

# Navorsings- en oorsigartikels

## Fotovoltaïese elektrisiteit

R. Swanepoel

Departement Fisika, Randse Afrikaanse Universiteit, Posbus 524, Aucklandpark, 2006

E-pos: rsw@na.rau.ac.za

Ontvang 27 Augustus 1998; aanvaar 7 September 1998

### UITTREKSEL

*Fotovoltaïese elektrisiteit (PV) is 'n gratis en skoon bron van hernubare energie wat 'n oplossing bied vir baie sosio-ekonomiese probleme van beide Eerstewêreld- en Derdewêreldgemeenskappe. Groot skaalse invoering van PV word tans aan bande gelê deur die hoë koste van sonselle. Kristallynesilikon-sonselle domineer tans die wêreldmark. Hierdie selle bestaan uit plat skywe suiwer Si met 'n p-n-voegvlak en die tegnologie is feitlik reeds vervolmaak met selle wat 'n doeltreffendheid van 24% lewer. Polikristallynesilikon-skywe se doeltreffendheid is effens laer, maar dit is meer koste-effektief. Die oplossing lê egter in die gebruik van dunlagieselle waar die materiaalkoste baie laag is en waar opskaling en massaproduksie ekonomies kompetierend gedoen kan word. Amorfe silikon, CdTe en CIS is tans die belowendste dunlagiemateriale en daar word wêreldwyd intensief navorsing gedoen op dié materiale. Dunlagiesonselle is egter nog in die ontwikkelingstadium en baie navorsing en ontwikkeling moet nog gedoen word om dit ekonomies kompetierend te maak. Die produksie van PV-modules groei tans teen bykans 40% per jaar en verskeie lande het aktiewe programme om fossielbrandstowwe met PV as energiebron te vervang. Suider-Afrika met sy groot hoeveelheid sonskyn is die ideale gebied vir die groot skaalse gebruik van fotovoltaïese elektrisiteit.*

### ABSTRACT

#### *Photovoltaic electricity*

*Photovoltaic electricity (PV) is a free and clean source of renewable energy and presents a solution for many of the socio-economic problems of both first world and third world communities. Large-scale introduction of PV is currently hampered by the high cost of solar cells. At present crystalline silicon solar cells dominate the world market. These cells consist of flat wafers pure Si with a p-n junction and the technology is almost perfected with cell efficiencies of 24%. The efficiency of poly-crystalline wafers is somewhat lower but they are more cost effective. The solution, however, lies in the use of thin film solar cells where the material cost is very low and where upscaling and mass production can be done in an economically competitive way. Amorphous silicon, CdTe and CIS are presently the most promising thin film materials and intensive research is being done world-wide on these materials. Thin film solar cells are, however, still in the development stage and much research and development must still be done to make them economically competitive. The production of PV modules in the world at the moment grows at a rate of almost 40% per annum and several countries have active programmes to replace fossil fuels with PV as an energy source. Southern Africa with its abundant sunshine is an ideal region for the large-scale use of photovoltaic electricity.*

### INLEIDING

Alle lewensvorme en aktiwiteite op die aarde word moontlik gemaak deur die beskikbaarheid van energie. In die mees basiese vorm benodig die mens voedsel as energiebron vir lewe, terwyl die moderne tegnologiese samelewing in Eerstewêreldlande slegs moontlik is vanweë die beskikbaarheid van energie in die vorm van elektrisiteit en fossielbrandstowwe. Meer as twee biljoen mense in Derdewêreldlande het egter steeds nie toegang tot elektrisiteit nie.<sup>1</sup> Terwyl hierdie gemeenskappe steeds wag op die voorsiening van elektrisiteit om hul lewenskwaliteit te verbeter, besef ontwikkelde gemeenskappe dat die produkte van fossielbrandstowwe 'n negatiewe invloed op die omgewing het in die vorm van besoedeling. Dit mag katastrofiese gevolge hê indien die oormatige CO<sub>2</sub>-vrystelling aanleiding kan gee tot klimaatsveranderinge op globale skaal. Albei hierdie probleme kan egter oorbrug word indien die wêreld sou oorskakel na hernubare energiebronne: bronne wat nie ekologiese verstuurings veroorsaak nie. Van die vele moontlikhede soos sonverhitting, windenergie, biomassa, geotermiese energie, golwe, getye en hidro-energie, is fotovoltaïese elektrisiteit die belangrikste hernubare bron van energie.

Fotovoltaïka (PV) verwys na die proses waar sonlig direk omskep word in elektriese drywing met 'n fotovoltaïese sel (sonsel). Die voordele van PV is die volgende:

- Dit veroorsaak geen besoedeling of ekologiese verstoring nie.
- Die energiebron is onuitputbaar, gratis en daar is geen lopende koste nie. Daar is slegs 'n eenmalige kapitale uitgawe.
- Dit is 'n gedentraliseerde bron en verskaaf energie aan gemeenskappe waar hulle gevestig is.

Daar hoef nie verskuiwings van gemeenskappe na stedelike gebiede plaas te vind ten einde lewenskwaliteit te verhoog of ekonomiese groei te bewerkstellig nie.

- Dit is 'n lokale bron van elektrisiteit en daar is geen distribusienetwerk nodig nie.
- Dit bied die oplossing vir afgeleë Derdewêreldgemeenskappe wat vanweë koste-oorewegings nie aan netwerke gekoppel kan word nie.
- Dit is 'n eenvoudige stelsel sonder enige bewegende onderdele en het geen instandhouding nodig nie.
- Dit is 'n modulêr en die stelsel kan verskillende groottes aanneem: klein stelsels vir individuele huishoudings (100

W), medium stelsels vir skole, klinieke en klein gemeenskappe (kW) en groot stelsels (MW) wat aan die netwerk gekoppel is.

Daar is egter die nadeel dat energie slegs beskikbaar is as die son skyn. Dit vereis dat alle PV-stelsels 'n vorm van energiestoring moet insluit. Vir klein stelsels word batterye gebruik, maar daar is vele ander moontlikhede soos hidrôstoring, vliegwiele, saamgepersde lug of selfs die bestaande elektrisiteitsnetwerk.

Ten spyte van die voordele van PV was die invoering daarvan in die wêreld die afgelope twee dekades relatief stadig. Die redes vir dié stadige groei is hoofsaaklik onkunde van die algemene publiek en die apatiese houding van owerhede. Daar is egter ook 'n belangrike tegnologiese probleem: die tegnologie van huidige sonselle is sodanig dat die koste van die selle baie hoog is (ongeveer \$4 per watt). Meer as 60% van die koste van 'n PV-stelsel lê in die sonselle self. Teen hierdie koste is PV nie ekonomies kompetend met huidige energiebronne nie. Die primêre taak van die wetenskaplikes wêreldwyd is dus om materiale te vind en tegnologieë te ontwikkel wat die koste van sonselle drasties sal verlaag.

