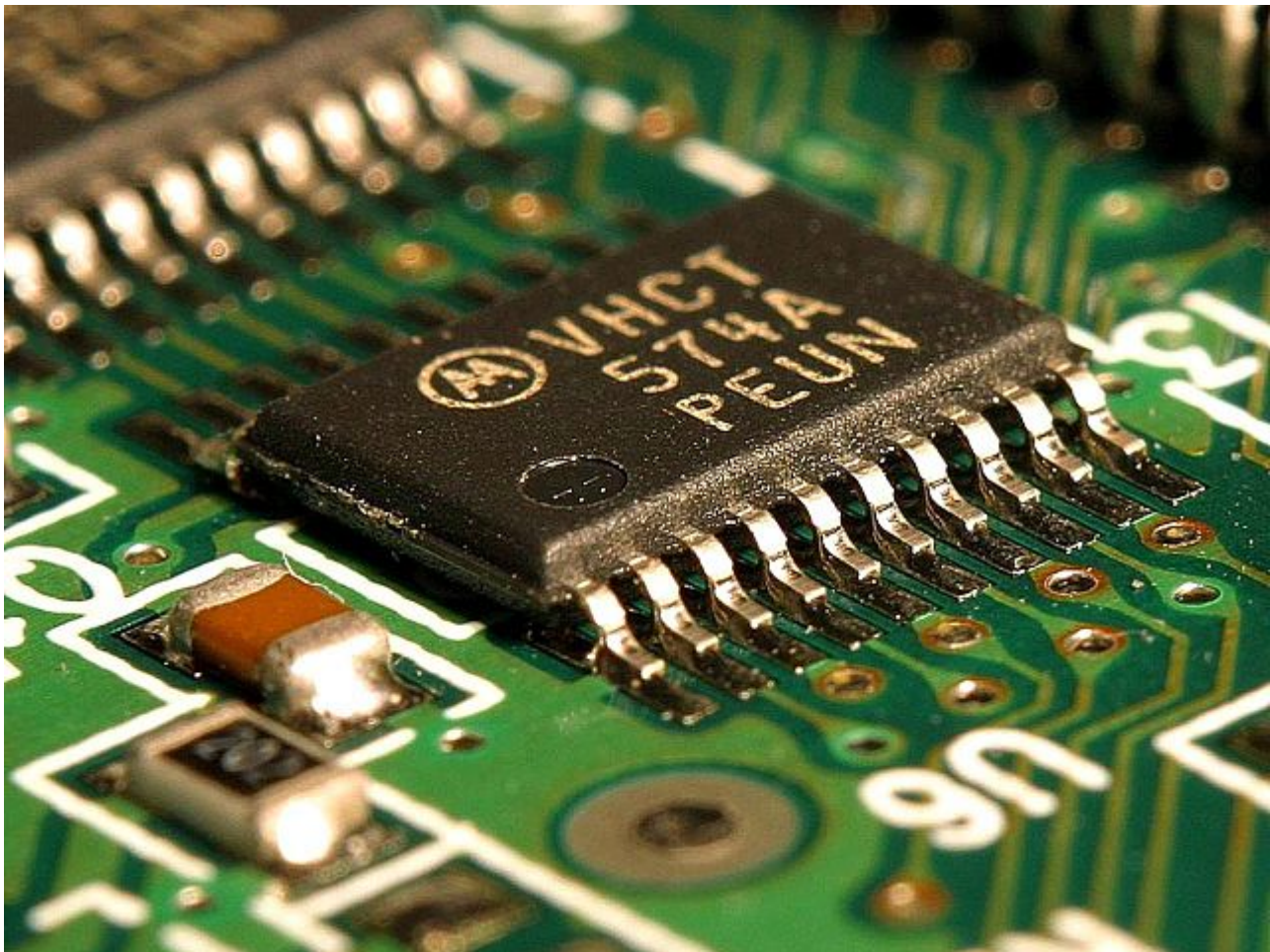


Quantumtoepassingen (5): Halfgeleiders

Sommige materialen geleiden stroom, andere niet. In de eerdere artikelen in deze reeks hebben we ontdekt hoe dat komt. De elektronen die de stroom kunnen geleiden, vullen energiebanden, die gescheiden worden door 'verboden gebieden'. Is een energieband precies gevuld, dan kost het veel energie om een elektron te laten bewegen: het materiaal is een isolator. Is een band maar gedeeltelijk gevuld, dan kunnen we aan elk elektron een kleine hoeveelheid bewegingsenergie toevoegen, waardoor een stroom ontstaat: een geleider.



