

1 Inleiding

De omzetting van zonlicht naar elektriciteit gebeurt bij fotovoltaïsche conversie met zonnecellen. Deze cellen zijn gemaakt uit halfgeleidermateriaal waarbij silicium het meest voorkomende is. Silicium was ook het eerste materiaal waarmee geëxperimenteerd werd. Daarnaast worden Gallium Arsenide (GaAs), Cadmium Telluride (CdTe) en Coper-Indium-Diselenide (CuInSe₂) veel toegepast.

Naargelang de kristalsoort kan het onderscheidt worden gemaakt in drie typen zonnecellen: monokristallijne, polykristallijne en amorf cellen. Indien de onderverdeling gemaakt wordt naar technologische procedures kunnen zonnecellen worden onderverdeeld in silicium zonnecellen en dunne film zonnecellen. Indien voorgaande groepen worden samengenomen kan volgende onderverdeling worden gemaakt:

- Monokristallijn silicium,
- Polykristallijn silicium,
- Dunne film technologie.
 - Cadmium telluride,
 - Gallium arsenide,
 - Amorf silicium.

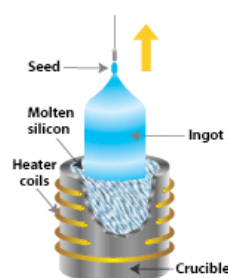
Het uiteindelijke zonnepaneel wordt samengesteld uit verschillende zonnecellen. Dit artikel handelt specifiek over de verschillende soorten zonnecellen waarbij de eigenschappen en rendementen van de verschillende soorten naast elkaar worden gelegd. Eerst wordt het basismateriaal besproken waarna de rendementen worden bekeken.

2 Celtypes

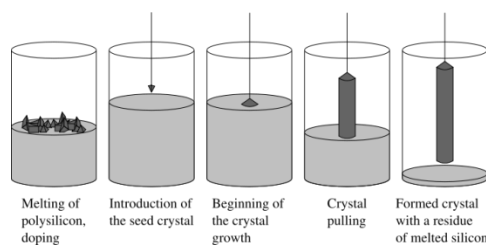
2.1 Monokristallijn silicium cellen

Monokristallijn silicium cellen zijn de meest beschikbare types zonnecellen en zijn duurder dan polykristallijne cellen. Om silicium in een monokristallijne toestand te verkrijgen moet eerst silicium met hoge zuiverheidsgraad gesmolten worden. Het vervaardigen van monokristallijn silicium kan door middel van de Czochralski methode gebeuren.

Als eerste stap wordt het zuiver silicium gesmolten. Daarna wordt het opnieuw gevormd door een monokristallijn zaadje in de smelt te brengen. Het silicium neemt het patroon aan van het kristal terwijl het geleidelijk aan stolt. De staaf die ontstaat wordt geleidelijk aan uit de smelt getrokken. Op deze manier groeit dit kristal tot een welbepaalde diameter. Dit is een methode om kristallen te doen groeien door ze omhoog te trekken vanuit een smelt.



Figuur 1: Czochralski methode



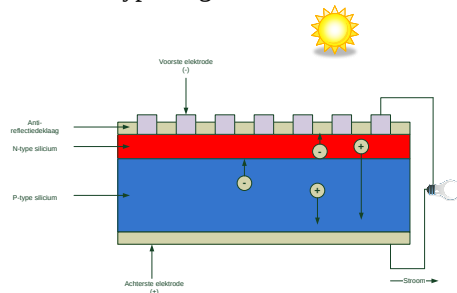
Figuur 2: Czochralski methode stappen

Een andere methode is de Float-Zone methode. Dit proces zorgt voor een zuiverdere kristalvorming dan het Czochralski proces omdat de kristallen niet besmet worden met de smeltkroes (crucible). In dit proces wordt een siliciumstaaf bovenop een kristalzaad geplaatst en dan doorheen een elektromagnetische kern geleid. Het magnetisch veld induceert een elektrisch veld in de staaf waardoor het gaat smelten. Op het scheidingsvlak tussen staaf en zaad ontstaan monokristallen. Deze breiden zich verder uit naarmate de spoel zich verder omhoog beweegt.

