



Bridge between research in modern physics
and entrepreneurship in nanotechnology

Kwantumfysica

De fysica van het allerkleinste met grootse toepassingen

Deel 2

KWANTUMEIGENSCHAPPEN & TECHNOLOGIE



Leerstation VII: Halfgeleiders



Quantum Spin-Off is funded by the European Union under the LLP Comenius programme (540059-LLP-1-2013-1-BE-COMENIUS-CMP).
Renaat Frans, Laura Tamassia, Erica Andreotti

Contact: renaat.frans@ucll.be

This material reflects the views only of the author, and the Commission cannot be held responsible for any use which may be made of the information contained therein.

Inhoudstabel

LEERSTATION VII : HALFGELEIDERS	3
1 Energieniveau's in atomen.	3
2 Niet allemaal in de laagste toestand	6
3 Energieniveau's in vaste stoffen: energie banden en band gaps	7
4 Geleiders, isolatoren en halfgeleiders	8
5 Het overbruggen van de band gap: dopering	9
5.a n-type dopering	9
5.b p-type dopering	11
6 Diode	12
7 Transistor	14
8 Toepassing: LED	15
9 Toepassing: Zonnecel	16
10 Toepassing: toekomst perspectieven	17
11 Concepten van leerstation VII	18

Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

Under the following terms:

- Attribution — You must give [appropriate credit](#), provide a link to the license, and [indicate if changes were made](#). You may do so in any reasonable manner, but not in any way that suggests the licensor endorses you or your use.
- NonCommercial — You may not use the material for [commercial purposes](#).

You can:

- Share — copy and redistribute the material in any medium or format
- Adapt — remix, transform, and build upon the material

The licensor cannot revoke these freedoms as long as you follow the license terms.

You have to refer to this work as follows:

Frans R., Boksebojm E., Tamassia L., Andreotti E. (2015) Quantum SpinOff Learning Station Semiconductors. Art of Teaching, UCLL, Diepenbeek, Belgium



Leerstation VII : Halfgeleiders

Kwantumfysica lijkt theoretisch en zelfs filosofisch. De mensheid had inderdaad een tijd nodig om in te zien welke toepassingen op grond van deze nieuwe inzichten konden ontwikkeld worden. Geleidelijk aan in de loop van de 20^{ste} eeuw is het duidelijk geworden dat een grondig begrip van licht, materie en hun interacties kan leiden tot verbazingwekkende toepassingen die onvoorstelbaar waren daarvoor!

Halfgeleiders hebben de unieke capaciteit om de stroom die daardoor vloeit te controleren. Dit maakt ze uiterst belangrijk in schakelingen zoals transistoren, zonnecellen, geïntegreerde circuits, microprocessoren en dergelijke waar een precieze controle van de stroom daardoor de werking ervan bepaalt.

Het controleren van elektrische stromen met behulp van halfgeleiders maakt het mogelijk om **niet-bewegende schakelaars** te bouwen. Het woord transistor is een soort samentrekking van "transfer resistor". Dit was een cruciale stap voor de mensheid. Voor de uitvinding van transistoren hadden rekenmachines en computers mechanische schakelaars met *bewegende* onderdelen. Hierdoor waren ze groot en traag. Maar met halfgeleiders was het mogelijk om transistoren te bouwen die *niet-bewegende* schakelaars zijn, wat hen snel en betrouwbaar maakte, met een beperkt gebruik van energie. De eerste transistor is in 1947 gemaakt door John Bardeen (nobelprijs fysica voor de uitvinding van de transistor), Walter Brattain en William Shockley bij AT&T Bell Labs in de Verenigde Staten.



Een aantal van transistoren (Bron: Wikipedia public domain)

Sindsdien is men transistoren gaan integreren op chips wat aanleiding heeft gegeven aan de snelle opkomst van elektronische apparatuur en telecommunicatie. **Zonder de inzichten van de kwantumfysica zouden geen van deze toepassingen mogelijk zijn.** Het belang van deze inzichten kan moeilijk worden overschat. Deze *niet-bewegende schakelaars* zijn alomtegenwoordig in medische apparatuur, in toestellen in het huishouden (van koffiezetapparaat tot de tv), harde schijven tot de smartphone. Zo goed als alles in onze moderne maatschappij gebruikt *halfgeleiders*.