Afbeelding 1. Een computerchip. Halfgeleiders zoals silicium spelen in de elektronica een cruciale rol: vrijwel alle computerchips zijn gemaakt van halfgeleiders. Afbeelding: Jon Sullivan.

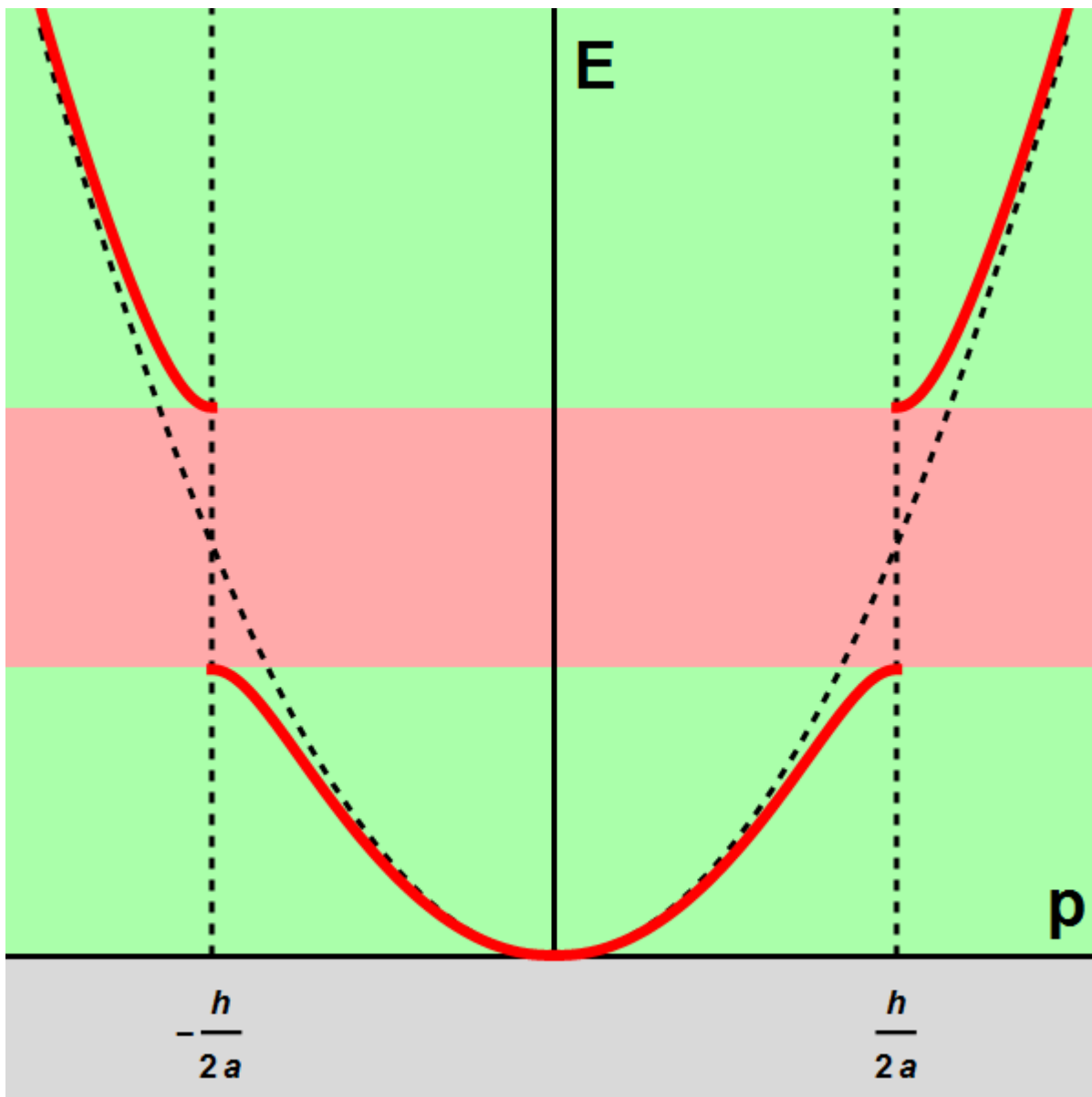
In dit artikel:

- [Halfgeleiders](#)
- [Golven en schillen](#)
- [Doping](#)
- [Géén elektron kan ook geleiden!](#)
- [Moeilijk doen als het makkelijk kan?](#)

Halfgeleiders

Zelfs de beste isolator is niet perfect. De eenvoudige reden daarvoor is dat de afstand tussen de energiebanden (zie afbeelding 2) nooit oneindig groot is. Sluiten we een isolator aan op een enorm sterke spanningsbron, dan kunnen de elektronen zoveel extra energie krijgen dat ze over de kloven tussen de energiebanden heen springen, en in een hogere energieband belanden. De elektronen kunnen dan dus alsnog stroom geleiden.

Omgekeerd zijn er materialen waarin weliswaar precies een energieband gevuld is, maar waar de kloof tot de volgende energieband zo klein is dat het weinig moeite kost om elektronen de sprong naar die band te laten maken. De geleiding van een dergelijk materiaal hangt af van de temperatuur: als die hoger wordt, krijgen de elektronen extra warmte-energie, en die energie kan al voldoende zijn om een deel van de elektronen de hogere band te laten bereiken. Die band wordt de *geleidingsband* genoemd: is een elektron eenmaal in die band beland, dan is het vrij om te bewegen – het kan vanaf dan immers weer gemakkelijk extra bewegingsenergie opnemen, Er kan zo dus lading verplaatst worden – of met andere woorden: het materiaal geleidt een stroom. Materialen waarbij dit grofweg bij kamertemperatuur gebeurt, heten *halfgeleiders*.



Afbeelding 2. Energiebanden. Nogmaals de centrale afbeelding uit de vorige twee artikelen. De energie van elektronen hangt af van hun snelheid (oftewel: van hun *impuls p*), maar die afhankelijkheid gaat met sprongen, zoals weergegeven door de rode lijn. Als de elektronen precies alle energietoestanden in de onderste goene band opvullen, is er een grote hoeveelheid extra energie nodig om de elektronen te versnellen. Het materiaal heeft daarmee een zeer grote weerstand tegen geleiding. Hoe groter de rode 'kloof', hoe beter het materiaal isoleert. Voor halfgeleiders is deze kloof betrekkelijk klein.

Hoe sterk een halfgeleider stroom geleidt, hangt dus onder andere af van de temperatuur. Maken we de halfgeleider heel koud, dan zullen weinig elektronen de sprong naar de geleidingsband kunnen maken, en is het materiaal een isolator. Maken we het heel warm, dan zullen veel elektronen de sprong maken, en kan het materiaal gemakkelijk stroom

geleiden. Deze temperatuurafhankelijkheid is overigens heel specifiek voor halfgeleiders. In een *geleider* is het juist zo dat een hogere temperatuur ervoor zorgt dat de ionen in het materiaal beginnen te trillen, waardoor elektrongolven zich lastiger kunnen voortbewegen en de geleiding dus afneemt!

