

Rendement PV Cellen ZX ronde van 8 november 2020

In 1839 werd door de Franse natuurkundige Edmond Becquerel het zgn. "fotovoltaïsche" effect ontdekt, waarbij licht wordt omgezet in elektriciteit. Dit effect houdt in dat elektronen door invallend licht wat extra energie krijgen, waardoor een elektrische spanning wordt opgewekt. Het fotovoltaïsche effect treedt op bij halfgeleiders.

Halfgeleiders hebben eigenschappen dat elektronen die door een atoom zijn afgestaan in eerste instantie dicht bij dit atoom blijven . Door nu een bepaalde hoeveelheid energie toe te voegen aan de elektronen, kunnen ze loskomen van het atoom en zich vervolgens vrij gaan bewegen.

Nu kan de stof dus wel elektrische stroom geleiden. Het bijzondere van een halfgeleider is dat deze vrije elektronen hun extra energie kunnen blijven vasthouden. In een zonnecel is de extra energie die de elektronen gekregen hebben een maat voor de spanning (en dus de elektrische energie) die de zonnecel afgeeft. De potentiële energie van een elektron wordt hier gedefinieerd door de energie die aan een elektron moet worden toegevoegd om het vanuit het oneindige in één van de schillen rond de atoomkern te krijgen.

Omdat elektronen zich liever in een atoomschil bevinden dan in het oneindige, is de potentiële energie van elektronen in een stof altijd negatief.

De elektronen die aan hun atoom vastzitten zitten in de valentieband. De term valentieband geeft een bepaald energiebereik aan.

Geven we het elektron wat extra energie, dan kan hij loskomen van zijn atoom en in de geleidingsband komen. Het elektron bevindt zich nu in een energetisch hogere, ofwel aangeslagen toestand. In de valentieband blijft dan een lege plaats achter, een gat genoemd. Een gat is niets anders dan een ontbrekend elektron en kan beschouwd worden als een deeltje met een positieve lading.

Net als elektronen kunnen gaten zich ook door het rooster bewegen: als een elektron van een naburig atoom in een gat springt, verplaatst het gat (en dus de positieve lading) zich in de tegenovergestelde richting.

Tussen de valentie- en geleidingsband zit een gebied van energieën waar geen enkel elektron kan en mag komen, dit is een 'verboden' gebied. De grootte van dit gebied wordt vaak aangeduid met de engelse term 'bandgap' en wordt uitgedrukt in elektronvolt ($1 \text{ eV} = 1,60 \times 10^{-19} \text{ J}$).

De bekendste halfgeleider, silicium, heeft een bandgap van 1,12 eV.



Met licht is het nu mogelijk om elektronen in de geleidingsband te brengen. Licht bestaat uit fotonen met een energie (in Joules) gegeven door:

$$E_{\text{foton}} = \frac{hc}{\lambda}$$

met h de constante van Planck ($6,62 \times 10^{-34} \text{ Js}$), c de lichtsnelheid en λ de golflengte van het licht.

Om nu elektrische energie uit een zonnecel te krijgen moeten de aangeslagen elektronen een uitwendig circuit doorlopen. In dit uitwendige circuit wordt met de energie van de elektronen nuttige arbeid verricht. Om dit te bereiken moeten de aangeslagen elektronen zich dóór de halfgeleider heen naar een elektrisch contact bewegen.