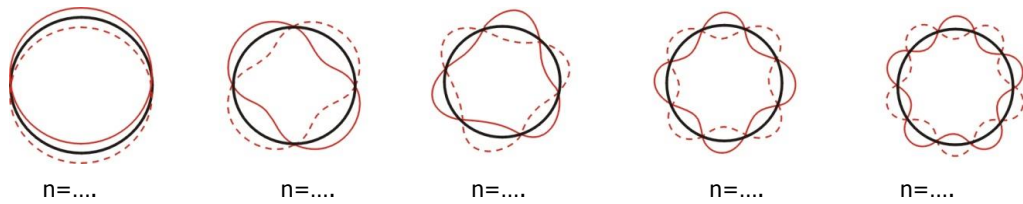
Laat ons daarom proberen om te begrijpen **waarom sommige vaste stoffen elektriciteit geleiden** (zoals metalen) en **andere dat niet doen**. We gaan ook materialen bekijken die men halfgeleiders noemt en proberen in te zien hoe ze zo een belangrijke rol zijn beginnen spelen in al onze elektronica. Het begint allemaal bij de discrete energieniveaus van elektronen in de atomen.

1 Energieniveaus in atomen.

In leerstation V heb je geleerd dat volgens de kwantummechanica de objecten in de realiteit (zoals tafels, elektronen en tulpen) zowel golf als deeltje zijn. Als gevolg hiervan kan een elektron dat **gebonden** is in een atoom niet om het even welke golflengte hebben. Zoals golven in een muziek instrument ontstaat er *kwantisatie* omdat enkel die **golven die met zichzelf constructief**

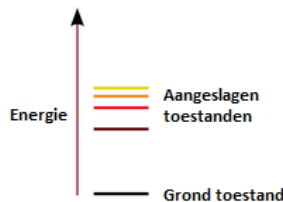
interfereren kunnen blijven bestaan. Daarom moet de golflengte van het deeltje voldoen aan de relatie van De Broglie:

$$n \lambda = 2 \pi r$$



Zoals je weet is λ de golflengte van het elektron, r is de straal van het atoom en n is een natuurlijk getal (bekend als het kwantumgetal). De figuur hierboven toont de elektron golf (de rode lijn) voor $n=1$, $n=2$, $n=3$, $n=4$ en $n=5$. Elk van deze elektronengolven heeft een bijhorende gekwantiseerde energie, die je voor het waterstofatoom in leerstation V hebt uitgerekend:

$$E_n = -\frac{1}{n^2} \frac{m e^4}{8 \epsilon_0^2 h^2}$$



Hier is e de elektrische lading van het elektron, h is de constante van Planck, ϵ_0 is een natuurconstante genaamd de permittiviteit van het vacuüm en n is het bijhorende kwantum getal voor elk van de energieniveaus.

In plaats van de elektronengolven altijd te tekenen, stellen we de **gekwantiseerde energieniveaus** voor op een verticaal as zoals op de figuur hierbij (Bron: Wikipedia Public Domain).

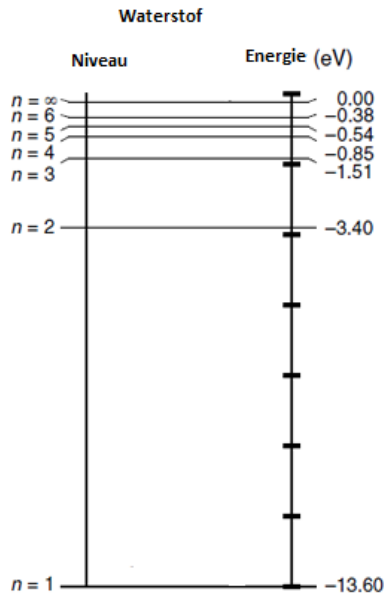
De onderste lijn komt overeen met de elektrongolf met de laagste energie, hetgeen overeenkomt met de trillingstoestand voor $n=1$ (zie tekeningen van de trillingstoestanden bovenaan de pagina). De tweede lijn komt overeen met de de trillingstoestand voor $n=2$. De lijnen stellen dus energieniveaus voor van de overeenkomstige trillingen van het elektron.

Wat zijn de energieën van de 3 eerste energieniveaus van een waterstof atoom (in Joule)? Reken ze uit.

$E_1 =$

$E_2 =$

$E_3 =$



Hiernaast staan de energieniveau's van waterstof voorgesteld op een verticale as.

In een waterstof atoom kunnen elektronen dus enkel energieën hebben die overeenkomen met de energieniveau's op de figuur hiernaast. We hebben dus **toegelaten energieniveaus** en een heleboel energieën die het elektron niet kan hebben.