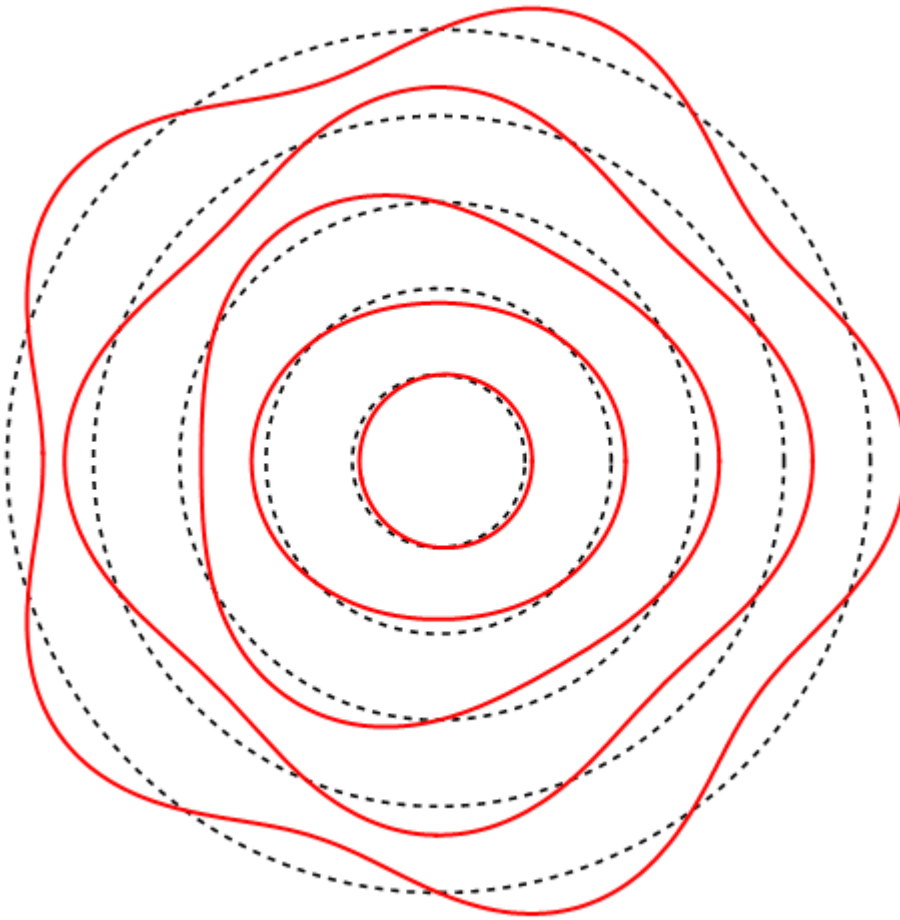
Nu zal een zuivere halfgeleider zelfs bij hoge temperatuur nog altijd een stuk minder goed stroom geleiden (dus: een veel hogere weerstand hebben) dan een echte geleider. Er blijkt echter een eenvoudige truc te zijn om ervoor te zorgen dat een halfgeleider veel beter gaat geleiden: het toevoegen van *doping*.

[Naar boven](#)

Golven en schillen

Om te begrijpen hoe doping werkt, gaan we terug naar het quantummechanische principe dat al eerder een centrale rol speelde: het [uitsluitingsprincipe van Pauli](#). Ter herinnering: dat principe zegt dat twee elektronen nooit in exact dezelfde toestand kunnen zijn. Het principe van Pauli geldt ook voor elektronen in individuele atomen. Het zorgt er bijvoorbeeld voor dat er binnen een atoom nooit twee elektrongolven met precies dezelfde spin (oftewel: precies dezelfde 'draairichting') op precies dezelfde manier in precies dezelfde baan rond een atoomkern kunnen golven.

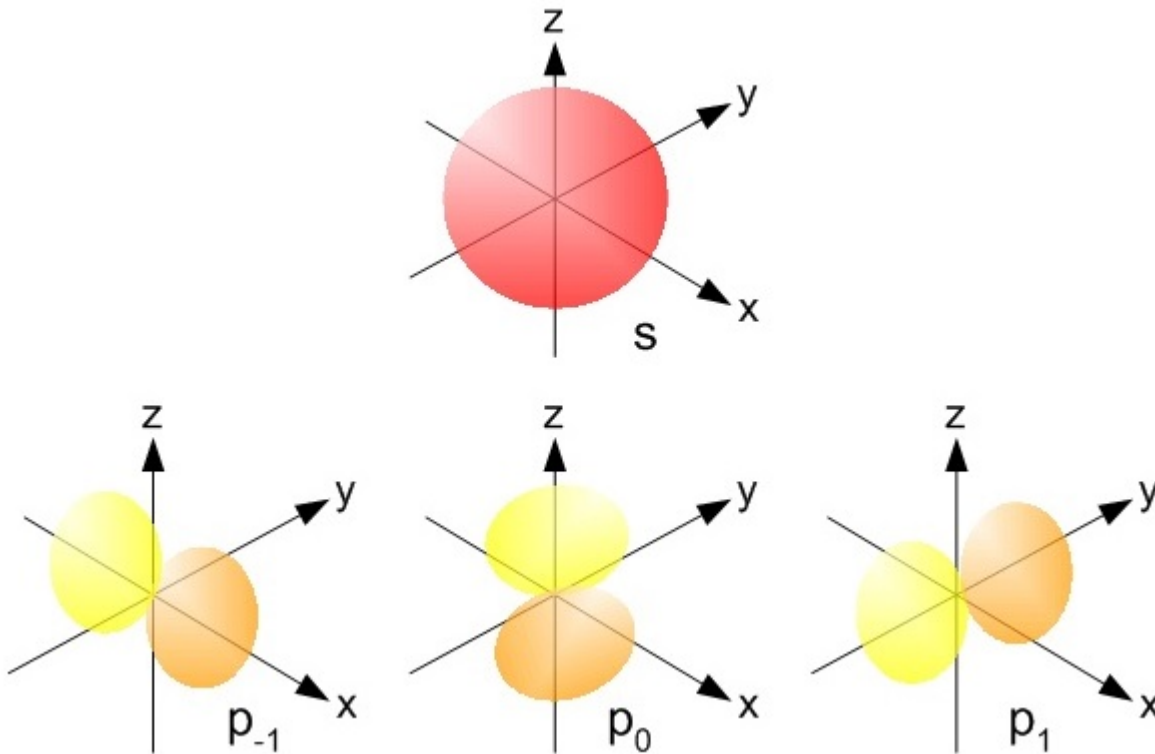
Dat laatste heeft grote gevolgen, want net als elektrongolven in een materiaal, kunnen elektrongolven rond een atoom ook maar een beperkt aantal vormen aannemen. Heel dichtbij de atoomkern kan de golf zelfs maar op één manier rondbewegen - op zo'n manier dat hij zichzelf versterkt (zie afbeelding 3) als de golf precies één rondje gemaakt heeft. Omdat een elektron bovendien op twee manieren kan rondtollen (grotweg 'linksom' en 'rechtsom', is het gevolg dat er zich in elk atoom hooguit twee elektronen vlak bij de atoomkern kunnen bevinden.