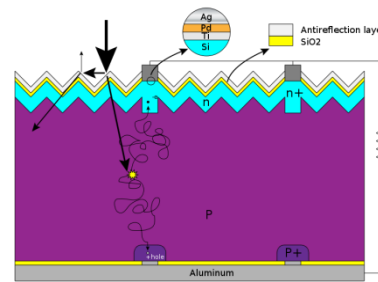
De verkregen staaf wordt verzaagd tot schijven die typisch zo'n 200 à 400 µm dik zijn. Het zagen geeft een verlies van ongeveer 20%. Om deze reden wordt aan de zaagdraad grote eisen gesteld en kan de draad slechts

eenmalig gebruikt worden. Na het zagen wordt de schijf gepolierd en geëet teneinde fouten door het zagen weg te werken. Uiteindelijk wordt een p-type siliciumschijf verkregen die ongeveer 250 μm dik is.

Nu kan de eigenlijke zonnecel worden gemaakt door het doperen van verschillende materialen op de schijf waaronder een n-type laag en reflectoren.



Figuur 3: vereenvoudigde voorstelling zonnecel



Figuur 4: elektronenbeweging in een cel

Het is de bedoeling dat de zonnestrallen (fotonen) ongehinderd in het silicium kunnen invallen. Om deze reden bestaat de bovenste elektrode uit een rastervormige structuur van dunne baantjes opgedampt metaal. De onderste elektrode zorgt voor reflecterende eigenschappen van de cel. Zonder deze laag zouden de fotonen niet worden teruggekaatst maar worden ze geabsorbeerd door de onderste elektrode. Het gevolg hiervan is dat de cel wordt opgewarmd en het rendement daalt. Daarnaast zal de hoge opwarming de levensduur van de cel verlagen.

De afzonderlijke cellen worden uitgemeten en geselecteerd. De metalen strips worden aangebracht en op een glasplaat worden tientallen cellen samengebracht en in serie of parallel geschakeld. Hierboven komt opnieuw een glasplaat. Beide worden waterdicht verbonden. Het resultaat is een paneel van ongeveer 1 m^2 .



Figuur 5: monokristallijn PV-paneel



Figuur 6: monokristallijn siliciumcel

2.2 Polykristallijn siliciumcellen

Monokristallijne cellen zijn duur om op grote schaal toe te passen. Om deze reden zijn cellen ontwikkeld uit polykristallijn silicium. Polykristallijne cellen bestaan uit vele afzonderlijke kristalkorrels over de volledige dikte van de siliciumschijf. De korrelgrootte varieert van 1 tot 100 μm .

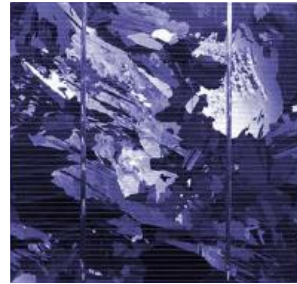
In het productieproces kunnen twee methodes onderscheiden worden. Een eerste is het vloeibaar silicium in blokken gieten en geleidelijk laten stollen. Dit resulteert in een vierkante blok die op zijn beurt in schijven wordt gezaagd. De verdere fabricage is gelijkaardig aan deze van de mono-cellen, alleen is een extra waterstofbehandeling nodig voor het passiveren van de korrelgrenzen. Bij de stolling van het materiaal vormen zich kristalstructuren van verschillende grootte, waarbij aan de grensvlakken defecten optreden. Door deze kristaldefecten is het rendement van de zonnecel lager. Anders dan bij monokristallijn materiaal kunnen van polykristallen rechthoekige zonnecellen gemaakt worden. Het voordeel hiervan is dat het zonnepaneel beter bedekt wordt waardoor het rendementsverlies door de kristaldefecten deels wordt gecompenseerd.

Daar er bij het verzagen van de elementen veel materiaalverlies optreedt is het eveneens mogelijk om silicium te laten stollen tot linten in plaats van blokken. Bij de edge-defined film fed growth techniek wordt het gesmolten

silicium door een mal geleid waardoor linten ontstaan. Via deze methode is minder materiaal vereist en zijn de verliezen lager dan bij het verzagen.