Merk op dat de energie-as in *elektron volt* is uitgedrukt (met eV als afkorting), in plaats van de gewone eenheid van energie, namelijk Joule. Omdat Joule een zeer grote eenheid is voor de kleine energieën van elektronen, gebruikt men vaak de elektron volt in de plaats daarvan. *Gekwantiseerde energieniveau's van waterstof – bron: www.aplusphysics.com*

Zoek op: wat is de betekenis van een eV?

Hoeveel Joule is 1 eV?

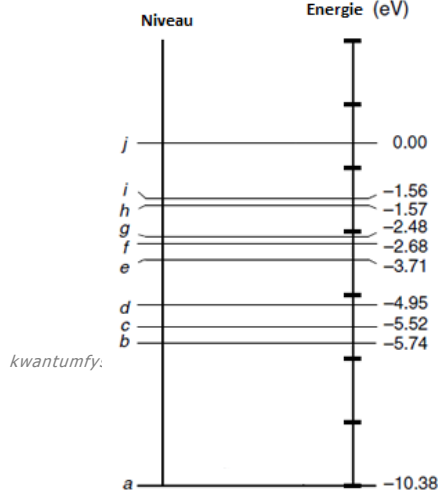
Elk element in het periodiek systeem der elementen heeft een unieke "ladder" van elektron energieniveaus. Men noemt dit het *energiespectrum* van dat element. Elke atoomkern is positief geladen en bindt een aantal elektronen. Het is dus het elektrisch veld van de kern dat de elektrongolven tot zich bindt.

Waterstof is het lichtste element van het universum: het bevat slechts proton in de kern en elektron dat daaraan gebonden is. Helium bevat protonen en elektronen. En zo stijgt het. Ze hebben allemaal discrete energieniveaus die specifiek zijn voor elk element.

Dit geeft aanleiding tot toegelaten energieën, specifiek voor elk element. De specifieke **configuratie van toegelaten energieniveau's bepalen de chemische eigenschappen** van elk element dat we waarnemen in de natuur.

Haupt-		-gruppen								Perioden								
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII											
100794 H									4,00260 He	1								
6,941 Li	9,01218 Be			10,81100 B	12,01070 C	14,00307 N	15,99840 O	18,99840 F	20,17970 Ne	2								
22,98977 Na	24,30500 Mg			26,98154 Al	28,08550 Si	30,97376 P	32,06500 S	35,45300 Cl	39,94800 Ar	3								
39,09830 K	40,07800 Ca	44,95591 Sc	47,86710 Ti	50,94150 V	51,99610 Cr	54,93805 Mn	55,93490 Fe	58,93320 Co	58,93320 Ni	59,92080 Cu	63,92980 Zn	68,92540 Ga	72,64000 Ge	74,92160 As	78,96000 Se	79,90400 Br	83,80000 Kr	4

(Bron: Wikipedia Public Domain)



Hiernaast staan de toegelaten energieniveau's van kwik.

De Oostenrijkse fysicus *Erwin Schrödinger* heeft de De Broglie materiegolven veralgemeend. Met het model van De Broglie was men namelijk slechts in staat om de energieniveaus van waterstof te berekenen. De Schrödinger vergelijking daarentegen beschrijft

otse toepassingen

een *3-dimensionaal* elektrongolf rond de kern die we kennen als de elektron "**orbitalen**".

De mogelijke elektron orbitalen met hun **gekwantiseerde energieën** konden worden uitgerekend en bepaald, niet alleen voor waterstof, maar voor elk chemisch element in het periodiek system. De Schrödinger vergelijking bleek een correcte beschrijving te geven van de golf-deeltjes zowel binnen als buiten het atoom.



*Erwin Schrödinger heeft in 1926 zijn vergelijking voorgesteld dat de zogenaamde golf-functie van elke kwantumdeeltje beschrijft
Bron: Wikipedia Public Domain)*

2 Niet allemaal in de laagste toestand

Door de opsluiting van de elektronen in de atomen, en door hun golf karakter, zijn hun energieën duidelijke gekwantiseerd. Maar een fundamentele vraag, die al gesteld is geweest door Niels Bohr blijft bestaan: **waarom zitten alle elektronen niet gewoon samen in het laagste energieniveau** van het atoom?