Afbeelding 3. Een grove schets van elektrongolven in een atoom. Een elektrongolf kan alleen zo rond een atoomkern golven dat het elektron zichzelf niet kan uitdoven. Als gevolg daarvan moeten de golven precies ‘passen’ op de baan van de golf. Voor een tweedimensionaal atoom zouden de banen eruitzien als hierboven: op elke volgende baan past precies één golflengte meer. In drie dimensies is de situatie ingewikkelder, maar blijft het idee van ‘quantisatie’ van de mogelijke golfvormen gelden.

Gelukkig is er iets verder weg van de atoomkern weer een ‘baan’ waar de elektrongolf zichzelf kan versterken. Ook dit is in afbeelding 3 geschetst, maar in dit geval geeft de afbeelding maar ten dele de waarheid weer. De afbeelding is namelijk van een ‘plat’ atoom in twee dimensies. Een werkelijk atoom is driedimensionaal, en dus golft het elektron niet over een cirkel, maar over een bolvormige schil. Dit blijkt tot gevolg te hebben dat er vier verschillende manieren zijn waarop de elektrongolf precies passend gemaakt kan worden, zodat er rond deze bolschil maar liefst acht verschillende elektronen (voor elke golf met twee verschillende spins) kunnen rondgolven.

Zijn deze acht mogelijkheden opgebruikt, dan moeten de elektronen uitwijken naar een derde schil, waar ook weer acht elektrongolven in passen. In de daaropvolgende schil passen maar liefst achttien elektronen, enzovoort.