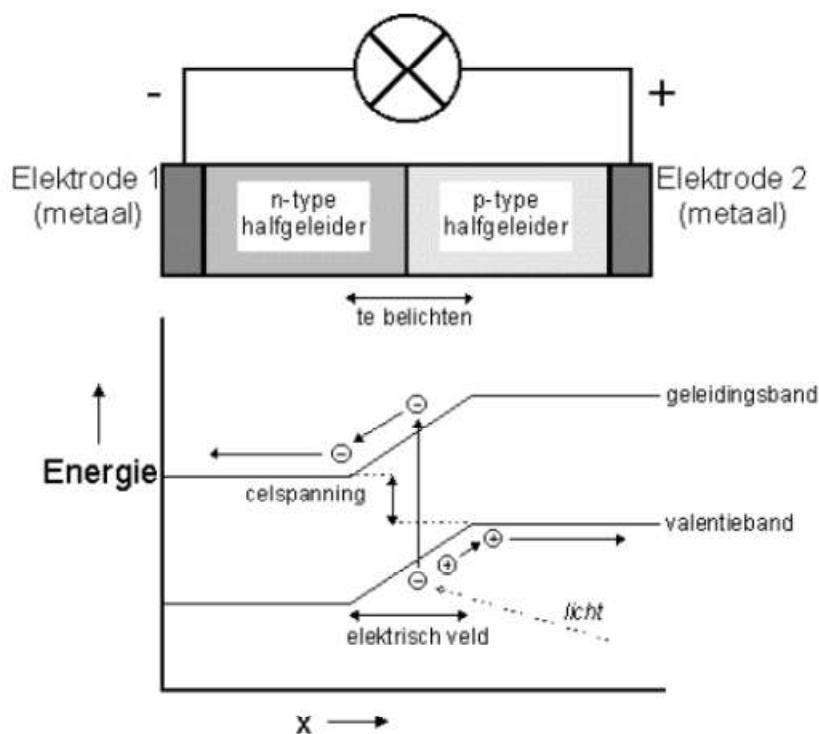
Als het elektron op zijn weg een gat tegenkomt zal het elektron in dit gat blijven zitten, door de tegengestelde lading trekken ze elkaar immers aan. Hierbij verliest het elektron zijn energie, welke wordt omgezet in warmte (ofwel roostertrillingen).

De elektrische energie gaat dus verloren! Het is daarom van belang dat de elektronen en gaten binnenin de zonnecel van elkaar gescheiden worden.

Omdat een elektron en een gat een tegengestelde lading hebben, kunnen we ze van elkaar scheiden door een elektrisch veld aan te leggen. Het te belichten deel van de zonnecel is dan dat deel, waar het elektrisch veld aanwezig is.

In een halfgeleider kan een elektrisch veld worden aangebracht door een p-n *overgang* te maken. Hierbij wordt een zgn. p-type halfgeleider in contact gebracht met een n-type halfgeleider, waardoor in een gebied rondom de grens van deze materialen een elektrisch veld ontstaat.

In figuur 4.2 is aangegeven hoe een zonnecel op basis van een p-n overgang werkt. Hierbij zijn ook de elektroden aangegeven die ervoor zorgen dat je een elektrisch contact met de zonnecel kunt maken.



figuur 4.2 Werking van een p-n type zonnecel.

Een elektron wordt door lichtinval aangeslagen naar de geleidingsband, waar het door het elektrisch veld van het achtergebleven gat wordt gescheiden. In het uitwendige circuit kan het elektron zijn energie kwijttraken, waardoor nuttige arbeid wordt verricht. De celspanning (=potentiaalverschil) kan berekend worden uit het energieverval tussen de

geleidingsband van het n-type materiaal en de valentieband van het p-type materiaal. In het ideale geval zet een zonnecel alle energie van het invallende licht om in elektrische energie.

In de praktijk worden rendementen van maximaal 30% gehaald. Dit zijn dan wel hele dure zonnecellen, die vanwege hun prijs vrijwel alleen in de ruimtevaart worden gebruikt. Zonnecellen voor op het dak en in rekenmachientjes hebben over het algemeen een rendement van 15 tot 20%.

Het rendement van een zonnecel, wordt als volgt gedefinieerd als het quotiënt van de elektrische energie en de energie van het invallend licht, in formulevorm:

$$\eta = \frac{E_{\text{elektrisch}}}{E_{\text{licht}}}$$

De hoeveelheid energie per seconde van het invallend licht (ofwel het vermogen) is gegeven door het aantal fotonen n , dat per seconde binnenvalt maal de energie per foton, dus

$$P_{\text{licht}} = n \frac{hc}{\lambda}$$

Voor het gemak wordt hierbij van monochromatisch licht uitgegaan, d.w.z. licht met maar één bepaalde golflengte. De elektrische energie die per seconde door de cel geleverd wordt, wordt gegeven door het product van de stroom I , en de spanning V :