Het is duidelijk dat indien alle elektronen van de atomen in het laagste energieniveau zouden zitten, de chemische eigenschappen van de elementen dezelfde zouden zijn, er zouden geen spectraallijnen bestaan, geen kleuren. Het zou amper zinvol zijn om over verschillende elementen te spreken. En al zeker geen moleculen. Deze worden gecreëerd doordat de buitenste elektronen van verschillende atomen (dat zijn de elektronen in het hoogste energieniveau) met elkaar interageren waardoor een gemeenschappelijk energieniveau ontstaat met lagere energie, hetgeen de binding mogelijk maakt. Indien alle elektronen in het laagste niveau zouden er amper chemische reacties mogelijk: we zouden in een saai universum leven. Waarschijnlijk zou er daar helemaal geen leven bestaan!

De rijkdom van de atomaire en moleculaire structuur die we rond ons zien kan begrepen worden aan de hand van het *uitsluitingsprincipe* van Wolfgang Pauli:

Het uitsluitingsprincipe van Pauli voor elektronen kan vergeleken worden met studenten die een zitje proberen te vinden een grote klaslokaal. De studenten proberen zo ver mogelijk van de leerkracht te gaan zitten. Spijtig genoeg voor sommigen, kunnen ze niet allemaal op de stoel zitten die het verst is van de leerkracht. Wat zal een student doen indien hij/zij de klas binnenstapt en opmerkt dat de stoel het verst van de leerkracht al is ingenomen?

.....

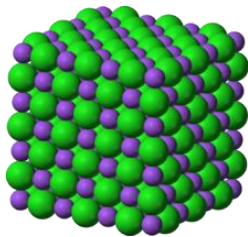
Elk student moet zich tevreden stellen met de verste stoel van de leerkracht die nog beschikbaar is. Als er veel meer stoelen dan studenten zijn, zal het lokaal opgevuld zijn beginnende van achter tot op een zeker punt.

Elektronen gedragen zich op een gelijkaardige manier. Elk *energieniveau* heeft een aantal "zitplaatsen", zogenaamde "*toestanden*", waarin het elektron zich kan bevinden. En indien deze vol zijn, moet een ander elektron in een ander, *mogelijks hoger energieniveau* gaan zitten. Het **verbod voor elektronen om in dezelfde toestand te zitten** staat bekend als het **uitsluitingsprincipe van Pauli**.¹ Elektronen zullen de toegelaten energieniveau's van laag naar hoog opvullen.

Zoals je uit de lessen chemie weet zijn de buitenste elektronen van een atoom belangrijk voor de chemische binding en heeten ze *valentie elektronen*. Valentie elektronen van naburige atomen kunnen met elkaar interageren om gemeenschappelijke gebonden energieniveau's te maken. In de volgende paragraaf bestuderen vaste stoffen.

3 Energieniveau's in vaste stoffen: energie banden en band gaps

De vraag die we willen bespreken is wat er gebeurt met de energieniveau's in het geval dat men vele atomen samen neemt zoals in een vaste stof. Veel vaste stoffen bestaan uit een gigantisch groot aantal atomen die allemaal geordend zijn in een gestructureerd rooster om een kristal te vormen. Welk kristal is hiernaast geschetst?



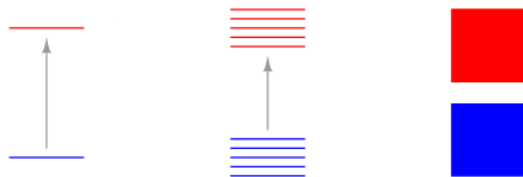
(hint: de blauwe en groene atomen stellen Na en Cl voor)

.....

Bron: Wikipedia Public Domain

Laat ons beginnen met een gemakkelijker geval waarin we slechts 5 atomen naast elkaar beschouwen. Elk van die atomen heeft zijn eigen energieniveau's. De energieniveau's van de individuele atomen kunnen *overlappen met die van de naburige atomen*. Ze vormen een nieuw gemeenschappelijk orbitaal. Door het uitsluitingsprincipe van Pauli, kunnen de verschillende elektronen in een kristal niet in eenzelfde toestand zijn. Als gevolg hiervan zullen de energieniveau's van de atomen **verschuiven**. Sommige wat naar boven en andere naar onder.

Bovendien, indien men een groot aantal atomen neemt, zullen hun energieniveau's een dichte verzameling energietoestanden vormen (de rode en blauwe



Eén atoom

Vijf atomen

Veel atomen

neutronen, protonen en dergelijke aan sluitingsprincipe noemt men "fermionen".