Figuur 7: paneel met polykristallijne cellen

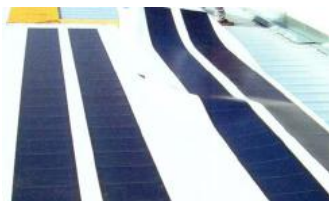


Figuur 8: polykristallijne cel (detail)

2.3 Amorf Silicium (a-Si)

Bij amorf silicium is de atoomstructuur anders dan bij kristalijn silicium (c-Si). De atomen zijn niet in een bepaalde volgorde geschikt waardoor er geen kristalstructuren worden gevormd en het rendement lager ligt. Deze hebben echter wel enkele economische voordelen die dit materiaal interessant maakt. Deze technologie wordt veel gebruikt voor consumenten elektronica. Amorf Silicium absorbeert straling 40 keer efficiënter dan een monosilicium kristal. Een film van 1 micrometer kan 90% van het licht absorberen die erop invalt. Een ander groot voordeel tegenover c-Si is dat de productietechniek sterk vereenvoudigd kan worden daar het als dunne film kan worden toegepast waar c-Si gesneden wordt uit Wafers. Er is slechts 1% silicium nodig in vergelijking met c-Si.

Amorf silicium panelen kunnen in een aantal vormen worden teruggevonden. Amorf silicium wordt opgedampt waardoor het mogelijk wordt om creatiever om te gaan met mogelijkheden. De meest bekende is in de vorm van klassieke panelen. Daarnaast komen amorf silicium panelen eveneens voor in laminaatvorm en geïntegreerd in gebouwen. Dit is ideaal geschikt voor grote platte daken met weinig draagvermogen.



Figuur 2.9: amorf laminaten



Figuur 2.10: amorf panelen



Figuur 2.11: amorf panelen in vensters

3 Celrendement

Het nominale celrendement is de verhouding tussen het elektrisch vermogen van een cel onder STC (Standard Test Condition) en het product van de irradiatie en het celoppervlak. Bij de opgave van het celrendement moet duidelijk worden gemaakt of het gaat om het actieve oppervlak van de cellen of het totale oppervlak van de module binnen het frame.

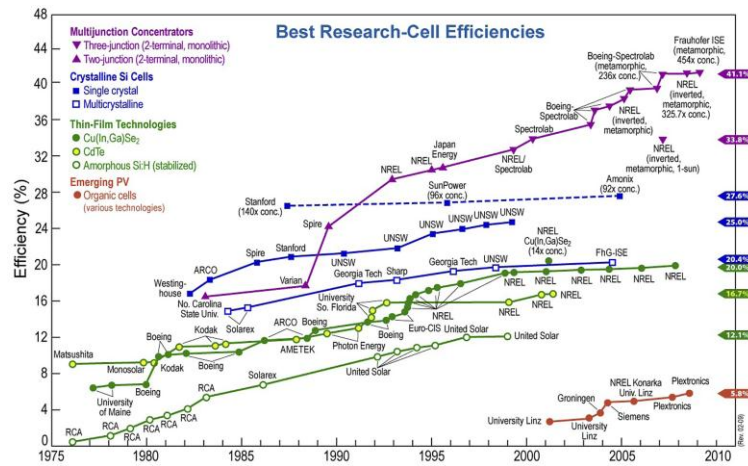
$$\eta_{cel} = \frac{P_{mod, stc}}{G_{cel, stc} * A_{cel}}$$

Met:

- η_{cel} = celrendement
- $P_{mod, stc}$ = geïnstalleerd vermogen van de module onder STC [Wp]
- $G_{cel, stc}$ = irradiatie cel onder STC [W/m²]
- A_{cel} = oppervlakte van de cel [m²]

Het jaargemiddelde rendement is een gewogen gemiddelde over een langere periode waardoor dit lager zal zijn dan het nominaal celrendement.

Figuur 12 geeft een beeld weer van de bekomen celrendementen in labo-omgeving en de onderzoeksinstellingen waar de rendementen werden opgetekend. Hieruit blijkt dat de rendementen de laatste jaren toenemen. Niettegenstaande dat dit in labo-omgeving werd opgetekend kan de verhouding tussen de panelen naar werkelijke omstandigheden gerefereerd worden, zij het met iets lagere rendementen.