## DIE SON

Die energie van die son het sy oorsprong in die smeltingsreaksie van waterstof met die vorming van helium. Dié proses sal nog vir minstens  $10^{10}$  jaar voortduur. Die totale stralingsenergie van die son wat die aarde daaglik bereik is  $10^4$  keer meer as die huidige totale primêre energieverbruik van die wêreld. Suider-Afrika is 'n gebied met die hoogste gemiddelde sonenergie ter wêreld:  $6 \text{ kWh/m}^2$  per dag.<sup>2</sup> Die meeste ontwikkeling in PV vind egter tans plaas in lande waar die energiedigtheid baie laer is. Dit is veral in Europa waar die besoedeling van fossielbrandstowwe 'n ernstige probleem is waar owerhede die invoering van PV sterk ondersteun.<sup>3</sup>

Die golflengte van die son se spektrum strek vanaf 200 nm tot  $2500 \text{ nm}^2$ , soos getoon in figuur 1. Die vorm van die spektrum is soortgelyk aan dié van 'n swartstraler by  $6000 \text{ K}$  en toon 'n maksimum intensiteit by  $500 \text{ nm}$  (groen). Die intensiteit in die ruimte buite die aarde is  $1353 \text{ W/m}^2$ , maar absorpsie deur die aarde se atmosfeer (water,  $\text{CO}_2$ , partikels en besoedeling) verminder die beskikbare drywing. Die effek van die sonhoogte word uitgedruk as  $A_m \times$ , waar  $x = 1/\cos \theta$ ,  $\theta$  die hoek tussen die vertikaal en die sonposisie.  $A_{M0}$  is die drywingsdigtheid in die

ruimte;  $A_{M1}$  vir loodregte sonstrale by seevlak ( $1000 \text{ W/m}^2$ ) en  $A_{M1.5}$  vir 'n sonhoek van  $45^\circ$  by seevlak ( $844 \text{ W/m}^2$ ). Die standaardpektrum wat vir die kalibrasie van sonselle gebruik word, is  $A_{M1.5g}$ : 'n spektrum soortgelyk in vorm aan  $A_{M1.5}$ , maar met 'n intensiteit van  $1000 \text{ W/m}^2$  ( $100 \text{ mW/cm}^2$ ).

## WERKING VAN 'N SONSEL

Die fotovoltaiëse effek is reeds in 1839 deur Becquerel waargeneem, maar die eerste werkende Si-sonsel is in 1954 deur Bell Laboratories ontwikkel.<sup>4</sup> Sedertdien was sonselle die bron van elektriese energie vir ruimtevaartuie en kommunikasie-satelliete.

Vanaf 1970 is aandag begin gee aan sonselle as alternatiewe bron van elektrisiteit vir aardse gebruik.

In alle sonselle vind die volgende drie prosesse plaas:

1. Die fotone van sonlig word in 'n materiaal geabsorbeer waar dit vry ladingsdraers skep: negatiewe elektrone en positiewe holtes.

Hierdie proses lê 'n beperking op die materiale wat vir sonselle gebruik kan word: die materiaal moet sodanig wees dat die energie wat nodig is om vry ladings te skep (die bandgaping), saamval met die maksimum energie van die son se spektrum. Hierdie energie moet tussen 1 en 2 eV wees. Dit is hoofsaaklik verbindings tussen Groepe II, III, IV, V en VI in die Periodieke Tabel wat aan hierdie vereiste voldoen.

2. Die opgewekte vry draers moet geskei word voor dit weer herkombineer.

In 'nonsel word dié skeiding gedoen deur die interne elektriese veld van 'n p-n-voegvlak in halfgeleiermateriale. Die vry draers moet egter na die voegvlak beweeg deur diffusie en moet dus 'n lang leeftyd (of lang, vry padlengte) hê. Dit vereis dat die materiaal besonder suiwer en sonder strukturele foute moet wees.

3. Die draers moet versamel word en aan 'n eksterne las gekoppel word.

'n Tegnologie moet ontwerp word sodat die maksimum moontlike aantal ladings sonder verliese afgevoer kan word.

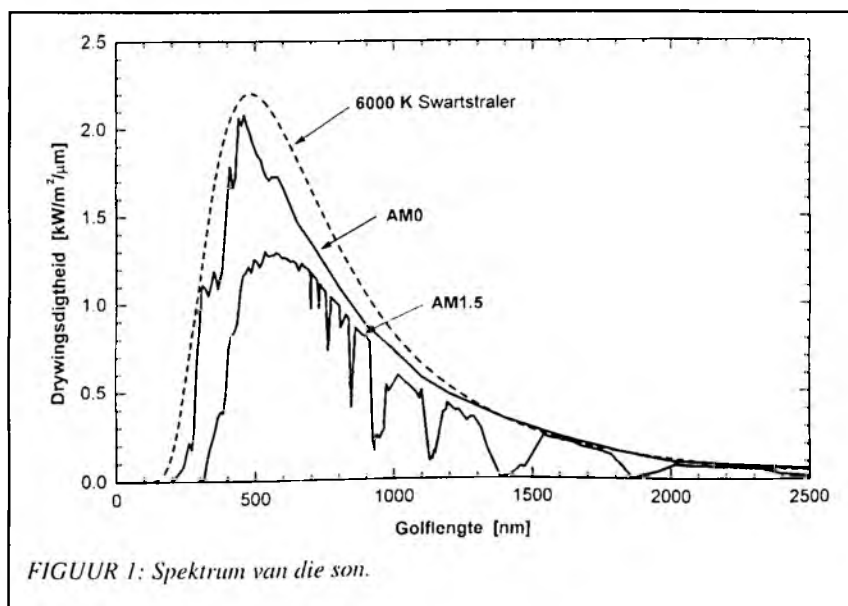
Die doeltreffendheid van 'nonsel  $\eta$  word gedefinieer as

$$\eta = \frac{\text{Drywing gelewer deur die sel}}{\text{Invallende drywing}} \times 100$$

Geenonsel kan 100% doeltreffend wees nie. Daar is twee soorte beperkings: fundamentele beperkings en tegnologiese beperkings.

Die belangrikste fundamentele beperking is die bandgaping van die materiaal. Slegs fotone met 'n energie groter as die bandgaping kan ladings opwek en dié met 'n laer energie word nie geabsorbeer nie en lewer geen hidrae tot die fotostroom nie. Vir fotone met 'n energie groter as die bandgaping, word slegs 'n gedeelte van die foton se energie benut en die ekstra energie word aan die kristal afgegee in die vorm van warmte. Vir die son se spektrum is die optimale bandgaping 1,4 eV en vir hierdie geval is die maksimum teoretiese draeropwekking ongeveer 40%.

'n Tweede fundamentele beperking is die rekombinasie van opgewekte ladings.



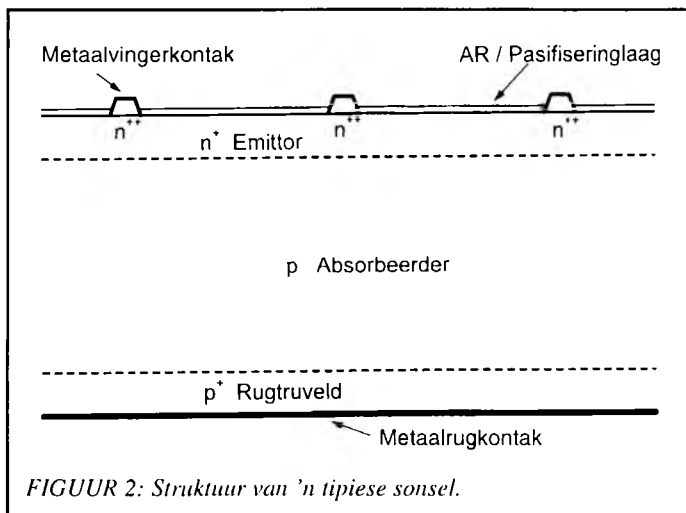
FIGUUR 1: Spektrum van die son.

Indien die konsentrasie baie hoog word, is Auger rekombinasie (energie word afgegee aan ander vry elektrone in die geleidingsband) oorheersend en dit lê 'n beperking op die maksimum spanning wat die sel kan lewer. Die maksimum spanning is altyd kleiner as die bandgaping van die materiaal.