Fotonen daarentegen kunnen in eenzelfde toestand zitten. Deeltjes zoals fotonen die niet gehoorzamen aan het uitsluitingsprincipe noemt men bosonen.

banden op de figuur). Als er veel atomen aanwezig zijn, zijn de energieniveau's van de individuele atomen niet meer onderscheidbaar van elkaar: ze vormen een **energie band**.

Bron figuur www.allaboutcircuits.com

Laat dit aan elektronen toe om in verschillende toestanden te zijn in het kristal, vergeleken bij de atomaire energietoestanden? Hoe?

.....

Bovendien is er in een kristaal een herhalend patroon, een terugkerende volgorde van de atomen: een kristal is periodisch. De elektronen zitten gevangen in een periodiek potentiaal gevormd door de rooster atomen. Dit heeft als gevolg dat sommige energieniveau's elkaar uitdoven. Hierdoor kan een zogenaamde **band gap** ontstaan. Dus *de energieniveau's zijn gegroepeerd in band, die van elkaar worden gescheiden door **energie band gaps**.*

We krijgen intervallen van energie waarin de toegelaten energieën zich bevinden (de blauwe en rode delen op bovenstaande figuur), en een gap daartussen waar geen toegelaten energieën zijn. De band gap is van fundamenteel belang voor het elektronisch gedrag van vaste stoffen.

In de tweede helft van de 20^{ste} eeuw is het gebleken dat de elektronische, niet bewegende schakelaars, en kleppen kunnen maken, door het manipuleren van deze band gaps. In wat volgt zullen we ook nog zien hoe dit kan worden gebruikt in technologische toepassingen.

4 Geleiders, isolatoren en halfgeleiders

Met de idee van band gap kunnen we ook begrijpen hoe het komt dat sommige materialen elektriciteit geleiden en andere dat niet doen.

Elektronen hebben energie nodig om uit de lagere **valentie band** te ontsnappen naar de energie band erboven: de zogenaamde **conductie band**. In dat hoger energieniveau zijn de elektronen *niet meet gebonden aan hun atoom*, maar min of meer *verspreid* over het kristal. Ze kunnen in het rooster "bewegen" en zo een elektrische **stroom** vormen.

Op welke manieren zouden elektronen energie kunnen krijgen om naar een hoger energieniveau te gaan?

.....

Indien de verkregen energie afkomstig is van *licht*, noemt men dit het **intern foto-elektrisch effect**. Dit wordt gebruikt in **foto-diodes** en in **zonnepanelen**.

Wat is volgens jou de voorwaarde op energie van het licht, zodat het in staat is om een elektron van de valentie band naar de conductie band te brengen?

.....

Aangezien de gap overeenkomt een *bepaald energie verschil*, moet het licht genoeg energie bezorgen zodat het elektron die gap kan overbruggen. Hoe kleiner de band gap, hoe gemakkelijker de elektronen die kunnen overbruggen om naar de conductie band te gaan.

Zoals je weet geleiden sommige materialen beter elektriciteit dan andere. Welke zijn goede geleiders?

.....

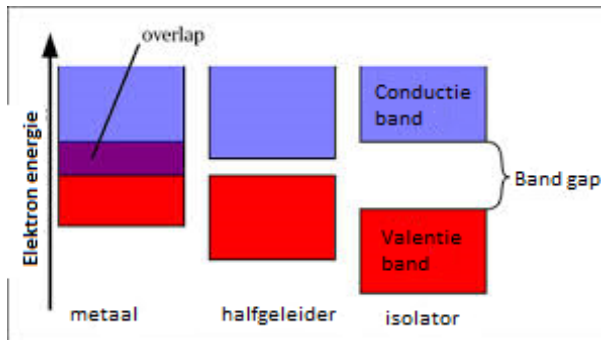
Welke materialen zijn slechte elektrische geleiders?

.....

Kan de elektrische geleiding worden verklaard aan de hand van band gap kwantummodel?

Het verschil tussen een geleider en een isolator is te wijten aan de *grootte* van de band gap. Verwacht dat geleiders of isolatoren een groter band gap zouden hebben?

Metalen hebben helemaal geen band gap, waardoor elektronen gemakkelijk van de valentie band naar de conductie band kunnen gaan. Hierdoor kunnen elektronen gemakkelijk bewegen in metalen. **Isolatoren** hebben daarentegen een **grote** band gap waardoor stroom moeilijker daardoor kan vloeien.



