Quantumtoepassingen (6): De pn-overgang

Waarom zijn computerchips van silicium gemaakt en niet van koper? Silicium is een halfgeleider, het type materiaal waarop veel moderne elektronica is gebaseerd.Net als metalen zoals koper en ijzer kunnen halfgeleiders stroom geleiden. De veelheid van toepassingen van halfgeleiders doet echter vermoeden dat het niet alleen de stroomgeleiding is die deze materialen zo bijzonder maakt.



Afbeelding 1. Een germanium-diode.Diodes zijn elektronicacomponenten die gebruik maken van pn-overgangen. Het grijze blokje linksboven, op het oranje voetje, is de halfgeleider die de pn-overgang bevat. Foto: Wikipedia-gebruiker Aomorikuma.

In dit artikel:

- p- en n-type halfgeleiders
- Opposites attract
- Met de stroom meeroeien…
- …of ertegenin
- Toepassingen

p- en n-type halfgeleiders

In het vorige artikel in dit dossier bespraken we halfgeleiders: materialen die eigenlijk isolatoren zijn, maar waarbij elektronen de energiesprong tussen de valentieband en de geleidingsband bij kamertemperatuur gemakkelijk kunnen maken. Door *doping* aan deze materialen toe te voegen, ontstaan bovendien extra ladingsdragers, die ervoor zorgen dat halfgeleiders nog beduidend beter stroom gaan geleiden.

We zagen in het vorige artikel dat dit toevoegen van doping op twee manieren kan gebeuren. ‘Vervuilen’ we de halfgeleider met atomen die in hun buitenste schil extra elektronen hebben, dan komen deze extra elektronen heel gemakkelijk in de geleidingsband terecht. Zo kan er in het materiaal dus eenvoudig negatieve lading verplaatst worden. Met andere woorden: er kan een stroom van elektronen gaan lopen. Een op deze manier aangepaste halfgeleider wordt, vanwege de negatieve lading van de elektronen, een *n-type halfgeleider* genoemd.

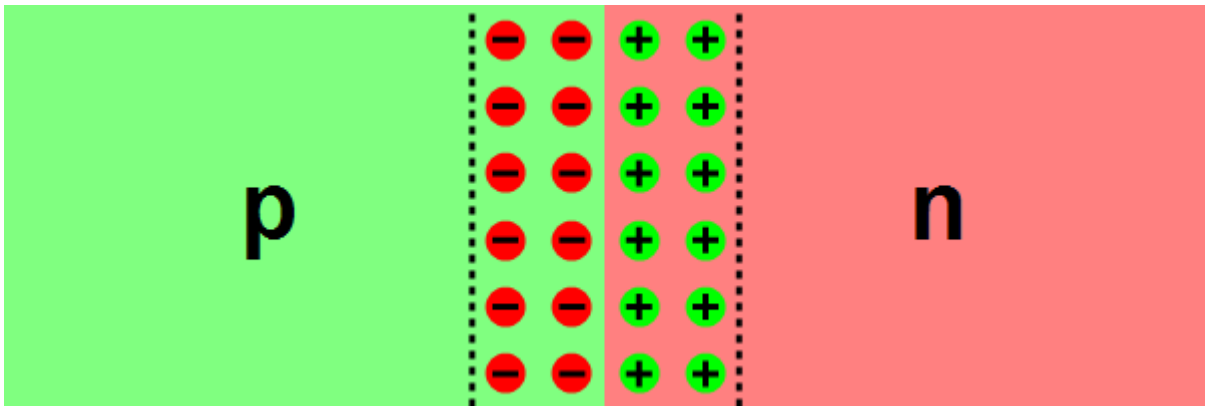
Vervuilen we de halfgeleider met atomen die in hun buitenste schiljuist minder elektronen hebben dan de atomen van het materiaal zelf, dan is er plaatselijk een tekort aan bindingselektronen. Dit tekort kan worden aangevuld met elektronen uit naburige atomen, maar zodra dat gebeurt ontstaat op die plek natuurlijk weer een tekort. Op deze manier kan een ‘missend elektron’, oftewel een *gat*, door het materiaal gaan bewegen. Het ontbreken van een negatief geladen elektron kan worden gezien als een effectieve *positieve* lading, en dus wordt een materiaal waarop op deze manier een stroom kan gaan lopen een *p-type*

halfgeleider genoemd.

