

Quantumtoepassingen (7): Halfgeleiders in actie

In de afgelopen twee artikelen in deze serie hebben we de bijzondere quantummechanische eigenschappen van [halfgeleiders](#) besproken. Een heel speciale constructie die gebruik maakt van deze materialen is de [pn-overgang](#): een constructie die in één richting heel gemakkelijk elektrische stroom doorlaat, maar in de tegengestelde richting nauwelijks. In dit artikel beschrijven we enkele voorbeelden van de nuttige toepassingen die dit soort pn-overgangen in het dagelijks leven hebben.



Afbeelding 1. Zonnepanelen. Zonnepanelen op de Nellis Air Force Base in de Amerikaanse staat Nevada. De zonnecel is een van de vele toepassingen van halfgeleiders. Foto: US Air Force.

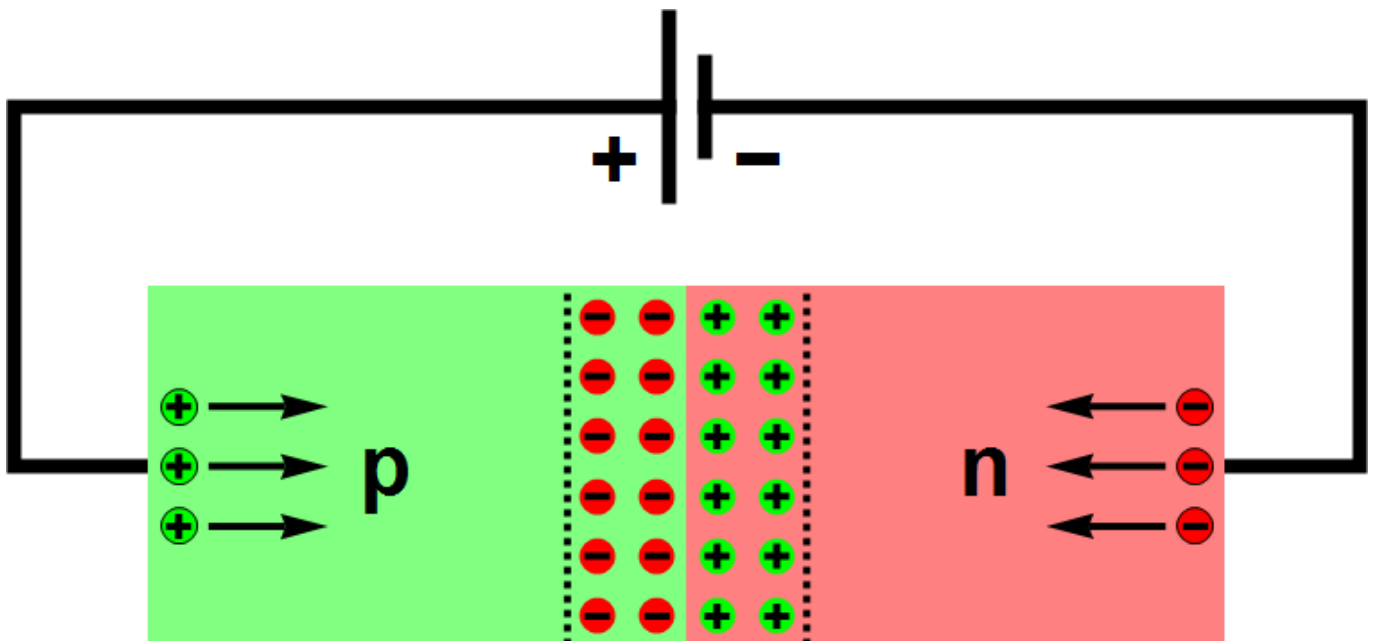
In dit artikel:

- [LEDs](#)

- Zonnecellen
- De transistor

LEDs

In afbeelding 2 hieronder zien we nog eens de pn-overgang die in het [vorige artikel](#) besproken is. In dit geval is de pn-overgang in de doorlaatrichting aangesloten. Elektronen komen aan de rechterkant het materiaal binnen, en annihileren in de overgangszone gaten. Tegelijkertijd komen aan de linkerkant gaten het materiaal binnen (of eigenlijk: verlaten elektronen het materiaal, waardoor gaten ontstaan), die aan de andere kant van de overgangszone geannihileerd worden door de daar aanwezige elektronen. Het zo ontstane tekort aan elektronen wordt aangevuld vanuit het n-materiaal, waardoor daar in de overgangszone een nieuw gat ontstaat, en zo kan dit proces zich blijven herhalen: er loopt een stroom.



