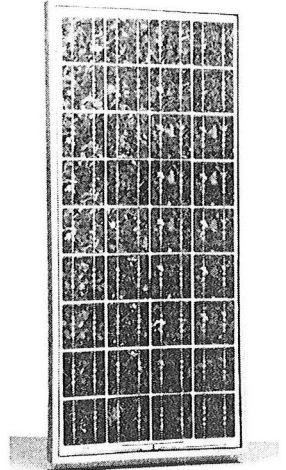
lenzen wordt het zonlicht 10-1000 maal geconcentreerd en op een cel gericht. Een veelgebruikt systeem is dat met een zogenaamde Fresnel-lens. Dergelijke platte lenzen worden ook gebruikt in overhead-projectoren en als blikverwijdende lens op autoruiten of vensters. Onder een lens met een oppervlak van bijvoorbeeld 30 x 30 cm² ligt dan een celletje met een oppervlak van 1 x 1 tot 10 x 10 cm². De Boeing-celletjes hebben een oppervlak van ongeveer 3 x 3 mm² en zitten onder een lens van 2 x 2 cm².

Een belangrijk aspect van concentrator-systemen is het feit dat ze alleen direct zonlicht goed kunnen benutten omdat diffuus licht zich niet laat focuseren. In gematigde streken als de onze is dat een groot nadeel omdat een belangrijk deel van de instraling diffuus van aard is. Dergelijke systemen zijn vooral te vinden in streken met een uitgesproken zonnig klimaat, zoals woestijngebieden. Verder moet de concentrator altijd 'naar de zon kijken' omdat anders het gefocusseerde licht naast de cel valt. Dit vereist extra voorzieningen ten opzichte van vast opgestelde panelen. Ten slotte is het in het algemeen nodig om de cel actief of passief te koelen: per vierkante centimeter zonnecel moet enkele tientallen Watts aan warmte worden afgevoerd om te voorkomen dat de cel al te heet wordt. Ook dit vereist extra voorzieningen.

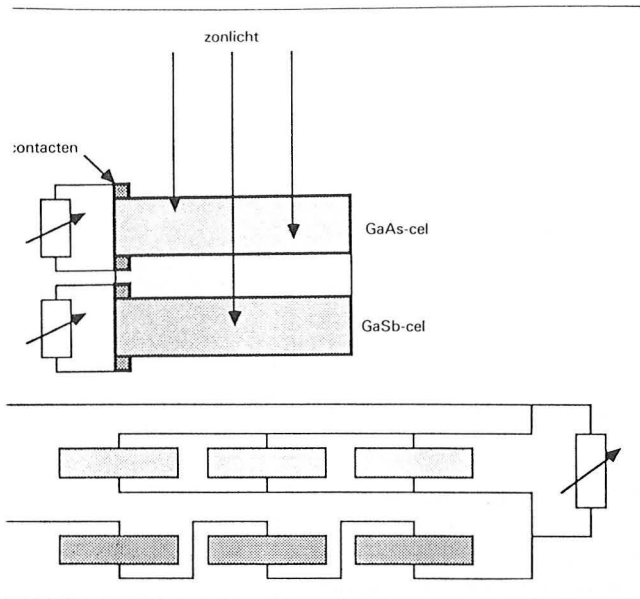
De uitkomst van een afweging van voor- en nadelen is sterk afhankelijk van de plaats waar het systeem moet worden gebruikt en van het type cel dat wordt toegepast.

Commercieel paneel

Als voorbeeld van een commercieel zonnepaneel nemen we er één op basis van polykristallijn silicium. Het rendement van zulke panelen ligt rond de elf procent. Het meest gangbare type paneel bevat ongeveer 36 in serie geschakelde cellen van 10 x 10 cm² (figuur 2). Dit heeft een vrij praktische reden: panelen worden vaak gebruikt om 12 Volts accu's op te laden. Bij maximaal vermogen levert één cel minder dan 0,5 Volt spanning. Om onder typische werkomstandigheden toch voldoende spanning te krijgen wor-



4. Zonnepaneel met cellen van polykristallijn silicium. (foto: R&S Renewable Energy Systems)



Figuren 1 en 2: serieschakeling in een paneel met cellen van polykristallijn silicium. Onder: schematische doorsnede van een paneel.