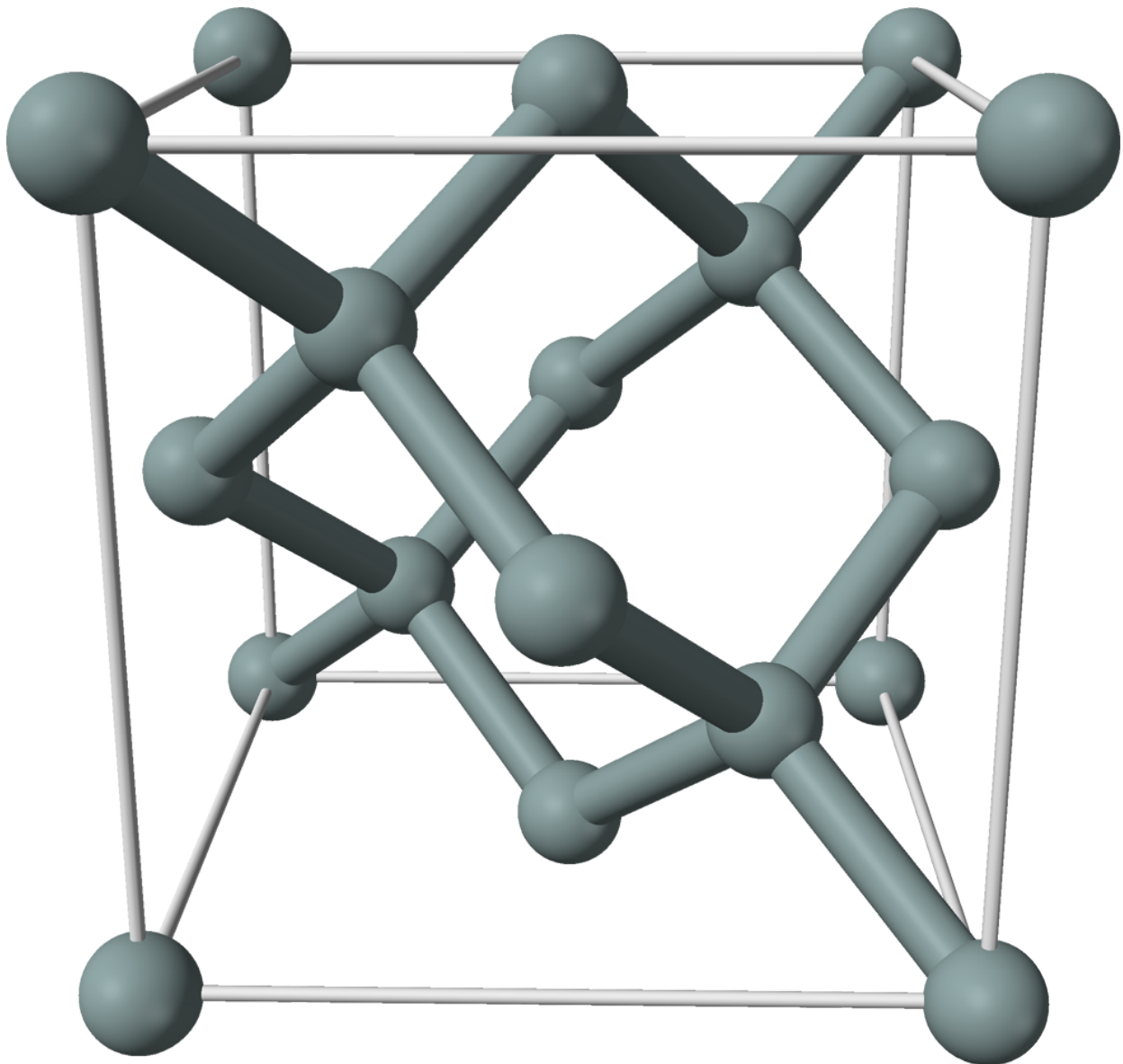
Afbeelding 4. Nogmaals: elektrongolven in een atoom.Een nauwkeurigere (maar minder inzichtelijke) schets, ditmaal wel in drie dimensies, van de vier manieren waarop een elektrongolf zich in de tweede schil van een atoom kan bevinden. Afbeelding: Wikipedia-gebruiker haade.

[Naar boven](#)

Doping

Laten we nu eens een specifieke halfgeleider bekijken: silicium - het materiaal waar veel computerchips van gemaakt zijn. Een siliciumatoom heeft 14 elektronen. Die elektronen zullen een toestand van zo laag mogelijke energie willen opzoeken, wat inhoudt dat ze proberen om zo dicht mogelijk bij de atoomkern te golven. De positief geladen kern en de negatief geladen elektronen trekken elkaar immers aan. Zoals we hierboven gezien hebben, betekent dat dat twee elektronen de binnenste schil zullen opzoeken; acht elektronen de volgende schil, en de overgebleven vier elektronen een buitenste, derde schil.

Het feit dat de buitenst schil maar deels gevuld is, heeft belangrijke gevolgen voor de kristalstructuur van silicium. Wanneer twee siliciumatomen elkaar dicht naderen, kunnen ze namelijk een paar van elektronen gaan delen. De elektronen gaan dan samen golven in een baan rond *beide* atoomkernen. Doordat twee atomen twee elektronen delen is de netto lading per atoom nog altijd hetzelfde, maar op deze manier wordt in de schil rond elke atoomkern nu een extra toestand opgevuld. Een siliciumatoom kan dit dus precies vier keer doen voordat zijn buitenste schil geheel gevuld is met acht elektronen. We zien dit terug in het kristalrooster van silicium (zie afbeelding 5): elk atoom heeft daarin precies vier naaste buren, waarmee het elektronparen deelt.