$$P_{\text{elektrisch}} = UI$$

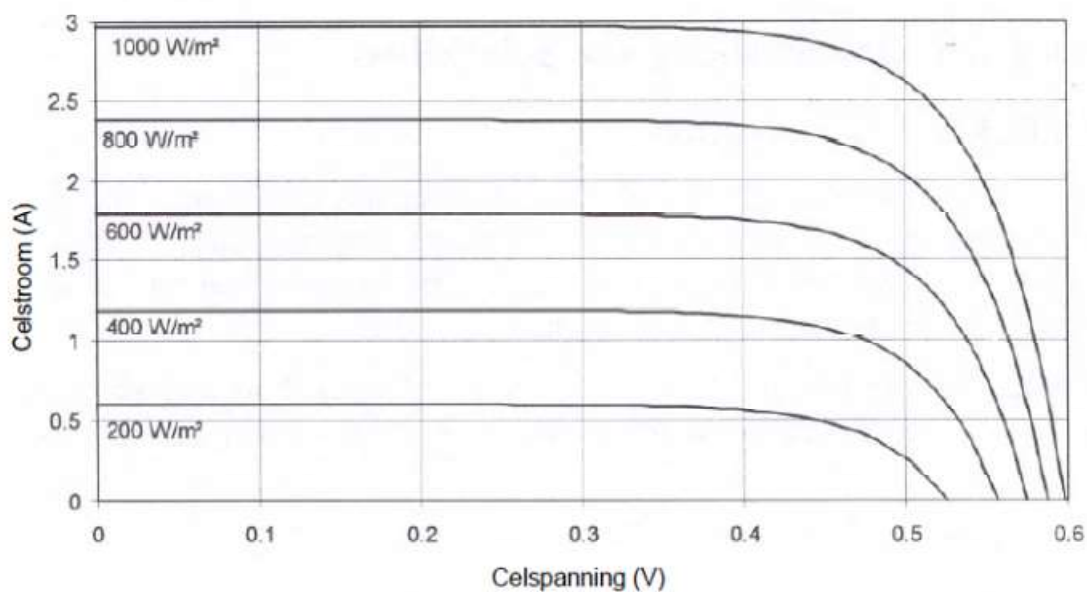
Het rendement wordt dan:

$$\eta = \frac{\lambda UI}{nhc}$$

Stroom en spanning zijn afhankelijk van de intensiteit van het licht. De stroom-spanning karakteristiek van deze structuur, afhankelijk van de intensiteit van het licht, is weergegeven in figuur 4.3. In feite is het een diodekarakteristiek, die bij belichting langs de stroomas is verschoven over een afstand die overeenkomt met de stroom die de cel levert in kortgesloten toestand, de kortsluitstroom I_{sc} .

Celspanning (V) Celstroom (A)

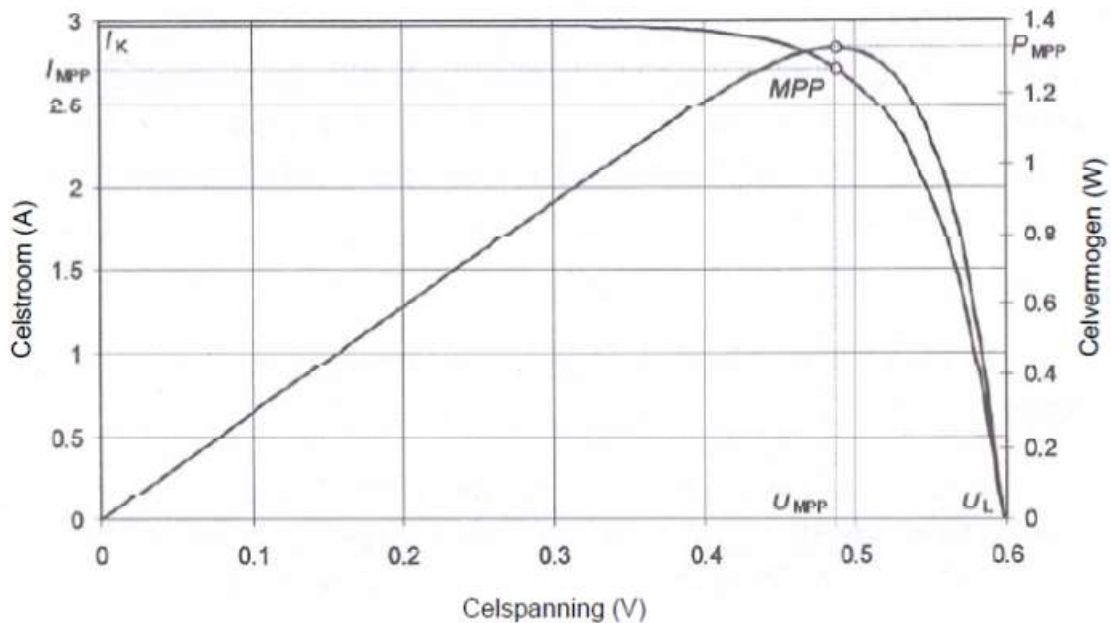
figuur 4.3 Stroom-spanning karakteristiek van een zonnecel