Naar boven

Opposites attract

Écht interessant wordt het als we we een stuk halfgeleider van p-type samenvoegen met een stuk halfgeleider van n-type, zodat een overgangszone ontstaat. In afbeelding 2 is een dergelijke *pn-overgang* weergegeven. Links zien we het p-materiaal, waar het ladingstransport door middel van gaten plaatsvindt; rechts het n-materiaal, waar elektronen de lading transporteren. In het overgandsgebied kunnen elektronen het n-materiaal uitstromen en in het p-materiaal terechtkomen, waar ze de daar aanwezige gaten kunnen vullen.



Afbeelding 2. Een pn-overgang.In de overgangszone tussen p- en n-materiaal kunnen elektronen uit het n-materiaal het p-materiaal instromen, en de daar aanwezige gaten vullen. In het n-materiaal ontstaat dan een elektronentekort – oftwel: een overschot aan positief geladen ionen.

Dit proces gaat niet oneindig lang door, want met de nieuwe elektronen erbij wordt het p-materiaal, dat oorspronkelijk natuurlijk geen netto lading had, negatief geladen. Tegelijkertijd wordt het n-materiaal, waaruit nu elektronen verdwenen zijn, positief geladen. Een volgend elektron dat uit het n-materiaal naar het p-materiaal beweegt, zal door de negatieve lading worden afgestoten; op precies dezelfde manier zal een gat dat uit het p-materiaal in de richtng van het n-materiaal beweegt door de positieve lading worden afgestoten.

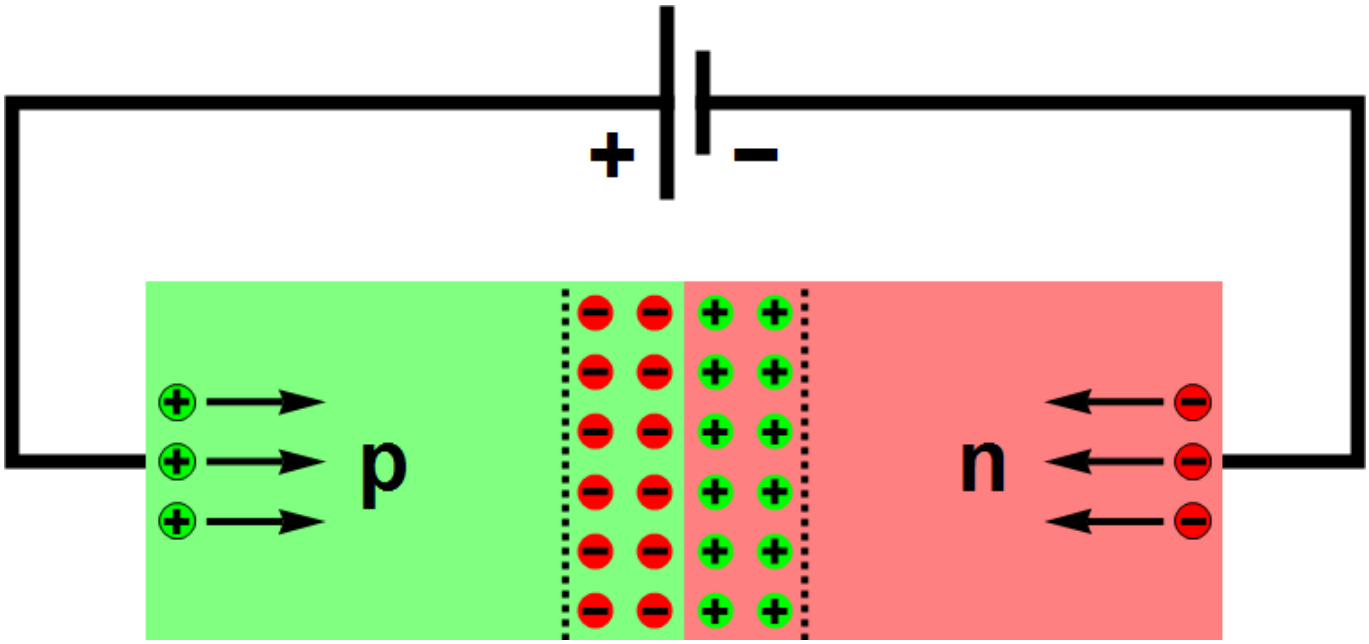
Op deze manier ontstaat al snel een evenwicht, waarbij rond het overgangsgebied een zogeheten *verarmingszone* ontstaat. In deze zone zijn aan de p-kant vrijwel alle gaten gevuld

(en is er dus een netto negatieve lading) en zijn aan de n-kant vrijwel alle vrije elektronen verdwenen (en is er dus een netto positieve lading).