Een **halfgeleider** is een materiaal dat weldegelijk een band gap heeft, maar een **kleine**. Als men een kleine hoeveelheid energie geeft aan de elektronen daarin, gedraagt het zich als een isolator. Maar als ze veel energie krijgen, gaan halfgeleiders stromen geleiden. Vandaar hun naam.

(Bron: solarcellcentral.com)

De halfgeleiders bevinden zich in groep 14 van het periodiek system. Welke elementen zijn halfgeleiders?

Groep 14 werd oorspronkelijk groep 'IV' genoemd. Wat betekent de "IV" of de '4' in '14' in termen van valentie elektronen?

In een gewone halfgeleiders, bestaande uit elementen in groep 14, heeft elk atoom bindingen met zijn burens.

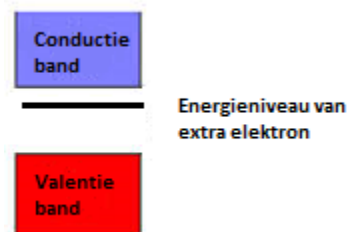
5 Het overbruggen van de band gap: dopering

De **band gap** van halfgeleiders is **te groot** om een stroom te krijgen door het kristal: er zijn te weinig elektronen die de band gap kunnen overbruggen. Bij normale omstandigheden, kan gemiddeld slechts één atoom in de duizend miljoen elektronen bijdragen voor de elektronische conductie in halfgeleiders. Dit in tegenstelling tot een metaal, waarbij zo goed als alle atomen elektronen bezorgen voor de conductie. Zou het mogelijk zijn om iets er tussen te maken.

5.a n-type dopering

Zouden we de band gap kunnen verkleinen? Zou het mogelijk zijn om elektronen toe te voegen waarvan de energieniveau's ergens in de band gap zouden liggen zoals op de figuur hiernaast?

Men kan dit effectief doen door een proces die dopering heet: het toevoegen aan het kristal van



“vreemde” elementen **met één extra elektron** (vergeleken met groep IV). Zoals je weet hebben ongebonden elektronen een hoger energieniveau vergeleken met de gebonden elektronen. Dit is de reden dat het nieuw energieniveau veroorzaakt door de dopering, hoger is dan de valentie band, een beetje onder de bestaande conductie band.

In welke groep vinden we elementen met één valentie elektron meer?

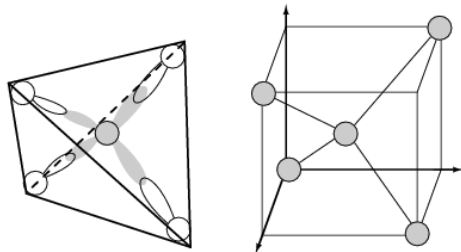
.....

Welke elementen zouden in principe bruikbaar zijn voor dit proces?

.....

Meestal wordt één in elk miljoen atomen vervangen in het kristal. Het nieuw atoom is vaak P (fosfor). Fosfor heeft elektronen op zijn buitenste schil. van deze elektronen zullen een binding aangaan met hun naburige atomen (Si of Ge). Maar het vijfde elektron heeft geen ander elektron om mee te binden. We hebben eigenlijk de conductie band verlaagd door deze ongebonden elektronen toe te voegen. Elektronen kunnen dit nieuw energieniveau gebruiken om zich los te maken van hun binding en zo door de halfgeleider stromen.

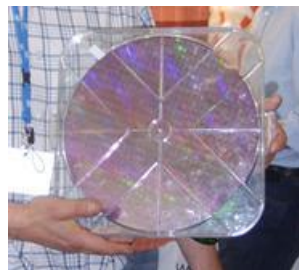
Zo een halfgeleider gedopeerd met elementen uit groep V (die een extra elektron hebben), staan bekend als **n-type halfgeleiders**, omdat het de negatief geladen elektronen zijn die bijdragen tot de conductie in het materiaal.



In gebruikelijke elektronische toepassingen wordt er gebruik gemaakt van silicium in zijn kristallijne toestand. De kristalstructuur van Si is eigenlijk die van diamant, waarin elk silicium atoom gebonden is aan zijn vier naaste naburen

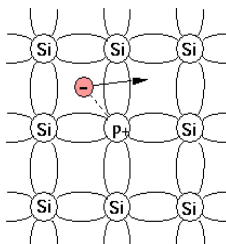
om samen een tetraëder te vormen.