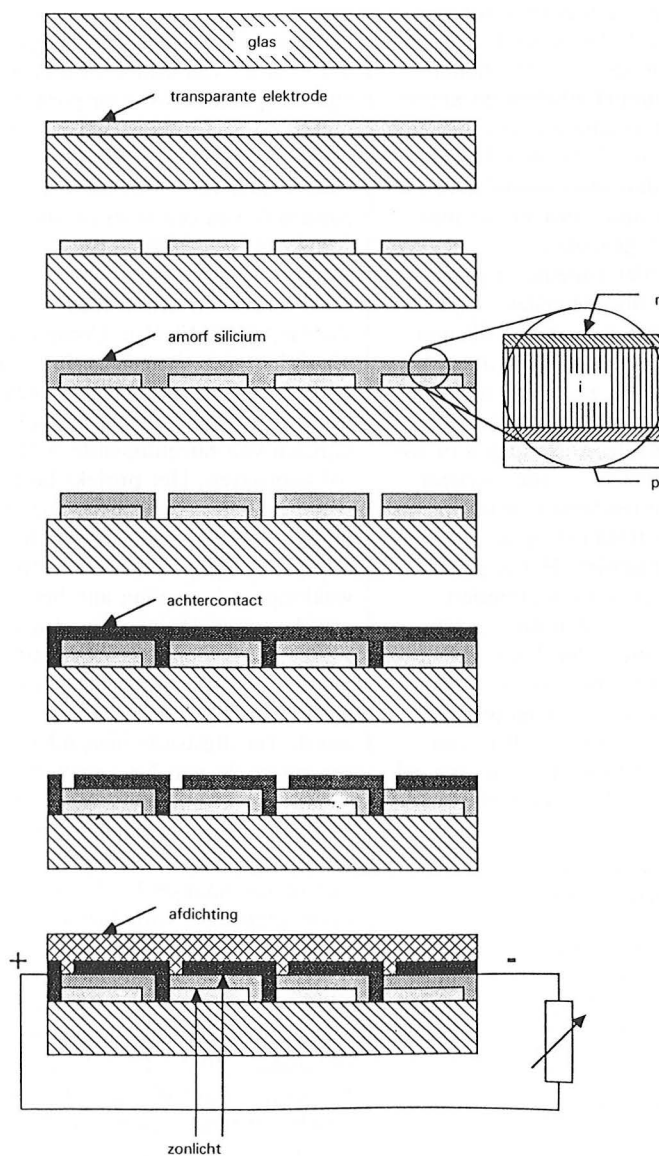
den cellen in serie gezet. Bij een goed ontwerp is het rendement van het paneel vrijwel gelijk aan dat van de individuele cellen. Aangezien cellen van polykristallijn silicium een natuurlijke spreiding in rendement vertonen, worden de cellen vóór montage ingedeeld in klassen. Daarna worden cellen van ongeveer dezelfde kwaliteit in een paneel gecombineerd om verliezen ten gevolge van 'mismatch' te minimaliseren. Het rendement van elf procent voor individuele cellen is het resultaat van een compromis tussen rendement en kosten. Dat blijkt al uit de materiaalkeuze zelf: polykristallijn silicium is minder goed dan monokristallijn silicium, waarmee recent cellen met een rendement van 24 procent zijn vervaardigd. Voor polykristallijn silicium ligt dat getal 'slechts' op achttien procent (zie voor een gedetailleerd overzicht van de rendementsbeperkende factoren het meenummer van dit blad). Het compromis blijkt uit het formaat van de cellen. Het is niet zo moeilijk om kleinere cellen met een wat hoger rendement te maken. Weinig grote cellen in een paneel is om verschillende redenen echter aantrekkelijker dan veel kleine cellen. Let wel, het rendement van achttien procent is gerealiseerd op cellen met een oppervlak van slechts $2 \times 2 \text{ cm}^2$. Ten slotte blijkt het compromis uit de gebruikte productieprocessen. Als men niet op de kosten zou hoeven letten zou het rendement belangrijk hoger liggen dan