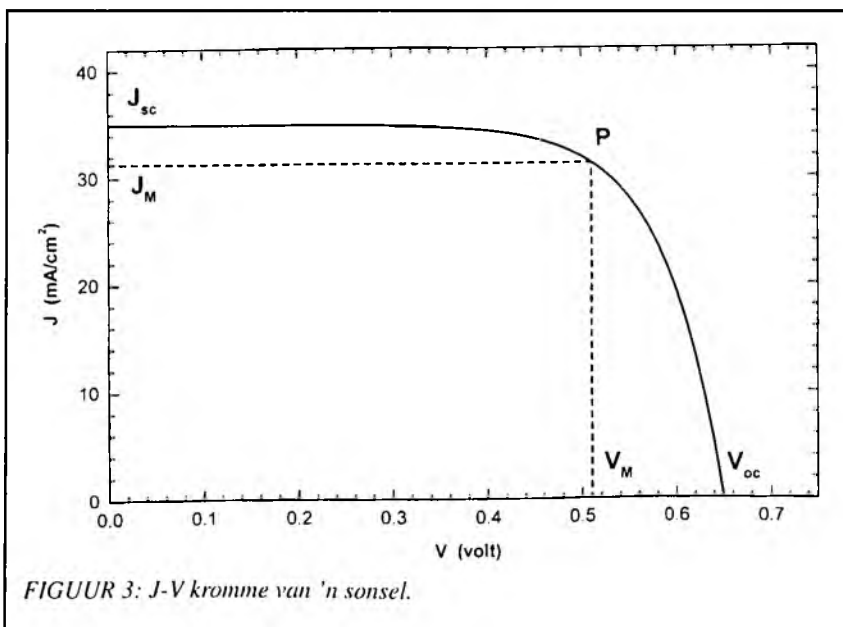
'n Volledige PV-stelsel bestaan uit die sonselle wat in 'n module gemonteer is, elektroniese beheertoerusting en batterye. Daar is verder twee tipes stelsels: platplaatmodules wat staties aan die son blootgestel word en konsentreerders wat die son val en die lig deur optiese stelsels op klein selle konsentreer. Alhoewel laasgenoemde aantreklik lyk veral uit 'n koste-ooreweging, is dit teenstrydig met die voordeel van geen bewegende dele of instandhouding van 'n PV-stelsel. Konsentreerders beslaan dan ook tans minder as 1% van die wêreldmark en sal nie verder beskou word nie. Slegs die sonselle in 'n PV-stelsel sal verder beskou word met verwysing na 'n silikonsel.

**KRISTALLYNE Si-SONSEL**

Alle sonselle bestaan basies uit 'n struktuur soos in figuur 2<sup>5</sup> getoon. 'n p-tipe Si-skyf, 200 μm, dik, dien as basis en absorbeerder. 'n Dun laagie (20 nm) n-tipe Si aan die bokant vorm die emittor. 'n Metaalvingerpatroon dien as boonste (negatiewe) eksterne kontak, terwyl die agterkant bedek is met 'n metaal vir die ander (positiewe) eksterne kontak. Wanneer lig op die sel val en 'n eksterne las daaroor geplaas word, word



FIGUUR 2: Struktuur van 'n tipieseonsel.



FIGUUR 3: J-V kromme van 'nonsel.

'n J-V kromme soos getoon in figuur 3 verkry. Wanneer daar geen las oor die sel is nie ( $J = 0$ ), skep die opgewekte ladings 'n spanning oor die sel: die oopbaanspanning,  $V_{oc}$ . Wanneer die sel gekortsluit word ( $V = 0$ ), vloei 'n maksimum aantal ladings deur die baan: die kortsluitingstroomdigtheid,  $J_{sc}$ . Drywing kan aan die eksterne las gelewer word deur die sel tussen die twee ekstreme te bedryf. Daar is 'n punt  $P$  by  $V_M$  en  $J_M$  waar die drywing van die sel die hoogste is. Indien die totale invallende drywingsdigtheid  $P_{in}$  is ( $W/m^2$ ), word die doeltreffendheid van 'n sel  $\eta$  gedefinieer as

$$\eta = \frac{V_M J_M}{P_{in}}$$

Die mate van afwyking vanaf 'n reghoek van die J-V-kromme word gegee deur die vulfaktor,  $FF$ :

$$FF = \frac{V_M J_M}{V_{oc} J_{sc}}$$

Die doeltreffendheid word dan gegee deur

$$\eta = FF \frac{V_{oc} J_{sc}}{P_{in}}$$

Die PV-tegnologie poog om 'n sel te ontwerp waarvan die 3 parameters  $J_{sc}$ ,  $V_{oc}$  en  $FF$  die maksimum moontlike waardes het vir die sonspektrum.

**Weerkaatsing**

Die brekingsindeks van Si in die optiese gebied is 3,8 en dit lei daartoe dat meer as 30% van die invallende lig weerkaats word en dus nie benut word nie. Hierdie weerkaatsing kan verminder word deur 'n antireflekslaag (AR) op die voorkant van die sel aan te bring.  $SiO_2$  verminder die weerkaatsing, maar in die praktyk word 'n dubbellaag bestaande uit  $ZnS$  en  $MgF_2$  gebruik om die weerkaatsing na minder as 5% te verminder.  $TiO_x$  en  $SiN_x$  word ook gebruik. Hierdie lagies moet met vakuumpoedering aangebring word wat die vervaardigingsproses vertraag en koste verhoog. Daar word dus probeer om die weerkaatsing te verminder deur die oppervlak van die sel te tekstureer. Die getekstureerde oppervlak hou ook die straling wat van die agterkant teruggekaats word binne die sel wat die doeltreffendheid van die sel verder verhoog. V-groewe kan met 'n meganiese saag aangebring word wat weerkaatsing na 6% verminder, maar die proses is stadig en vertraag produksie.<sup>6</sup> Die oppervlak kan ook getekstureer word deur selektiewe chemiese etsing: 'n 2% NaOH-oplossing saam met isopropanol by 80 °C ets 'n piramidale struktuur op die <100>-rigting van Si wat die weerkaatsing verlaag na minder as 10%.<sup>7</sup>

**Die basis**

Fotone word in die basis geabsorbeer en skep elektronholte-pare (EHP's). Die opgewekte elektrone kan vry deur die kristal beweeg in die geleidingsband en die opgewekte positiewe holtes vry in die valensband. Die optiese absorpsiekoëffisiënt van die basis moet dus groot wees in die optiese golflengtegebied. Si

het ongelukkig 'n indirekte bandgaping (kristalmomentum is betrokke by die opwekkingsproses) wat die absorpsiekoëffisiënt verlaag en daarom is 'n dikte van 200  $\mu\text{m}$  Si nodig om genoegsame sonlig te absorbeer. Die absorpsiekoëffisiënt word egter hoofsaaklik bepaal deur die bandgaping (energie nodig om 'n EHP te skep) van die basismateriaal. 'n Kleinere bandgaping lewer 'n groter  $J_{sc}$  maar laer  $V_{oc}$ , terwyl 'n groter bandgaping 'n kleiner  $J_{sc}$  lewer maar 'n hoër  $V_{oc}$ . Si se bandgaping 1,11 eV en indien alle EHP's tot die stroom bydra, kan dit 'n maksimum  $J_{sc}$  van 44  $\text{mA}/\text{cm}^2$  lewer.

Die opgewekte EHP's kan weer herkombineer en hul energie as warmte aan die kristal afgee. Die minderheidsdraers (elektrone in p-tipe en holtes in 'n n-tipe) wat in die basis herkombineer, lewer nie 'n bydrae tot die fotostroom nie. Indien die totale opwekkingstempo  $G$  is en die rekombinasietempo  $R$  in die basis met dikte  $d$ , is die foto-stroomdigtheid van die basis  $J_L = qd(G - R)$ . Rekombinasie verkort die diffusielengete  $L_n$  van minderheidsdraers in die basis en dit verlaag die oopbaanspanning  $V_{oc}$ . Daar kan aangetoon word dat  $V_{oc} = kT/q \ln(I_L/I_0 + 1)$ . Die donkertroustrom  $I_0$  neem toe met afname in  $L_n$  wat lei tot 'n afname in  $V_{oc}$ .