Naar boven

Met de stroom meeroeien…

Welke gevolgen heeft de aanwezigheid van een pn-overgang op de geleidende eigenschappen van een halfgeleider? Het antwoord op die vraag blijkt sterk af te hangen van de richting waarin we de stroom willen laten lopen. Laten we allereerst de situatie uit afbeelding 3 bekijken, waarbij de negatieve pool van een spanningsbron is aangesloten op het n-materiaal, en de positieve pool op het p-materiaal.



Afbeelding 3. 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.

Vanuit de spanningsbron komen elektronen het n-materiaal binnen, waardoor in dat materiaal een negatief ladingsoverschot ontstaat. In de verarmingszone is in het n-materiaal echter een positief ladingsoverschot, dus de overtollige elektronen, die door positieve lading worden aangetrokken, zullen de verarmingszone in bewegen en daar gaten vullen. Aan de p-kant gebeurt precies het omgekeerde: elektronen worden door de spanningsbron uit het p-materiaal verwijderd, waardoor extra gaten, en dus een positief ladingsoverschot ontstaat. Deze extra gaten trekken elektronen uit de verarmingszone aan, waardoor ook aan de p-kant

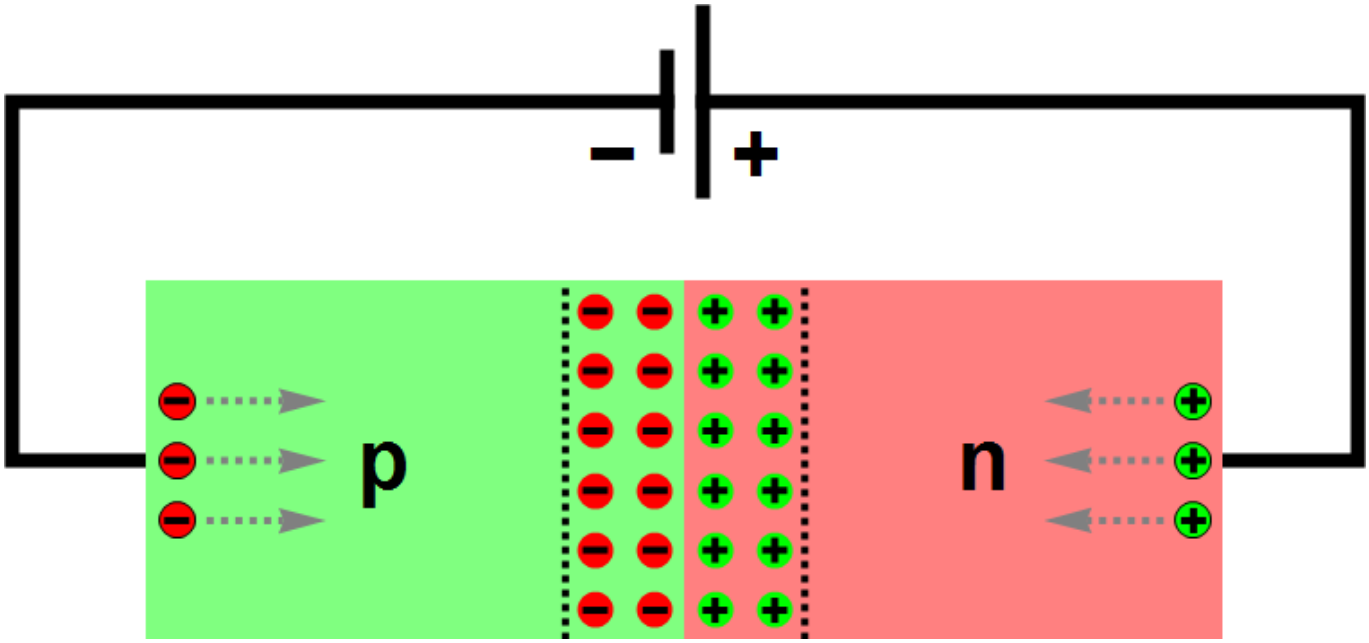
de verarminszone ‘leegloopt’.