Afbeelding 5. Het kristalrooster van silicium.Een klein stukje van een siliciumkristal; het patroon in het bovenstaande kubusje herhaalt zich in alle richtingen. We zien dat elk siliciumatoom (de grijze bolletjes) exact vier naaste burens heeft. De elektronparen die de buuratomen delen zijn weergegeven als grijze staafjes.

Afbeelding: Ben Mills.

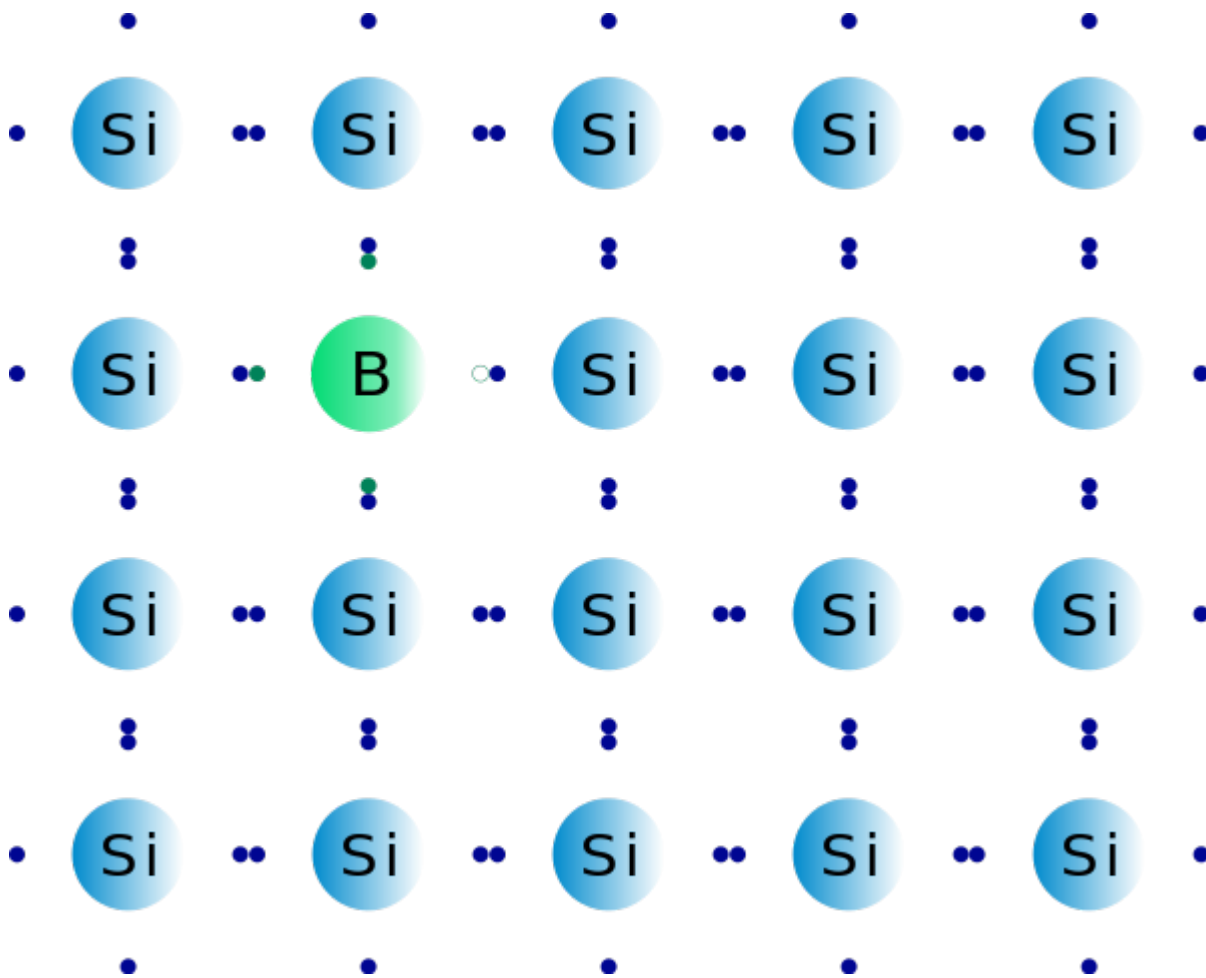
Deze structuur ligt aan de basis van het verschijnsel doping. Stel dat we in het kristalrooster van silicium één siliciumatoom vervangen door een fosforatoom. Fosfor heeft 15 elektronen, waarvan er dus 5 in de buitenste schil rondgolven. Het fosforatoom zal vier van zijn elektronen delen met de vier naburige siliciumatomen, maar daarmee heeft het nog één elektron in de buitenste schil over. Dit elektron zal maar heel zwak gebonden zijn aan de fosforkern, en het zal daardoor maar heel weinig energie kosten om dit elektron van het atoom los te maken en voldoende energie te geven om in de geleidingsband te komen. Voor elk fosforatoom dat we op deze manier in het rooster opnemen, is er dus één ‘bijna-vrij’ elektron dat heel gemakkelijk stroom kan geleiden. Een kleine hoeveelheid ‘vervuiling’ (oftewel: *doping*) met fosfor blijkt al voldoende te zijn om zo van silicium een goede geleider te maken. In de praktijk gaat het om aantallen van 1 op de 1000 tot 1 op de 1.000.000.000 atomen.