nu het geval is. In een dergelijke situatie zouden bij voorbeeld reflectieverliezen kunnen worden verminderd door betere anti-reflectiecoatings te gebruiken en weerstandsverliezen teruggebracht door betere metaalcontacten aan te brengen. Naar verwachting zal het over enkele jaren mogelijk zijn om op industriële schaal zonnepanelen te produceren op basis van polykristallijn silicium met een rendement van vijftien tot zestien procent. Het resterende verschil van twee à drie procent met het hoogste rendement in een laboratorium zal voorlopig moeten blijven bestaan om de panelen niet onaanvaardbaar duur te maken.

Tandempanelen

Het idee om het rendement te

verhogen door gebruik te maken van tandemstructuren is voor het eerst toegepast voor het vervaardigen van panelen met behulp van de zogenaamde dunne-film technieken. Daarbij worden cellen en panelen gemaakt door verschillende zeer dunne laagjes (minder dan 1 micrometer) van halfgeleiders, geleiders en isolatoren aan te brengen op een geschikte ondergrond. De cellen zijn dan niet zelfdragend zoals cellen van kristallijn silicium, maar verkrijgen hun stevigheid door het onderliggende glas, staal of andere materiaal. Het bekendste voorbeeld is amorf silicium, dat oorspronkelijk is toegepast in horloges en rekenmachines, maar inmiddels wordt geproduceerd in de vorm van panelen. Figuur 3 laat zien hoe men zonnecellen op een



glasplaat maakt door middel van het deponeren van laagjes transparante geleider, halfgeleider en metaal. Tussen de depositiestappen worden gebieden op de glasplaat elektrisch van elkaar gescheiden met behulp van een laser. Daarbij ontstaan individuele 'cellen' die op het eind van het proces netjes met elkaar in serie zijn geschakeld. Met deze techniek is het mogelijk grote panelen uit een stuk te fabriceren. Zeer kleine cellen op basis van amorf silicium alleen hebben tot nu toe een rendement van maximaal ongeveer twaalf procent. Commerciële panelen halen vijf tot zeven procent. Door het toepassen van zeer vooruitstrevende technologie en tandemstructuren zijn onlangs 30 x 30 cm² panelen gemaakt met een rendement van negen à tien procent. Kleine tandemcellen halen dertien tot veertien procent. De gebruikte materialen zijn dan: amorf silicium-carbide, amorf silicium en amorf silicium-germanium. Amorf silicium-carbide is meer blauwgevoelig dan puur amorf silicium, amorf silicium-germanium juist meer rood-gevoelig. Een nog niet volledig opgelost probleem bij alle cellen en panelen op basis van amorf silicium en de aanverwante legeringen is de degradatie van het rendement met tien tot vijftig procent relatief tijdens de eerste dagen of weken van belichting (de hiervoor genoemde rendementen hebben betrekking op de situatie vóór degradatie). Het is gebleken dat de degradatie vermindert naarmate de cellen dunner worden. Om die reden komt het steeds vaker voor dat men twee cellen van hetzelfde materiaal (amorf silicium) stapelt in een tandemstructuur. Twee dunne cellen doen het beter dan één dikke.

3. Schematische weergave van de produktiestappen die nodig zijn om een paneel te maken met amorf-silicium cellen. Achtereenvolgens: depositie van de transparante elektrode (bij voorbeeld indium-tin-oxide), laserkrassen, depositie van p-type, i-type en n-type amorf silicium, laserkrassen, depositie van het achtercontact, laserkrassen, aanbrengen van de afdichting.