In die geval van Si vind rekombinasie hoofsaaklik plaas via onsuiverheidstoestande diep in die bandgaping. Lang diffusielengete is slegs moontlik indien die basis baie suiwer is en min defekte bevat. Die diffusielengete moet van dieselfde grootte wees as die dikte van die basis. Hierdie vereiste vir hoëkwaliteitmateriaal vereis gesofistikeerde prosesse om onsuiverhede en defekte in die materiaal te verminder en dit lei tot hoë produksiekoste. Selfs in ultra-suiwer kristallyne Si vind Auger rekombinasie plaas wat 'n fundamentele bogrens van ongeveer 0,75 V plaas op die waarde van  $V_{oc}$ . Die beste kwaliteit kristallyne Si is dié berei deur smeltveging (FZ), maar dit is 'n energie-intensiewe en duur proses. Czochralski (CZ) gekweekte Si se kwaliteit is effens laer, maar vanweë die goedkoper proses word dit meesal in sonselle gebruik. 'n Kompromie moet getref word met die vlak van dotering (B) vir die p-tipe basis: indien die dotering te hoog is, is die draerleef tyd en diffusielengete kort en indien die dotering te laag is, lei die serieweerstand tot 'n lae vullfaktor. Materiaal met 'n resitiwiteit in die orde van 1 tot 10  $\Omega\text{cm}$  word gebruik.

Die vervaardiging van die basismateriaal behels die volgende: metallurgiese Si word met chemiese prosesse gesuiwer en gesmelt. 'n Silindriese kolom enkelkristal p-tipe Si met deursnee van 10 tot 20 cm word uit die smelt getrek (CZ-materiaal). Die kwaliteit kan verder verbeter word deur die kolom met 'n smeltveegproses te smelt (FZ-materiaal). Die kolom word in skywe met diktes van 200  $\mu\text{m}$  gesaag. Ongeveer 50% van die materiaal gaan met die saagproses verlore. Die saagproses veroorsaak kristalskade en dit word chemies afgeëts.

Beskikbaarheid van goedkoop Si-skywe is tans 'n probleem en navorsers probeer om skywe te produseer teen minder as \$20 per kg. Groot beleggings in Japan, die VSA en Europa lewer jaarliks 40 MW ekwivalente skywe.<sup>8</sup>

### Die emittor

Die opgewekte EHP's moet geskei word voor dit weer herkombineer ten einde 'n eksterne stroom te lewer. Dié skeiding word in 'n sonsel bewerkstellig deur die skepping van 'n p-n-voegvlak: 'n grens tussen p-tipe en n-tipe in dieselfde kristal. Daar is 'n sterk elektriese veld by die voegvlak teenwoordig wat dan die opgewekte minderheidsdraers in twee rigtings skei: elektrone in die p-tipe na die n-lagie en holtes in die n-tipe na die p-tipe basis. Die ladings word dan deur die metaalkontakte na die eksterne las gevoer. Die opgewekte elektrone in die p-tipe basis beweeg na die voegvlak deur middel van diffusie en daarom

is dit noodsaaklik dat die diffusielengete (of leeftye) van die elektrone in die basis waar dit opgewek word, lank moet wees.

Die swaar gedoteerde n<sup>+</sup>-lagie word aangebring deur diffusie van fosfor. Die dikte is gewoonlik in die orde van 20 nm, aangesien die diffusielengete van minderheidsdraers in die n<sup>+</sup>-lagie (holtes) kort is. Onder die metaalkontakvingers moet die lagie egter baie hoog gedoteer wees ten einde 'n goeie ohmiese kontak te verseker. Dit word bewerkstellig deur die n-lagie aanvanklik swaar te doteer en dan met foto-litografie gedeeltes te ets ten einde die verlangde dikte n-lagie bloot te stel. Die fosfordiffusie het verder die voordelige effek dat dit onsuiverhede uit die Si-basis verwyder deur dit op te los in die swaar gedoteerde lagie.<sup>9</sup> Oppervlakrekombinasie vind plaas vanweë defekte op die oppervlak en dit word verminder deur die oppervlak te pasifiseer met 'n dun lagie SiO<sub>2</sub> of SiN<sub>x</sub>.

### Metaalkontakvingers

Die kontakweerstand tussen die metaal en Si lei tot 'n serie-weerstand, lae vullfaktor en verlaagde doeltreffendheid. Daar is verder 'n onvermydelik skaduverlies as gevolg van die gedeeltes wat deur die metaalkontakte bedek word. Hierdie verlies is tipies 5%. 'n Kombinasie van Ti/Pd/Ag lewer goeie ohmiese kontakte, maar die proses is te duur vir kommersiële produksie. 'n Tegnologie waar diep groewe met 'n laser in die skyf gesny word en dan met 'n metaal opgevul word,<sup>10,11</sup> lewer goeie resultate, maar die proses is ingewikkeld en duur. Verskeie ander prosesse word nagevors, maar in meeste gevalle moet 'n n<sup>+</sup>-lagie onder die metaal aangebring word. Die eenvoudigste tegnologie is om silwer in die vorm van 'n pasta met 'n maskerdrukproses aan te bring en dan te bak by 'n temperatuur bo 700 °C. Die proses is eenvoudig en goedkoop en 90% van die kommersiële Si-sonselle gebruik tans hierdie tegnologie.<sup>12</sup> Die kontakweerstand van die Ag-kontakte is egter hoog en dit is die vernaamste rede waarom die doeltreffendheid van meeste kommersiële Si-sonselle nie hoër as 15% is nie.

### Die rugkontak

Aluminium word met vakuüm-opdamping of maskerdruk op die agterkant aangebring en dan gebak by ongeveer 800 °C. Diffusie van die metaal in die Si lei tot die vorming van 'n p<sup>+</sup>-lagie met die verdere voordeel dat dit onsuiverhede uit die basis verwyder.<sup>13</sup> Die p<sup>+</sup>-lagie skep ook 'n rugtrouveld (BSF) wat minderheidsdraers terug reflekteer en die doeltreffendheid verhoog.<sup>14</sup> Meer gesofistikeerde tegnologieë soos puntkontakte<sup>15</sup> en swewende voegvlakke<sup>16</sup> word tans nagevors.

### Polikristallyne-Si-sonselle

Ten einde koste te verlaag, word gepoog om die enkelkristal-prosessering uit te skakel en skywe van polikristallyne Si as basis te gebruik.<sup>17</sup> Die verdere prosessering is soortgelyk aan dié van enkelkristal-Si, maar meer aandag word aan die pasifisering van korrelgrense gegee. Die doeltreffendheid van polikristallyne-Si-sonselle is noodwendig ongeveer 2% laer as dié van enkelkristal-Si-sonselle vanweë rekombinasie by die korrelgrense en defekte. Verskeie unieke tegnologieë word ondersoek en die EFG-proses waar 'n dun plaat Si uit 'n smelt getrek word, lewer selle met 'n redelike doeltreffendheid.<sup>18</sup>

### Modules

'n Si-sonsel werk tipies by 'n spanning van 0,5 V en stroomdigtheid van ongeveer 30  $\text{mA}/\text{cm}^2$ . Die selle word in serie en

parallel geskakel en in 'n module gemonteer. Die module bestaan uit getemperde glas aan die voorkant met 'n polimeer (EVA) tussen die glas en selle. Die agterkant word verseël met Al, Mylar of Tedlar en die module word onder vakuüm by 'n temperatuur bo 100 °C verseël en in 'n metaalraam gemonteer.