Aan beide kanten wordt de verarmingszone daardoor smaller, maar dit biedt nieuwe elektronen en gaten rond het overgangsgebied de kans om de grens over te steken en hun wederhelften op te heffen. Zo wordt de verarminszone weer aangevuld, en dit proces kan continu doorgaan. De spanningsbron kan aan de n-kant elektronen blijven aanvoeren en ze aan de p-kant opnemen; er loopt dus een netto stroom door het materiaal. Het op deze manier aansluiten van een pn-overgang wordt het aansluiten in de *doorlaatrichting* genoemd.

Naar boven

...of ertegenin

Wat gebeur er nu als we de spanningsbron omgekeerd aansluiten, dus met de negatieve pool aan het p-materaal en de positieve pool aan het n-materiaal? Zie hiervoor afbeelding 4. Nu komen aan de p-kant elektronen het materiaal binnen. Daardoor ontstaat in dit materiaal een overschot aan negatieve lading, maar deze lading wordt *afgestoten* door de negatieve lading in de verarmingszone. De elektronen krijgen dus niet de kans om het overgangsgebied te bereiken.



Afbeelding 4. Een pn-overgang aangesloten in de sperrichting.Wanneer een pn-overgang op deze manier op

een spanningsbron is aangesloten, laat de component weinig tot geen stroom door.

Het omgekeerde gebeurt aan de n-kant: daar worden door de spanningsbron nu elektronen uit het materiaal verwijderd, waardoor extra gaten ontstaan. Het materiaal zal dus proberen extra elektronen uit de verarmingszone aan te trekken, maar daar bestaat al een tekort aan elektronen. De gaten zullen dus niet gevuld worden; ook hier zien we dat er geen stroom zal gaan lopen. Deze manier van aansluiten wordt aansluiten in de *sperrichting* genoemd.

Naar boven

Toepassingen

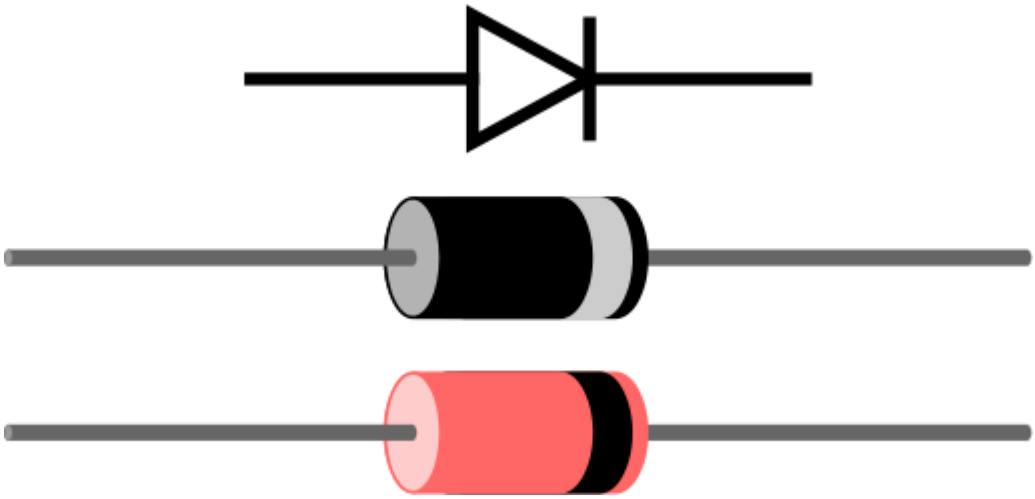
De pn-overgang laat in één richting dus wel een stroom door, en in de andere niet. In de elektronica wordt een component met deze eigenschap een *diode* genoemd. Diodes hebben in de elektronica allerlei toepassingen. Ze komen bijvoorbeeld van pas wanneer een apparaat wordt aangesloten op een spanningsbron die wisselspanning levert (dat wil zeggen: waar de positieve en negatieve pool continu omdraaien) maar waarin het van belang is dat in de schakeling zelf de stroom maar één kant op loopt.