Een principieel andere dunne-film tandemcel is die waarin amorf silicium wordt gecombineerd met koper-indium-diselenide (cis). Cis is meer rood- en infrarood-gevoelig dan amorf silicium. Een experimenteel paneel van dit type met afmetingen van 30 x 30 cm² heeft een rendement laten zien van ruim twaalf procent. Cis is een stabiel materiaal dat onder belichting geen degradatie vertoont. De ervaringen tot nu toe wijzen erop dat het rendement van toekomstige generaties dunne-film tandemmodulen boven de vijftien procent zal komen te liggen. Grote voordelen van de dunne-film technologie zijn:

- potentieel lage produktiekosten (bij productie op grote schaal);
- de mogelijkheid cellen op vrijwel willekeurige ondergrond te maken.

Aardige voorbeelden van bijzonder gebruik van dunne-film cellen zijn dakpannen van transparant materiaal waarin flexibele zonnecellen zitten, of lichtdoorlatende zonnecellen voor gebruik in het zonnedak van een auto of als zonwerend gevelement.

Zonnepanelen anno 1990

Pacific Gas & Electric Company uit Californië, Verenigde Staten is bezig met het installeren van een testveld waar men grote aantallen panelen van uiteenlopende soort wil beproeven. Het project heet 'Photovoltaics for utility scale applications' (PVUSA) en is gericht op grootschalige elektriciteitsopwekking en koppeling aan het openbare net. De panelen zijn representatief voor wat op dit moment (in de Verenigde Staten) op grote schaal kan worden geproduceerd. Ter illustratie hieronder een overzicht van het gemeten rendement in procenten voor verschillende soorten panelen (typisch oppervlak 0,2 - 0,5 m²), met tussen haakjes [...] het maximale rendement voor kleine cellen van hetzelfde soort:

- monokristallijn silicium, diverse technieken: 12,9 - 14,1 % [24 %];
- polykristallijn silicium, diverse technieken: 10,7 - 12,8 % [18 %];
- polykristallijn silicium, op keramisch substraat: 8,3 % [16 %];
- monokristallijn silicium, concentrator cellen: 18,0 % [29 %];
- amorf silicium, diverse technie-

- ken: 4,5 - 5,6 % [12 %];
- amorf silicium/koper-indium-diselenide, dunne-film tandem: - [15 %];
- koper-indium-diselenide: 7,7% [14 %];
- cadmium-sulfide/cadmium-telluride: 6,2% [11 %];
- gallium-arseen: - [125 %];
- gallium-arseen/koper-indium-diselenide, dunne-film tandem: - [23 %];
- gallium-arseen/gallium-antimoon, concentrator-tandem: [37 %].

Deze getallen voor panelen zijn ruwweg $\frac{1}{2}$ tot $\frac{2}{3}$ van wat op kleine oppervlakken in een laboratorium is gerealiseerd. De oorzaak hiervan is voor een deel vrij fundamenteel van aard: in een paneel zijn bij voorbeeld de weerstandsverliezen altijd veel groter dan in een kleine cel. Voor een ander deel is het grote verschil het gevolg van problemen bij het opschalen van fabricage-techniek naar produktieniveau. Daarbij spelen kosten een grote rol, maar ook bij voorbeeld de homogeniteit van dunne laagjes over grote oppervlakken.

Toekomst

Het rendement van massageproduceerde zonnepanelen voor gebruik onder natuurlijk zonlicht ligt tussen de vijf en veertien procent. Concentratorpanelen halen achttien procent. Commerciële panelen met de laagste prijs per Watt-piek hebben een rendement tussen vijf en twaalf procent. Zeer geavanceerde kleine zonnecellen halen 24 tot 25 procent onder natuurlijk zonlicht en maximaal 37 procent onder geconcentreerd zonlicht. In de nabije toekomst zullen commerciële panelen op basis van relatief goedkope technologie (polykristallijn silicium en dunne-films) naar verwachting een rendement halen van meer dan vijftien procent. De snelle ontwikkelingen op het gebied van tandempanelen wijzen erop dat op de wat langere termijn betaalbare panelen met een rendement boven twintig procent beschikbaar zullen komen. ●

6. Lichtbaken voorzien van 2 polykristallijn silicium zonnepanelen. (foto: R&S Renewable Energy Systems)