### Doeltreffendheid van 'n Si-sonsel

Indien alle fundamentele beperkings in ag geneem word, is die teoretiese maksimum doeltreffendheid van 'n Si-sonsel ongeveer 29%.<sup>19</sup> Daar bestaan verskeie tegnologieë wat kleinere wysigings op die struktuur getoon in figuur 2 behels,<sup>20</sup> maar hierdie wysigings lei tot hoër produksiekoste. Die beste huidige sel (die PERL-sel<sup>21</sup>) se doeltreffendheid is 24%. Kommersiële enkelkristal-Si-modules se doeltreffendhede is tussen 13 en 16%. Die huidige koste varieer tussen \$3,5 en \$4,5 per watt. Die relatiewe kostes van die prosesse is soos volg<sup>20</sup>: Si-materiaal: 9,6%; kristalgroei: 18,2%; skyfprosessering: 18,2%; selvervaardiging: 24,0% en modulevervaardiging: 30,0%.

Ten spyte van al die navorsingsprogramme in die wêreld, is dit onwaarskynlik dat die koste ooit laer as \$2,00 per watt sal kan wees. Die energiewinstyd (tyd benodig om die energie wat in die vervaardiging van die sel gebruik is, te herwin) is ook lank: tussen vyf en sewe jaar.<sup>22</sup> Die produksieprosesse gebruik groot hoeveelhede water en die afvalwater is besoedel, veral deur swaarmetaal-ione. Hierdie besoedeling kan problematies raak met grootskaalse produksie. Si is aanvanklik vir PV gebruik aangesien die tegnologie goed bekend was uit die mikro-elektronika-industrie en verder vorm uitkotskywe uit dié industrie tans die vernaamste bron van materiaal vir die PV-industrie. Alhoewel Si-sonselle tans meer as 80% van die wêreldmark beslaan, is dit duidelik nie die ideale alternatiewe bron van elektrisiteit nie. Dit sal waarskynlik nog vir die volgende paar jaar die mark oorheers tot tyd en wyl die dunlagie-tegnologieë ten volle ontwikkel is.

### SONSELLE UIT III-V VERBINDINGS

Materiale gevorm uit verbindings tussen die Groep III-elemente (Al, Ga en In) en die Groep V-elemente (P, As en Sb) het besonder veelsydige eienskappe. Bandgapings van 0,16 eV (InSb) tot 2,24 eV (GaP) kan verkry word. Dit is verder moontlik om 'n kombinasie van allooie van die elemente saam te voeg en selle met 'n tandemstruktuur te vervaardig wat groot gedeeltes van die son se spektrum kan benut.<sup>23</sup> 'n GaAs/GaSb-tandemsel lewer 'n doeltreffendheid van meer as 35%. Die selle is verder baie stabiel en bestand teen stralingskade en is dus geskik vir gebruik in die buitenste ruimte. Daar word geweldig baie navorsing en ontwikkeling gedoen op die III-V verbindings, maar die koste van die selle is baie hoog. Vanweë dié hoë koste sal dit nooit 'n rol kan speel vir grootskaalse aardse toepassings nie en sal dus nie hier verder beskou word nie.

### DUNLAGIESONSELLE

Dunlagiesonselle verwys na die tegnologie waar dun sonselle ( $\pm 1 \mu\text{m}$  dik) direk op grootoppervlakte-substrate vervaardig word. Dit skakel dus die kristalgroei- en skyfprosessering van die Si-tegnologie uit en die materiaalverbruik is baie laag. Dit het die voordeel dat grootoppervlakte-selle vervaardig kan word en massaproduksie is moontlik met opskaling van die proses. Dieonsel en module word verder soms in een stap vervaardig. Van die vele moontlike kandidate is amorfe silikon, CdTe en CIS tans die belangrikste.<sup>24</sup>

### Amorfe silikon, $\alpha$ -Si:H

Amorfe silikon ( $\alpha$ -Si) is Si in 'n amorfe of mikro-kristallyne vorm. Dit het 'n bandgaping van 1,7 eV en het 'n hoë absorpsiekoëffisiënt wat dit moontlik maak om al die sonlig in 'n lagie van 1  $\mu\text{m}$  dik te absorbeer.<sup>25</sup> Die bandgaping kan gevarieer word deur 'n allooi van SiC of SiGe te gebruik en dit is dus moontlik om 'n tandem-selstruktuur te vervaardig wat 'n groter deel van die son se spektrum kan benut. Vanweë die amorfe struktuur is daar egter baie ongewenste toestande in die bandgaping wat herkombinasie veroorsaak, maar hierdie toestande kan met waterstof gepasifiseer word. Dieonsel-materiaal bevat tussen 5 en 20% waterstof en staan dan bekend as  $\alpha$ -Si:H.

Vanweë die hoë konsentrasie defekte in p-tipe en n-tipe materiaal, is dit nie moontlik om 'n gewone p-n-struktuur soos getoon in figuur 2 te gebruik nie. Dieonsel bestaan uit 'n p-i-n-struktuur, waar die p- en n-lagies baie dun is met 'n intrinsieke i-lagie tussenin. Die p- en n-lagies skep die elektriese veld en die absorpsie en draer-opwekking vind hoofsaaklik in die i-lagie plaas. Die beweging van ladings word benewens diffusie ook aangehelp deur die elektriese veld in die i-lagie. Vanweë onvermydelike rekombinasie deur defekte in die amorfe struktuur, is die doeltreffendheid van  $\alpha$ -Si:H-sonselle laer as dié van kristallyne Si.

$\alpha$ -Si:H word berei deur RF-gasontlading van  $\text{SiH}_4$  by 'n druk van 0,1 torr en 'n substraattemperatuur van 200 °C. Die konvensionele struktuur (van voor af) bestaan uit 'n glas-substraat met 'n deursigtige geleidende oksied (TCO):  $\text{SnO}_2/\text{In}_2\text{O}_3$  (ITO) of ZnO. Die p-i-n  $\alpha$ -Si:H-struktuur word met RF-gasontlading daarop aangebring deur 'n klein hoeveelheid  $\text{B}_2\text{H}_3$  of  $\text{PH}_3$  by die  $\text{SiH}_4$  gas te voeg. Aluminium of silwer word as rugkontakmetaal opgedamp. Tandemselles met verskillende bandgapings kan vervaardig word in 'n kontinue proses. Die beste huidige sel op laboratoriumskaal bestaan uit drie tandemselles: Glas//ITO// $\alpha$ -SiC:H// $\alpha$ -Si:H// $\alpha$ -SiGe://ZnO//Ag//vlekvrystaal.<sup>26</sup> 'n Doeltreffendheid van 14% word bereik, maar hierdie waarde daal drasties met opskaling en degradering tot ongeveer 8%. Die rede vir die aanvanklike degradering van  $\alpha$ -Si:H-sonselle word tans nog nie verstaan nie, maar dit stabiliseer en die vervaardigers spesifiseer dan die gestabiliseerde doeltreffendheid. Hierdie selle is ideaal vir gebruik in fasades van geboue en op woningdakke, aangesien dit in enige verlangde vorm berei kan word.<sup>27</sup> Dit kan selfs op buigbare polimeer-substrate berei word wat die selle feitlik onbreekbaar maak.<sup>28</sup>

$\alpha$ -Si:H-sonselle beslaan reeds 12% van die wêreldmark, maar tans is die prys ongeveer dieselfde as vir kristallyne-Si-sonselle. 'n Probleem is die lae doeltreffendheid van kommersiële  $\alpha$ -Si-selle: 4 tot 8%. Die lae materiaal koste kompenseer egter hiervoor. Die lae temperatuurprosesse lei verder daartoe dat die energiewinstyd slegs enkele maande is en die tegnologie lewer geen skadelike afvalprodukte nie. Daar is egter baie moontlikhede vir verdere innovasie<sup>29</sup> en  $\alpha$ -Si:H word tans beskou as die mees belowende kandidaat vir die grootskaalse gebruik van elektrisiteitsopwekking.