[Naar boven](#)

Géén elektron kan ook geleiden!

De vorm van doping die hierboven is beschreven wordt *n-doping* genoemd: doping door extra (negatief geladen) elektronen toe te voegen die gemakkelijk de geleidingsband kunnen bereiken.

Er blijft echter nog een tweede manier van doping te zijn, die *p-doping* genoemd wordt, waarbij de ‘p’ staat voor ‘positief’. Stel dat we in het kristalrooster van silicium nu niet een atoom door fosfor vervangen, maar door aluminium – een atoom met 13 elektronen. Aluminium heeft maar 3 elektronen in zijn buitenste schil; het komt dus een elektron tekort om met elk van zijn vier buuratomen een elektronpaar te delen. Het aluminium zal daardoor de neiging hebben om een extra elektron van één van zijn burens op te nemen, maar dat betekent vervolgens natuurlijk dat die buur een elektron tekortkomt.



Afbeelding 6. p-doping. Silicium met p-doping; in dit geval met een boor-atoom, dat ook drie elektronen in zijn buitenste schil heeft. Het boor-atoom kan één elektronpaar te weinig vormen, en er ontstaat dus een 'gat' dat opgevuld kan worden door naburige elektronen - die op hun beurt weer een gat achterlaten, enzovoort. Ook op deze manier kan stroom geleid worden.

Het buuratom kan vervolgens weer een elektron van een van zijn burens 'afsnopen', maar dan mist dat atoom weer een elektron, enzovoort. Op deze manier is het alsof een 'ontbrekend elektron' zich langzaam door het materiaal beweegt. Een dergelijk ontbrekend elektron wordt ook wel een *gat* genoemd, omdat er in feite een gat zit in de voorheen gevulde valentieband. Het netto effect is dat zich nu geen overtollige lading maar een ladingstekort verplaatst - iets wat natuurlijk nog steeds een elektrische stroom oplevert. Het gat gedraagt zich dus als een bewegende, *positieve* ladingsdrager - vandaar de naam 'p-doping'.

[Naar boven](#)

Moeilijk doen als het makkelijk kan?

De fysica van halfgeleiders is erg interessant, maar wellicht bekruipt de lezer de vraag: waarom moeilijk doen als het makkelijk kan? De natuur kent een enorm aantal geleiders, dus waarom zouden we door een ingewikkelde procedure doping willen aanbrengen in halfgeleiders om een effect te bereiken dat we in andere materialen veel gemakkelijker kunnen bewerkstelligen?

Het antwoord is: omdat er met halfgeleiders nog veel méér kan! De technologische toepassingen van halfgeleiders zijn bijna oneindig. Zo had de computer waarop u nu dit artikel leest niet kunnen bestaan zonder de verrassende eigenschappen van halfgeleiders. Om die eigenschappen te begrijpen, moeten we de ideeën van n-doping en p-doping combineren. Dat is dan ook het onderwerp van het volgende artikel in deze reeks.

[Naar boven](#)

Het zesde artikel in dit dossier verschijnt op vrijdag 5 mei.