Afbeelding 2. Een pn-overgang, aangesloten in de doorlaatrichting. Wanneer een pn-overgang op deze manier op een spanningsbron is aangesloten, laat de component eenvoudig stroom door.

Laten we nu iets beter kijken naar wat er in en rond de overgangszone precies gebeurt. Zoals hierboven beschreven, annihilieren daar continu elektronen en gaten elkaar. De vraag is nu: wat is de energie van deze elektronen en gaten? Uit ons eerdere artikel over [energiebanden](#) weten we dat elektronen niet elke mogelijke energie kunnen hebben. Ze vullen 'banden' van energiewaarden, en wanneer zo'n band gevuld is, moet een volgend elektron een beduidend hogere energie hebben om in de volgende band terecht te komen.

In halfgeleiders is het zo dat een bepaalde energieband *exact* gevuld is met elektronen; de vrije elektronen die de stroom geleiden, hebben dus een energie die zich in de volgende band bevindt. Voor gaten geldt dit echter niet. Een gat is immers het *ontbreken* van een elektron. Dat elektron zou zich in de gevulde band hebben bevonden; een gat is dus het ontbreken van een elektron met een beduidend *lagere* energie.

De conclusie is dat een elektron dat een gat tegenkomt, dat gat kan opvullen, maar dat daarbij een bepaalde hoeveelheid energie – gelijk aan de grootte van de energieband – overblijft. Wat gebeurt er met deze energie? Energie gaat in de natuur nooit verloren, dus die energie moet worden afgevoerd, en dat gebeurt in het algemeen in de vorm van een *foton*: een lichtdeeltje. In de overgangszone wordt dus licht van een heel specifieke energie geproduceerd! De energie van een foton is direct gerelateerd aan zijn golflengte, en daarmee aan de kleur van het licht.

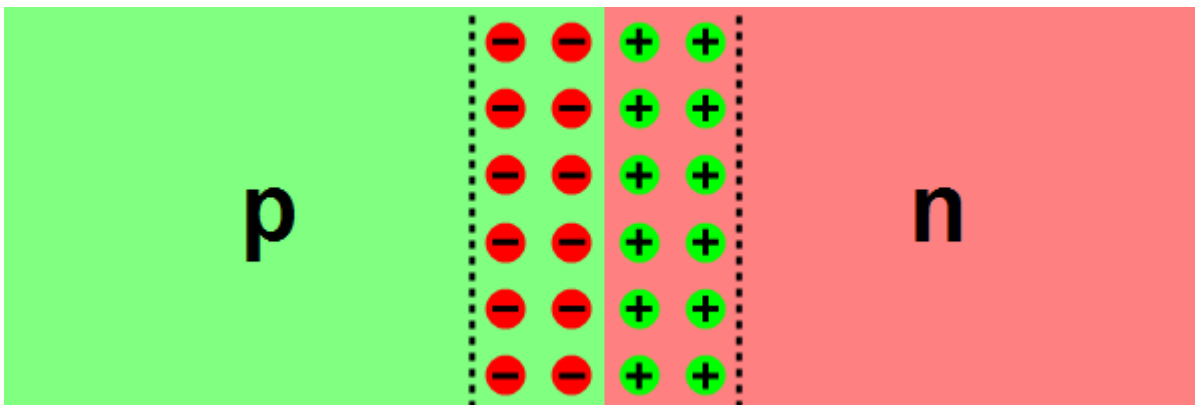
(plaatje LEDs)

Voor veel halfgeleiders zal dit licht een golflengte hebben die wij niet kunnen waarnemen, of bijvoorbeeld zulke lange golven hebben dat we dat licht als *warmte* ervaren. Er zijn echter ook materialen waarbij het ontstane licht zichtbaar is. In dit geval kan de pn-overgang (die zoals we weten ook wel een *diode* wordt genoemd) dus gebruikt worden als lichtbron van een heel specifieke kleur licht. We hebben een *Light Emitting Diode* gemaakt – een constructie die we beter kennen onder de afkorting van die kreet: een LED. LED-verlichting komt vandaag de dag op allerlei plaatsen voor: in horloges, kerstboomlichtjes, televisies, enzovoort.

Naar boven

Zonnecellen

Het hierboven beschreven proces kan ook omgedraaid worden. Hieronder zien we een pn-overgang waarop geen stroombron is aangesloten. De overgangszone is gevuld met elektronen en gaten, maar verder gebeurt er niets: het systeem is in evenwicht.



Afbeelding 3. Een pn-overgang die niet is aangesloten. Normaalgesproken is dit systeem in evenwicht, en gebeurt er niets. Dit verandert echter zodra we licht op de overgangszone laten vallen.