### Kadmiumtelluried, CdTe

Die bandgaping van CdTe is 1,45 eV en dit het 'n direkte bandgaping (geen momentum betrokke by draeropwekking nie), hoë absorpsiekoëffisiënt en is ideaal vir dunlagiesonselle. Die sel bestaan (van voor af) uit glas met 'n TCO-lagie, n-tipe CdS-lagie, p-tipe CdTe-lagie, 'n  $p^{++}$  ZnTe-lagie en 'n metaal of grafiel agterste elektrode.<sup>30</sup> Dit kan redelik maklik berei word: Die TCO word met vakuüm-opdamping op die glas aangebring

en die lagie CdS met 'n chemiese neerslagproses. Die CdTe kan op verskeie maniere aangebring word: sproei-pirolise, elektroplatering, sublimasie of skermdruk. CdCl<sub>2</sub> en hittebehandeling veroorsaak die rekristallasie van die CdTe. 'n Doeltreffendheid van 17% word met CdTe-selle bereik.<sup>31</sup> Dit word reeds kommersieel vervaardig met 'n produksie van 1,2 MW in 1997. Die doeltreffendheid van die kommersiële selle is ongeveer 12%.

CdTe-sonselle is oënskynlik die ideale dunlagiesonsel aangesien dit met eenvoudige prosesse goedkoop berei kan word. Dit het egter een belangrike nadeel: Cd is toksies. Die gevaar vir die omgewing is nie werklik groot nie, maar aangesien PV juis 'n omgewingsvriendelike vorm van energie moet wees, is dit onwaarskynlik of CdTe-sonselle vir grootskaalse gebruik deur die publiek aanvaar sal word.

### Koper-Indiumdiselenied, CIS

CuInSe<sub>2</sub> (CIS) en ander verwante chalcopriet halfgeleiers het 'n direkte bandgaping en 'n hoë absorpsiekoëffisiënt. Die materiaal is 'n pseudo-binêre sisteem (Cu<sub>2</sub>Se)<sub>x</sub>(In<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>)<sub>1-x</sub>. Vir  $x > 0,5$  kom verskeie sekondêre fases voor en aangesien Cu<sub>2</sub>Se hoogs geleidend is, moet die materiaal effens In-ryk wees vir fotovoltaiiese toepassings.<sup>32</sup> Die bandgaping van CIS is 1,0 eV, maar deur dit te meng met CuGaSe<sub>2</sub> (CIGS) of CuInS<sub>2</sub> kan bandgapings tussen 1 en 2,4 eV verkry word. Die materiaal kan beide p-tipe of n-tipe wees, afhangende van die samestelling en defekte. Cu-ryk lagies is p-tipe terwyl Se-arm lagies n-tipe is. Die oppervlak kan ook van teenoorgestelde tipe wees as die res van die materiaal wat die daarstelling van 'n p-n-voegvlak in dieselfde materiaal sonder wanpassings moontlik maak. Alhoewel die materiaal baie kompleks is, word dit goed verstaan en die eienskappe kan beheer word.

CIS word berei deur vakuüm-opdamping van Cu en In in 'n Se-atmosfeer gevolg deur selenisering in Se-damp by 600 °C. Die prosesparameters moet streng beheer word.<sup>33</sup> Dit kan ook berei word deur Cu-In-substrate te seleniseer in H<sub>2</sub>Se by 400 °C, maar weer eens moet die prosesparameters streng beheer word.<sup>34</sup> Ander bereidingsmetodes soos chemiese neerslag word ook nagevors, maar tans sonder veel sukses.

'n CIS-sonsel word as volg vervaardig<sup>34</sup>: 'n lagie Mo word op sodaglas opgedamp met elektronbundel-opdamping. Die CIS-lagie (1 μm) word op die Mo gegroei. 'n Dun lagie CdS (50 nm) word met 'n chemiese neerslagproses op die CIS aangebring gevolg deur 'n i-lagie en n<sup>+</sup>-lagie ZnO (0,5 μm) wat met verstuiwing aangebring word. 'n Ni-vingerpatroon vir die voorste kontakte en anti-refleksielaag word dan aangebring. 'n Doeltreffendheid van 17% word reeds met hierdie dunlagieselle verkry.

Navorsing word gedoen om die materiaal verder te optimeer en die proses te vereenvoudig. Die Na in die sodaglas help met die kristallasie van die CIS. Die CdS-lagie dien as buffer vir die wanpas tussen die CIS en ZnO en daar word probeer om weg te doen met dié CdS-lagie. Die allooie met Ga en S word ook verder ondersoek. Daar is reeds begin met kommersiële produksie en vanweë die hoë doeltreffendheid en lae koste van CIS-sonselle kan dit 'n sterk mededinger word vir huidige Si-sonselle.

### Nano-kristallyne selle

Hierdie dunlagieselle se werking is totaal verskillend van al die ander halfgeleierselle. In wese behels dit 'n nabootsing van die natuurlike proses van fotosintese.<sup>35</sup> Die sel bestaan uit twee glasplate, elk bedek met 'n lagie geleidende SnO<sub>2</sub>. Op die onderste plaat word 'n lagie kolloïdale TiO<sub>2</sub> van 10 μm

aangebring. Die TiO<sub>2</sub> (partikelgrootte 15 nm) word bedek met 'n monolaag organiese sensitiseerder met 'n raar-aard-element (osmium). 'n Laag elektroliet (jodium) is tussen die TiO<sub>2</sub> en boonste glasplaat met SnO<sub>2</sub>.

Invallende lig wek elektrone in die sensitiseerder op wat oorgedra word na die geleidingsband van die TiO<sub>2</sub>, en na die SnO<sub>2</sub> wat as (negatiewe) eksterne kontak optree. Die elektrone vloei deur 'n eksterne las na die boonste (positiewe) SnO<sub>2</sub>-kontak waar dit met 'n redoks-reaksie tussen die I en I<sup>+</sup> ioon die positiewe lading op die TiO<sub>2</sub> neutraliseer om die elektriese kring te voltooi. Daar is geen minderheidsdraers in die werking van die sel betrokke nie.

Die oopbaanspanning van die sel is ongeveer 0,7 V en aangesien sensitiseerders ontwerp kan word wat oor 'n wye energiegebied aktief is, is hoë doeltreffendhede in beginsel moontlik. Prototipes het reeds 'n doeltreffendheid van meer as 10% getoon.<sup>36</sup> Die selkonstruksie is egter redelik kompleks en is nog in die ontwikkelings stadium. Dit mag egter in die toekoms 'n rol speel, veral aangesien die koste van die sel baie laag is.<sup>34</sup>

### Dunlagie polikristallyne Si

Hierdie tipe selle is, wat werking betref, dieselfde as konvensionele polikristallyne-Si-sonselle, maar dit word berei in die vorm van 'n dunner laag (50 μm) op 'n substraat.<sup>37</sup> Vlekvry staal, grafiet of keramiek word as substrate gebruik. Die tegnologie is feitlik identies aan dié van α-Si:H, maar die proses geskied by 'n hoër temperatuur. Die Si word neergeslaan deur SiH<sub>4</sub> onder 'n druk van 1 torr by 700 °C oor die substraat te stuur (CVD). Doring geskied net soos in die geval van α-Si:H en 'n antirefleksie laag en metaalvingerpatroon word op die sel aangebring. 'n Doeltreffendheid van 11% word reeds verkry. Kommersiële selle is reeds beskikbaar en die produksie in 1997 was 500 kW. Die tegnologie is tans nog in die ontwikkelings stadium, maar saam met α-Si:H is dit een van die belowendste materiale vir grootskaalse produksie van sonselle.