Tetrahedrale binding van Si atomen vormt 1/4 van de kubische eenheidscel – bron: www.allaboutcircuits.com



Kristallijne silicium klaar om er wafers uit te snijden (bron: Wikipedia Public Domain)

Chip ontwikkelaars zoals Intel, hun Very Large Scale Integration Microprocessors op een silicium wafer afkomstig uit één enkel kristal (bron: Wikipedia Public Domain)



Ondanks het feit dat de kristalstructuur van silicium tetrahedraal is, wordt het gedopeerd kristal soms voorgesteld op een vlak

(Bron figuur: Wikipedia Public Domain)

5.b p-type doping

Zou het mogelijk zijn om de band gap te verkleinen door een energieniveau toe te voegen dicht bij de onderkant van de gap zoals op de figuur hiernaast?



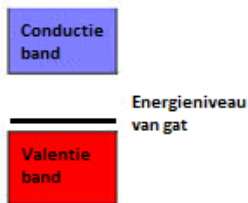
Misschien kunnen we hiervoor gebruik maken van het tegenovergestelde: in plaats van een elektron op overschot, laat ons zoeken voor een element met een **elektron te weinig** (vergeleken met groep IV). In welke groep zijn de elementen met één valentie elektron te weinig?

.....

Welke elementen zouden in principe bruikbaar zijn voor zo een soort doping?

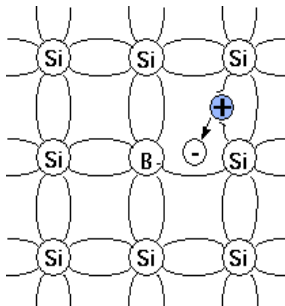
.....

Deze chemische elementen hebben slechts elektronen in hun buitenste schil. van deze elektronen zullen een binding aangaan met hun burens (Si of Ge).



Het doperen met atomen uit groep III zorgt ervoor dat er bepaalde plaatsen een *afwezigheid van een binding* is. Zoals je weet hebben bindingsorbitalen een lagere energie dan hun niet gebonden tegenhangers. Dus de afwezigheid van een binding laat daar een (leeg) energieniveau, net boven de valentie band. Aangezien het slechts een kleine energetische stap is voor de elektronen om van de valentie band naar dat energieniveau te springen (die men ook een

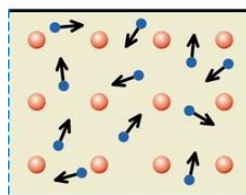
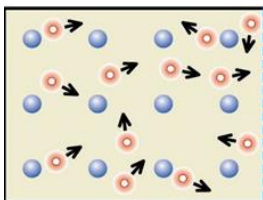
"holte" of een "gat" noemt), zullen sommige elektronen die sprong effectief uitvoeren. Door dit te doen laten ze een ander "gat" achter (ze laten namelijk de afwezigheid van een binding achter) elders in het kristal. Dit veroorzaakt een nieuw energieniveau dat "gemakkelijk bereikbaar" is dicht bij de valentie band. Hierin kunnen weer andere elektronen naartoe springen. Zo ontstaat dus een beweging van elektronen, en dus een stroom!



Voor deze zogenaamde **p-type doping** kan men bijvoorbeeld Boor gebruiken ("p" staat voor positief, omdat het de positief geladen gaten zijn die voor de conductie zorgen). Men kan het leeg energieniveau, het gat, beschouwen als een positief geladen deeltje. Dit omdat het tegengesteld beweegt aan de negatief geladen elektronen. Men zegt dat in de p-type halfgeleiders men een "gaten stroom" heeft.

Vergeet wel niet dat het fysisch gezien nog steeds de elektronen zijn die bewegen vanuit naburige atomen, en op hun beurt daardoor "gaten" achterlaten.

Welk van onderstaande figuren is een p-type en welk een n-type halfgeleider?



.....

.....

6 Diode

Nu dat we een stroom kunnen sturen door een halfgeleider willen we meer: we willen stromen kunnen controleren aan de hand van andere stromen!

Eén van de gemakkelijkste dingen die we kunnen doen is een p-type plakken tegen een n-type (dit heet een **pn-junctie**). Hiermee hebben we een *diode* gemaakt, een soort **elektronische klep** die stroom doorlaat in één richting maar niet de andere.

Door dit 'ophouden van stroom' wordt het bijvoorbeeld mogelijk een deel van een schakeling onder hoge spanning te houden zonder dat de stroom kan wegvloeien naar een ander deel. Op die manier kan men bijvoorbeeld een logische "1" voorstellen in een elektrisch circuit.