Stel dat we nu licht op de overgangszone laten vallen. In de praktijk gebeurt dit bijvoorbeeld door ofwel het p-, ofwel het n-materiaal heel dun te maken, zodat het licht er doorheen kan vallen en de overgangszone bereikt. Als de lichtdeeltjes een energie hebben die tenminste zo groot is als het energiegat tussen de banden van de halfgeleider, kunnen de fotonen elektronen uit de onderste band (de valentieband) losmaken, en ze voldoende energie geven om in de bovenste band (de geleidingsband) terecht te komen. Er is daarmee dus een extra elektron-gat-paar ontstaan.

Het ontstane gat kan nu opgevuld worden door een vrij elektron uit het n-materiaal, en het ontstane elektron kan een gat in het p-materiaal opvullen. Op die manier ontstaat er in de overgangszone aan de p-kant een overschot aan elektronen, en aan de n-kant een overschot aan gaten. Doen we verder niets, dan zullen deze overtollige elektronen en gaten elkaar op

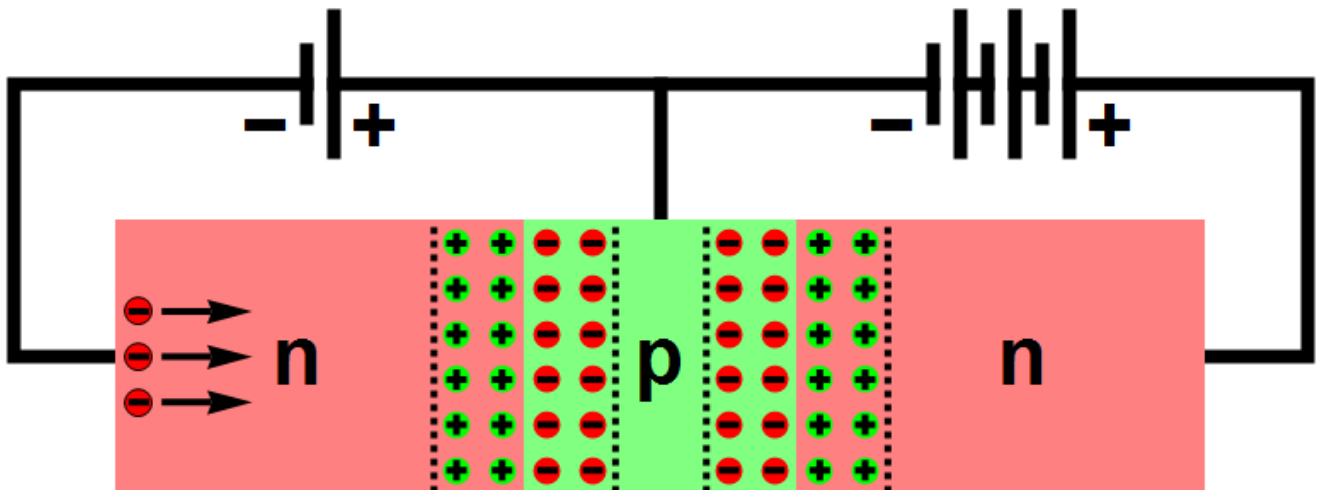
den duur vanzelf weer opheffen. Geven we de elektronen en gaten echter de kans om het materiaal te verlaten – bijvoorbeeld door de pn-overgang nu aan beide kanten op een elektrisch circuit aan te sluiten, dan kan het evenwicht zich ook op die manier herstellen. De pn-overgang is daarmee een stroombron geworden!

Op deze manier kan licht van de juiste golflengte in elektrische stroom worden omgezet. Er zijn zoals gezegd materialen waarvoor deze golflengte die van zichtbaar licht is, en dus bijvoorbeeld in zonlicht veel voorkomt. Met deze materialen kunnen we zonlicht in stroom omzetten – we hebben een zonnecel gebouwd! Ook zonnecellen komen we de laatste jaren in de wereld om ons heen meer en meer tegen: in grote panelen op de daken van huizen, maar ook in kleinere apparaten die zo zonder batterij in hun eigen stroom kunnen voorzien.

Naar boven

De transistor

Een laatste voorbeeld van het nut van de pn-overgang komen we tegen in een elektronische component die we kennen als de *transistor*. Een transistor bestaat niet uit een enkele pn-overgang, maar uit een pn-overgang die direct gevolgd wordt door een tegengestelde pn-overgang – zie de afbeelding hieronder. Zowel de combinatie p-n-p als n-p-n kan gebruikt worden; we beschrijven hieronder de laatste variant.



Afbeelding 4. Een schematische weergave van een transistor. Als door de linker stroomkring een kleine stroom loopt, zal door de gehele transistor een grote stroom gaan lopen.