### Ander dunlagiesonselle

Daar is 'n groot aantal ander materiale wat tans ondersoek word vir die vervaardiging van dunlagiesonselle. Die moontlikheid van 'n tegnologiese deurbraak met nuwe dunlagiemateriale is geensins uitgesluit nie en so 'n wetenskaplike deurbraak kan 'n groot omwenteling in die energiebedryf veroorsaak.<sup>31</sup>

### TOEKOMS VAN PV-ELEKTRISITEIT

Ongeveer 1 GW PV-installasies bestaan reeds in die wêreld.<sup>38</sup> Die produksie het die afgelope dekade bestendig gegroei teen ongeveer 13% per jaar, maar in 1997 was daar 'n 43% toename: vanaf 89 MW in 1996 na 127 MW in 1997. Die produksie in 1997 het bestaan uit 50% kristallyne Si, 34% polikristallyne Si, 12% amorfie Si en die ander tegnologieë 4%. Die VSA het met agt maatskappye 42% van die produksie gelewer, Japan met 9 maatskappye 28%, Europa met 13 maatskappye 23%, Indië met 4 maatskappye 4% en die res van die wêreld 3%. By die Europese PV-konferensie in 1997 was 63 lande verteenwoordig met 1 200 afgevaardigdes. PV is dus 'n baie aktiewe navorsingsveld en aangesien geen enkel wen-tegnologie tans geïdentifiseer kan word nie, sal navorsing en ontwikkeling aktief voortgaan.

Die European Commission het 'n program geloods om teen 2010 500 000 dakstelsels vir huishoudings te installeer met 'n vermoë van 3,7 GW<sup>3</sup>. Dit verteenwoordig 10 watt per kapita en sal 90 000 nuwe werkgeleenthede skep. Japan se 70 000

dakprogram beset reeds hul produksiefasiliteite ten volle, terwyl die VSA in 1997 sy een miljoen dakprogram met 'n produksie van 1,5 GW per jaar teen 2010 aangekondig het.<sup>39</sup> Ondersoeke het getoon dat meer as 70% van die algemene publiek in Europa PV-energie wil hê en wetgewing bestaan reeds om die gebruik van fossielbrandstowwe te ontmoedig ten gunste van PV.

Die situasie in Derdewêreldlande is effens anders. In meeste gevalle het die voordele van die industriële revolusie dié mense nog nie bereik nie en hul verwagtinge is steeds daarop gerig. Aangesien dit in elk geval nie haalbaar is om netwerk-elektrisiteit aan alle gemeenskappe te voorsien nie, is die aangewese scenario om die energiebronne van die industriële revolusie verby te gaan en direk oor te gaan na die energiebronne van die volgende millennium: hernubare energiebronne en PV.

Die gelokaliseerde aard van PV lei daartoe dat daar wegbeweeg moet word van die tradisionele denkpatroon van gesentraliseerde elektrisiteitsvoorsiening met 'n distribusienetwerk na gedesentraliseerde energiebronne onder lokale beheer. Die elektrisiteitsmark in Europa en die VSA is in elk geval tans besig om 'n transformasie te ondergaan: daar word wegbeweeg van gesentraliseerde, monopolistiese netwerke na gedesentraliseerde kliënt-georiënteerde voorsiening. Dit beteken dat groot fossielkragstasies en kernkragstasies van die toneel gaan verdwyn om plek te maak vir kleiner eenhede. Die kliënt sal sy elektrisiteit dan op die vry mark verkry. Hierdie filosofie van desentralisasie van energie is juis een van die kenmerke van PV.

Fotovoltaïese elektrisiteitsopwekking sal die lewenstandaard van Derdewêreldgemeenskappe verhoog en die skade aan die omgewing in Eerstewêreldgemeenskappe verminder. Lokale elektrisiteitsvoorsiening sal die migrasie na stede verminder deur lokale werkseleenthede te skep en so help met die oplossing van sosiologiese probleme soos armoede en verstedeliking. PV is dus 'n veld waar die wetenskap en tegnologie 'n hydrae kan maak tot die verbetering van die lewenskwaliteit van die mens in harmonie met sy omgewing.

## SUMMARY

Present technological societies are dependant on energy which comes mainly from fossil fuels as the primary source. There is, however, concern about the influence of the emissions of fossil fuels on the environment. Many third world communities on the other hand still do not have access to grid electricity. Photovoltaics is a technology that generates electricity directly from the sun with solar cells. This source of energy is unlimited, free, has no detrimental environmental impact and does not require a grid for distribution. It is a solution for many socio-economic problems of both first- and third-world communities. The biggest problem for the large-scale introduction of PV is, however, the present high cost of PV cells (about \$4 per watt). Science and technology are addressing this problem.

Crystalline silicon solar cells are currently dominating the market and the technology has almost been perfected with cells yielding 24% efficiencies. Very pure single crystal wafers similar to those required for the semiconductor industry are used. A p-n junction is fabricated in the wafer and metal contacts on the front and back collect the charges generated by the incident photons. Only photons that match the energy gap of silicon can be utilised, which limits the theoretical efficiency to less than 40%. Recombination of excited carriers and series resistance cause a further drop in the efficiency. Research is directed towards increasing the efficiency by using novel types of metal

contacts and light trapping techniques. The processing is being modified to reduce the production cost, but it is inherently expensive and energy intensive. Apart from increasing production output of a plant, no substantial reductions in cost are possible due to material requirements.

Poly-crystalline solar cells employ almost the same technology as crystalline silicon, but the wafers are obtained from poly-crystalline ingots instead of single crystal wafers. Substantial cost reductions are possible, but the efficiencies of these cells are lower than those of crystalline solar cells. Several technologies to grow good quality poly-crystalline silicon are being investigated.

More recent research efforts are focussing on thin film technologies where thin layers of semiconductor materials are deposited directly on large-area substrates. These technologies have the potential for upscaling, mass production and large cost reductions. Presently three thin film materials are receiving much attention: amorphous silicon, cadmium telluride and copper-indium diselenide.

Amorphous silicon is prepared by gas discharge of silane at low pressure and at a temperature of 200 °C. It can be deposited as a thin film on various types of substrates. The material contains a large concentration of defects, but it can be reduced by the addition of hydrogen to the film. The cells consist of a glass plate with a transparent conductive oxide as upper electrode and a p-i-n structure of amorphous silicon. A metal film of silver or aluminium forms the other electrode. The efficiencies of amorphous silicon solar modules are low (4 – 8%) and they also degrade initially. These problems are being addressed and commercial cells are already available.

Cadmium telluride has excellent material properties for solar cell devices and it can easily be deposited on large area substrates. The efficiency of these cells can be as high as 17%, but commercial modules have efficiencies of about 12%. Cadmium telluride unfortunately has the disadvantage that cadmium is a toxic substance and there may be consumer resistance to the use of these cells on a large scale.

Copper-indium diselenide (CIS) is a fairly complicated material and the composition must be accurately controlled to yield good quality PV material. It is prepared by thermal evaporation of Cu, In and Se at 600 °C or an alloy of Cu-In can be selenized in H<sub>2</sub>Se. The cell consists of a glass base, molybdenum metal film, CIS, CdS, ZnO and Ni contacts. These cells yield efficiencies of 17% and CIS is a very promising candidate for large scale generation of electricity.