Figuur 12: beste celrendementen in labo-opstelling

4 Zonnepanelen en rendementen

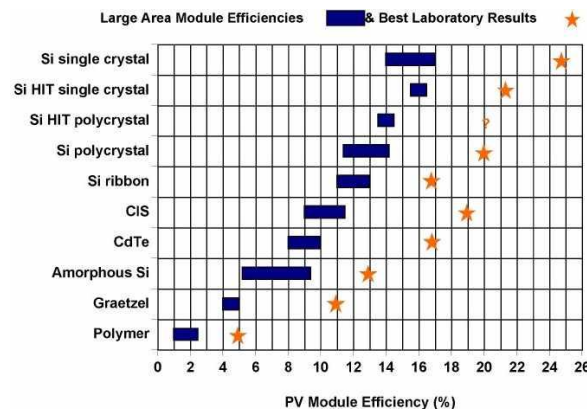
Een zonnepaneel wordt samengesteld uit verschillende zonnecellen. Op deze manier wordt een module verkregen. Dergelijke modules hebben een lager rendement dan de afzonderlijke cellen maar het vermogen dat zij kunnen produceren ligt hoger. De verhouding tussen het elektrisch vermogen van een cel onder STC en het product van de instraling en module-oppervlak geeft het rendement van de module weer. Dit rendement is dus afhankelijk van de hoeveelheid instraling.

Op basis van deze uitdrukking kan het geleverd elektrisch vermogen worden bepaald indien de oppervlakte van de module en de instraling gekend is.

$$\eta_{\text{module}} = \frac{P_{\text{DC}}}{H_i * A_{\text{module}}}$$

Met:

- η_{module} = module-rendement
- P_{DC} = DC vermogen geleverd door de module [W]
- H_i = instralingsdichtheid op de module [W/m²]
- A_{module} = oppervlakte van de module [m²]



Figuur 13: karakteristiek PV-module efficiëntie verschillende technologieën

Indien naar modulerendementen wordt gekeken over de verschillende technologieën heen, kan worden afgeleid dat de bekomen rendementen in werkelijkheid een heel stuk onder deze in labo-omgeving liggen. Algemeen schommelen de rendementen van de huidige technologieën tussen de 8 en 20% zoals blijkt uit Tabel 1 die werd samengesteld uit opgegeven rendementen van verschillende fabrikanten.

Tabel 1: overzicht huidige modulerendementen

Technologie	Productierendementen [%]
Mono kristallijn	14 tot 20
Poly kristallijn	12 tot 15
Amorf silicium	5 tot 10
Multikristallijn silicium	14 tot 16
Koper-indium-selenium	10 tot 12
Dunne-film kristallijn silicium	10 tot 17
Kleurstof-ge sensibiliseerde zonnecellen	11
Organische (polymere) zonnecellen	4

5 Besluit

Zonnepanelen worden vervaardigd door verschillende cellen samen te brengen. Naast het basismateriaal is ook de glasplaat en afwerking van belang. Door het geheel van cel technologie en manier van ontwikkeling wordt uiteindelijk het rendement bepaald. Tabel 2 geeft een overzicht weer van de meest toegepaste technologieën en hun eigenschappen. Indien hogere spanningen of stromen nodig zijn dan beschikbaar van één enkel paneel, dan moeten panelen geschakeld worden in strings en tot slot arrays. De benaming ‘string’ wordt gebruikt voor een serieschakeling van zonnepanelen, terwijl een ‘array’ een parallelschakeling van strings is. Bij de keuze van zonnepanelen is het rendement een van de factoren waar rekening moet mee gehouden worden.

Tabel 2: overzicht meest voorkomende technologieën en hun eigenschappen

Soorten	rendement	kostprijs	kenmerken
monokristalijn silicium	***	***	Hoog rendement
polykristalijn silicium	**	**	Lage kostprijs
amorf silicium(thin film)	*	*	Flexibel toepasbaar, goedkoop

6 Bronnen

J. Desmet, C. Debruyne, J. Vanalme, B. Verhelst, “Implementatie van innovatieve duurzame energiebronnen en hun interactie op het distributienet”, ISBN 9789081549806

<http://www.zonnepanelenvragen.be/de-verschillende-soorten-zonnepanelen-op-een-rijtje/>

http://www.zonnepanelen-installatie.be/soorten_zonnepanelen.php

Auteur: Bart Verhelst

Lemcko – www.lemcko.be