figuur 4.3 Stroom-spanning karakteristiek van een zonnecel

Ook is er een optimale belasting van de zonnecel mogelijk, waarbij het product van V en I maximaal wordt. Het maximaal vermogen dat de zonnecel kan leveren wordt bepaald door het "Maximum Power Point", zoals aangegeven in figuur 4.4. Ook in kortgesloten situaties zal de stroom nauwelijks toenemen, hetgeen betekent dat PV-systemen geen wezenlijke bijdrage leveren aan het kortsluitvermogen in het net.

Celspanning (V) Celstroom (A) Celvermogen (W)



figuur 4.4 MPP zonnecel

De spanning wordt bepaald door de *energie* van de elektronen, de stroom wordt bepaald door het aantal elektronen per tijdseenheid. Dus hoe meer licht, hoe meer elektronen er aangeslagen kunnen worden, en des te hoger de stroom.

Bij zonnecellen is het gebruikelijk te praten over de stroomdichtheid: dit is de stroom per oppervlakte-eenheid, dus [Am^{-2}] (of [Acm^{-2}]).

Wat betreft de energie van het invallende licht zijn er drie situaties te onderscheiden: de fotonen hebben meer, minder of precies genoeg energie om een elektron van de valentieband naar de geleidingsband aan te slaan. Als de fotonenergie kleiner dan de bandgap is, krijgen de elektronen niet genoeg energie om in de geleidingsband te komen.

De zonnecel zal dan dus geen elektriciteit leveren, hoeveel licht er ook binnenkomt! Het rendement van de zonnecel voor deze golflengten is dus 0%. Wanneer de energie van een foton precies gelijk is aan de bandgap wordt alle lichtenergie omgezet in elektrische energie (rendement 100%). Als de energie van het licht groter is dan de bandgap wordt het overschot aan energie van de aangeslagen elektronen via botsingen met atomen omgezet in warmte.

Het rendement voor deze golflengten zal dus ergens tussen 0% en 100% liggen. Het totale rendement van een zonnecel zal voor zonlicht dus altijd kleiner zijn dan 100%. Er zullen immers maar heel weinig fotonen zijn met een energie exact gelijk aan de bandgap. Een andere belangrijke verliesfactor ontstaat door het transport van lading. Als een elektron in de geleidingsband komt, moet het door de zonnecel heen naar de elektrode lopen.

Omdat elk materiaal, dus ook een zonnecel, een zekere weerstand heeft tegen het lopen van stroom (de zgn. inwendige weerstand), zullen hier verliezen in de vorm van warmte-ontwikkeling optreden. In een PV-installatie worden geen afzonderlijke zonnecellen gebruikt. De zonnecellen worden opgenomen in een module die in verschillende uitvoeringsvormen op de markt worden gebracht.

In een TCO (Total Cost of Ownership) van een PV installatie moet rekening gehouden worden met de afname van het rendement door onder ander oppervlakte vervuiling en etsing van het PV paneel oppervlak door scherpe deeltjes in de luchtvervuiling.

Ook migratie van het halfgeleidermateriaal zal een rol gaan spelen.

De verbeteringen aan nieuw PV panelen moeten leiden naar 1% verbetering van het rendement per jaar wat een overweging kan betekenen om eerder dan gepland de PV panelen te vervangen!