Een andere toepassing van de pn-overgang volgt uit het feit dat een dergelijke overgang nooit een perfecte diode is. Wanneer in de sperrichting een spanningsbron wordt aangesloten die sterk genoeg is, kan de diode ‘doorslaan’. Dat doorslaan kan op twee verschillende manieren gebeuren.

De eerste manier waarop een diode in de ‘verkeerde’ richting stroom kan doorlaten, staat bekend als het Zener-effect. Het Zener-effect is een typisch quantummechanisch verschijnsel. (Het werd hoog tijd dat in dit artikel de quantummechanica aan bod kwam! Hoewel de onderliggende theorie van halfgeleiders heel veel quantumfysica gebruikt, is de bespreking in dit artikel tot nu toe behoorlijk ‘klassiek’ geweest.)

Een bekend quantummechanisch effect is het tunneleffect: het feit dat quantumdeeltjes altijd een bepaalde kans hebben om door een smalle barrière heen te bewegen. Dit effect is ook in pn-overgangen aanwezig. Doordat de overgangszone meestal maar enkele micrometers dik is, kunnen elektronen uit het n-materiaal als het ware over die zone heen springen, en aan de andere kant in het p-materiaal gaten opvullen. Hierdoor gaat er een netto stroom lopen.

Normaalgesproken is de tunnelkans – en dus de stroom die daar een gevolg van is – erg klein, maar naarmate de spanning over de diode toeneemt, wordt die kans steeds groter. De elektronen willen immers van de minpool af en naar de pluspool toe bewegen. Als de spanning groot genoeg wordt (meestal in de orde van enkele volts) wordt de tunnelkans zo groot dat een substantiële stroom zal gaan lopen.



Afbeelding 5. Diodes.Boven: het symbool dat in elektrische schema's voor de diode wordt gebruikt. De doorlaatrichting is in de richting van de pijl. Midden en onder: op de diode zelf wordt de doorlaatrichting meestal door een anders gekleurde ring aangegegeven. Afbeelding: Erik Streb.

Naast het quantummechanische Zener-effect is er ook een meer 'klassiek' effect dat ervoor kan zorgen dat een diode doorslaat. Dit effect staat bekend als het *lawine-effect*. We zijn er in onze bovenstaande uitleg van de pn-overgang vanuit gegaan dat ladingsdragers (elektronen of gaten) alleen vanuit de aangrenzende gebieden de overganszone binnen kunnen komen. Als de spanning echter hoog genoeg is, kan het ook gebeuren dat elektronen die normaal niet vrij zijn, van hun atoomkernen worden losgerukt, waardoor er binnen de overgangszone zelf een extra elektron en een extra gat ontstaan. Het elektron zal in de richting van de pluspool bewegen en het gat in de richting van de minpool, en op die manier gaat een stroom lopen. Normaalgesproken zal deze stroom erg klein zijn, maar als de spanning hoog genoeg is, kan het vrije elektron zo hard met de atomen in het materiaal botsen dat die op hun beurt ook weer elektronen verliezen, enzovoort. Op die manier ontstaat een sneeuwbal-effect, en begint de diode ook in de omgekeerde richting opeens goed te geleiden.

In sommige materialen zal het Zener-effect het eerst optreden; in andere het lawine-effect,

en soms spelen beide effecten ook tegelijk een rol. Welke van beide effecten ook de belangrijkste rol speelt, elke pn-diode slaat bij een bepaalde spanning door. Deze ‘bug’ kan erg goed als ‘feature’ gebruikt worden: zo kunnen diodes bijvoorbeeld gebruikt worden om te meten wanneer een bepaalde spanning te hoog wordt, en in dat geval bijvoorbeeld om veiligheidsredenen een elektrisch circuit uitschakelen.

We hebben hierboven we twee basale toepassingen van pn-overgangen genoemd. Daarmee zijn we er echter nog lang niet! Transistors, zonnecellen, LEDs… ze maken allemaan gebruik van pn-overgangen. In het volgende artikel zullen we enkele van deze meer geavanceerde toepassingen van halfgeleiders bespreken.

Naar boven

Het volgende artikel in dit dossier verschijnt op vrijdag 27 mei.