In de constructie van een transistor is het van belang dat het middelste materiaal (in dit geval het p-materiaal) niet te dik is; in het algemeen zal dit materiaal iets dikker zijn dan de breedte van de twee overgangszones bij elkaar. We sluiten de transistor nu aan op twee stroombronnen. Over de linker pn-overgang zetten we een kleine spanning in de doorlaatrichting; over de rechter pn-overgang een grote spanning in de sperrichting.

De verwachting zou nu misschien zijn dat door de linker pn-overgang een kleine stroom gaat lopen (de overgang is immers in de 'juiste' richting aangesloten), en door de rechter pn-overgang geen stroom - die is immers in de 'verkeerde' richting aangesloten. Dat blijkt echter niet het geval! De reden is te vinden in de elektronen die vanaf de linkerkant uit het n-materiaal het p-materiaal binnenkomen. Een deel van deze elektronen zal precies doen wat we verwachten: ze bewegen door het p-materiaal, en komen uiteindelijk aan bij het middelste aansluitpunt (ook wel de *basis* genoemd), waar ze een gat annihileren. Dat gat kan worden 'aangevuld' uit de stroombron, en er zal inderdaad een stroom gaan lopen.

Lang niet alle elektronen bewegen echter naar de basis toe. Door het spanningsverschil met de rechterkant van de transistor zullen de elektronen ook in die richting versneld worden. Het

gevolg is dat veel elektronen met een behoorlijke snelheid het n-materiaal aan de rechterkant in beweging. Daar kunnen deze elektronen op de gebruikelijke manier als vrije ladingsdragers verder bewegen naar het rechter aansluitpunt. Kortom: ook in de rechter pn-overgang zal een stroom gaan lopen.

Als de spanning over de rechter overgang veel groter is dan die over de linker overgang, zal het bovenstaande zelfs het lot van verreweg de meeste elektronen zijn. Met andere woorden: er hoeft maar een heel *kleine* stroom door de linker stroomkring te lopen, om een heel *grote* stroom door het totale circuit tot gevolg te hebben. Op deze manier kan de transistor dienen als een versterker, die zwakke signalen (kleine spanningsverschillen en kleine stromen) omzet in een veel sterker signaal. Deze eigenschap van de transistor vond oorspronkelijk zijn toepassingen in gehoorapparaten en radio's, en wordt tegenwoordig in allerlei elektronica gebruikt.



Afbeelding 5. Een verzameling transistoren. Elke transistor heeft drie aansluitpunten: de basis in het midden, en de twee buitenste aansluitpunten waarover de grote totale stroom loopt. Afbeelding: [PublicDomainPictures](#).

Merk op dat het bovenstaande proces alleen werkt als er in de linker stroomkring in de transistor een kleine stroom loopt: anders zijn er immers geen elektronen beschikbaar om de stroom in het rechterdeel op gang te brengen. De linker stroomkring kan daarmee ook gebruikt worden als een elektronische *schakelaar*. Wordt de spanning daar verwijderd, dan zal de grote stroom door de gehele transistor niet meer lopen. Ook deze toepassing wordt op grote schaal gebruikt. Het bekendste voorbeeld: veel computergeheugen bestaat uit een gigantisch aantal mini-transistoren, die elk 'aan' of 'uit' kunnen staan, en zo een 0 of een 1 weer kunnen geven: *bits*.

Deze drie veel voorkomende toepassingen – LED, zonnecel en transistor – zijn nog maar het topje van de ijsberg. Het zou heel bijzonder zijn als er zich op dit moment binnen een straal van tien meter van u niet vele apparaten te vinden zijn waarin halfgeleiders, pn-overgangen en transistoren op allerlei verschillende manieren gebruikt worden. Zonder halfgeleiders, en zonder de quantummechanica die deze intrigerende materialen mogelijk maakt, zou de wereld om ons heen er totaal anders uit zien!

Naar boven

De zomer breekt aan, en veel onderzoekers en studenten gaan in de komende maanden op reis. Zo ook uw redactieleden en een groot deel van de auteurs van deze website. In de zomermaanden zullen er daarom geen afleveringen van dit dossier verschijnen. U hoeft ons echter niet helemaal te missen: wekelijks zal er op vrijdag een ander artikel of link op de Quantum Universe-site verschijnen. In het najaar gaan we weer terug naar ons vertrouwde publicatieschema op dinsdag en vrijdag. Ook dit dossier is dan weer terug: het volgende artikel daarin verschijnt op vrijdag 26 augustus. Dan zullen we een totaal andere toepassing van de quantumfysica bespreken: supergeleiding.