Several other materials are being investigated for thin film solar cells. A nano-crystalline cell employs a sensitised organic dye containing a rare earth metal. The dye is embedded in a film of TiO<sub>2</sub> and an iodine solution acts as electrolyte to complete the electric circuit. These cells are complicated but show good potential. Another candidate is thin film silicon where a thin film of poly-crystalline silicon is deposited on large area substrates. Both these types of cells are subjects of active research.

There is already about 1 GW PV power installed in the world. The rate of growth in PV module production is increasing and the growth from 1996/97 was 43%. Europe, Japan and the USA have active programmes to introduce PV in favour of fossil fuels. The future of large scale introduction of PV electricity will however be mainly determined by the ability of scientists to produce materials and cell technologies that are economically viable.

## LITERATUURVERWYSINGS

1. Palz, W. (1992). Power for the world: a global photovoltaic action

- plan, *Proc. 12th Euro. PV Solar Energy Conf.*, 2086-2088.
2. Green, M.A. (1992). *Solar cells* (University of New South Wales, Sydney).
  3. Palz, W. (1997). Solar power for Europe, *Proc. 14th European PV Solar Energy Conf.*, 1-4.
  4. Chapin, D.M., Fuller, C.S., Pearson, G.L. (1954). A new silicon p-n junction photocell for converting solar radiation into electrical power, *J. Appl. Phys.*, 25, 676-677.
  5. Green, M.A. (1995). *Silicon solar cells* (University of New South Wales, Sydney).
  6. Willeke, G., Nussbaumer, H., Bender, H., Bucher, E. (1992). A simple and effective light trapping technique for polycrystalline silicon solar cells, *Sol. Energy Mat. and Sol. Cells*, 26, 345-356.
  7. King, D.L., Buck, M.E. (1991). Experimental optimization of an anisotropic etching process for random texturing of silicon solar cells, *Proc. 22nd IEEE PV Spec. Conf.*, 303-308.
  8. Bruton, T.M. *et al.* (1997). A study of the manufacture at 500 MWp p.a. of crystalline silicon photovoltaic modules, *Proc. 14th European PV Solar Energy Conf.*, 11-16.
  9. Ourmazd, A., Schroter, W. (1984). Phosphorous gettering and intrinsic gettering of nickel in silicon, *Appl. Phys. Lett.*, 45, 781.
  10. Wenham, S.R. (1993). Buried-contact solar cells, *Progress in PV*, 1, 3-10.
  11. Wenham, S.R., Green, M.A. (1996). Silicon solar cells, *Progress in PV*, 4, 3-33.
  12. Nijs, J. *et al.* (1994). Latest efficiency results with screen printing technology and comparison with the buried contact structure, *Conf. Record of 1st World Conf. on PV Energy Conversion*, 1242-1249.
  13. Verhoef, L. *et al.* (1988). Improved bulk emitter quality by back-side aluminium doping and annealing of polycrystalline silicon solar cells, *Proc. 20th IEEE PV Specialists' Conf.*, 1551-1556.
  14. Lolgen, P. *et al.* (1993). Aluminium back-surface field doping profiles with surface recombination velocities below 200 cm/s, *Proc. 23rd IEEE PV Specialists' Conf.*, 236-242.
  15. Wenham, S.R., Honsberg, C.B., Green, M.A. (1994). Buried contact solar cells, *Sol. Energy Mat. and Sol. Cells*, 34, 101-110.
  16. Ghannam, M. *et al.* (1992). Two dimensional study of alternative back surface passivation methods for high efficiency silicon solar cells, *Proc. 11th European PV Solar Energy Conf.*, 45-48.
  17. Kardouskas, M. (1996). Processing of large-area silicon substrates with high defect densities into higher efficiency solar cells, *Proc. 6th Workshop Role of Impurities and Defects in Silicon Device Processing*, 172-176.
  18. Watanabe, H. (1993). Overview of cast multicrystalline solar cells, *MRS Bulletin, October 1993*, 29-37.
  19. Tiedje, T. *et al.* (1984). Limiting efficiency of silicon solar cells, *IEEE Trans. Electron Devices*, 31, 711-716.
  20. Szlufcik, J. *et al.* (1997). Low cost industrial technologies of crystalline silicon solar cells, *Proc. of the IEEE*, 85, 711-730.
  21. Zhao, J. *et al.* (1996). 24% efficient PERL silicon solar cell: Recent improvement in high efficiency silicon cell research, *Sol. Energy Mat. and Sol. Cells*, 41/42, 87-99.
  22. Hagedorn, G. (1989). Hidden energy in solar cells and photovoltaic power stations, *Proc. 9th Euro. PVSEC*, 542-545.
  23. Fraas, L.M. (1993). III-V materials for photovoltaic applications, *MRS Bulletin, October 1993*, 48-50.
  24. Schock, H.W., Shah, A. (1997). Status and prospects of photovoltaic thin film technologies, *Proc. 14th European PV Solar Energy Conf.*, 2000-2005.
  25. Takahashi, K., Konagai, M. (1986). *Amorphous silicon solar cells* (North Oxford, London).
  26. Guha, S. *et al.* (1996). Advances in amorphous silicon alloy photovoltaic technology, *Proc. 25th IEEE PV Specialists' Conf.*, 2679-2682.
  27. Frammelsberger, P. *et al.* (1997). Production issues and performance of large-area a-Si based solar modules, *Proc. 14th European PV Solar Energy Conf.*, 2006-2011.
  28. Saunderson, J.D., Swanepoel, R. (1998). The influence of metal contacts and ZnO buffer-layer on the low temperature crystallization of a-Si:H in flexible solar cells, *Sol. Energy Mat. and Sol. Cells*, 53, 329-332.
  29. Privato, C. *et al.* (1997). Low cost manufacturing technology of large area, single and tandem junctions a-Si modules with high efficiency, *Proc. 14th European PV Solar Energy Conf.*, 562-565.
  30. Suntola, T. (1993). CdTe thin film solar cells, *MRS Bulletin, October 1993*, 45-47.
  31. Bonnet, D. (1997). Status of CdTe solar cells, *Proc. 14th European PV Solar Energy Conf.*, 2688-2693.
  32. Schock, H.W. (1993). CuInSe<sub>2</sub> and other chalcopyrite-based solar cells, *MRS Bulletin, October 1993*, 42-44.
  33. Powalla, M., Voorwinden, G., Dimmler, B. (1997). Continuous Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> deposition with improved process control, *Proc. 14th European PV Solar Energy Conf.*, 1270-1273.
  34. Alberts, V., Swanepoel, R., Witcomb, M.J. (1998). Material properties of CuInSe<sub>2</sub> prepared by H<sub>2</sub>Se treatment of CuIn alloys, *Journal of Material Science*, 33, 2919-2925.
  35. Grätzel, M. (1993). Nanocrystalline thin film PV cells, *MRS Bulletin, October 1993*, 61-64.
  36. Lauerma, I. *et al.* (1997). Dye sensitized solar cells: stability, efficiency and upscaling, *Proc. 14th European PV Solar Energy Conf.*, 976-979.
  37. Bergmann, R.B. *et al.* (1996). Crystalline silicon films by chemical vapour deposition on glass for thin film solar cells, *Proc. 25th IEEE PV Specialists' Conf.*, 365-370.
  38. *The Solar Letter, February 13, 1998*, (1998) 52-53.
  39. Rannels, J.E., King, R. (1997). The U.S. Department of Energy photovoltaic program, *Proc. 14th European PV Solar Energy Conf.*, 441-443.