Dit is het begin van alle elektronica! Laat ons nu zien hoe dit allemaal werkt!

Als we een p-type halfgeleiders plaatsen tegen een n-type, welke bevat meer vrije elektronen?

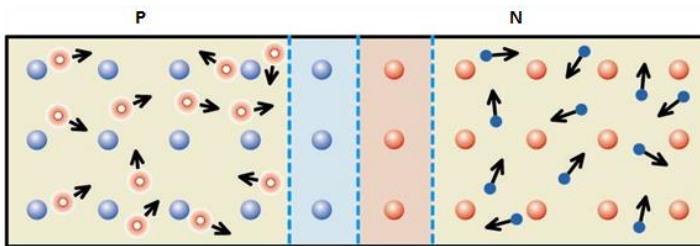
.....

En welke bevat meer gaten?

.....

Wat zal er op de grens gebeuren tussen beide materialen?

.....



Diffusie

Hetgeen daar gebeurt is vergelijkbaar met wat er gebeurt indien je een druppeltje inkt in een water glas steekt. Wat ziet je de inkt doen (zelfs zonder te roeren)?

.....

Bron figuur: Wikipedia public domain

Het spontaan verspreiden van de druppel in het water heet diffusie. Zo een diffusie van ladingen zal ook gebeuren op de grens tussen beide halfgeleiders. Vrije elektronen uit het n-type zullen migreren naar het p-type om daar de gaten op te vullen.

Hierdoor is er een gebied rond de pn-junctie waar geen vrije ladingsdragers meer zijn. We noemen het daarom de **uitputtingszone**.

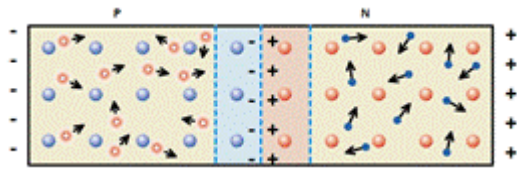
Aangezien elektronen zich hebben verplaatst, heeft lading zich verplaatst.

Aangezien elektronen naar de p-type gaan, zal deze (Positief/Negatief) worden geladen.

Aangezien elektronen uit de n-type komen, zal deze (Positief/Negatief) worden geladen.

De gemigreerde ladingen zullen een elektrisch veld creëren dat de diffusie zal doen afnemen (zoals op de grens van de pn-junctie op de figuur). Het elektrisch veld maakt het moeilijker voor bijkomende elektronen om de grens over te steken. Kun je dit verklaren?

.....

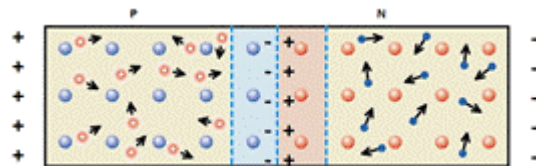


Indien men nu een batterij vastmaakt aan de pn-junctie, met de positieve kant aan de n-type en de negatieve kant aan de p-type, verwacht je een stroom te zien door de uitputtingszone? Waarom (niet)?

.....

Aangezien de negatieve kant van de batterij vast in contact is met de negatieve kant van de uitputtingszone en de positieve uiteinde van de batterij met de positieve kant van de uitputtingszonen zal er geen stroom lopen. Dit omdat gelijke ladingen elkaar afstoten. We zeggen dat de pn-junctie 'in sper' staat.

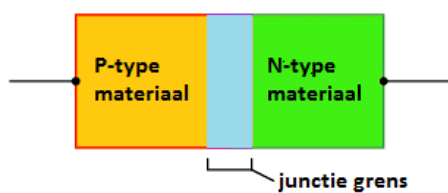
Indien de batterij wordt omgedraaid krijgen we de situatie hieronder.



Zal er nu wel een stroom vloeien? Waarom?

.....

De positieve kant van de batterij zal de gemigreerde elektronen in de p-type aantrekken. De negatieve kant van de batterij zal de positief geladen gaten aantrekken in de n-type (het zijn eigenlijk elektronen die de andere kant uit bewegen). Het elektrisch veld dat de migratie tegenhield verdwijnt (of vermindert ten minste) zodat er opnieuw een stroom kan gaan door de grens van de pn-junctie. We zeggen dat de pn-junctie "in doorlaatrichting" geschakeld is.



Het symbool dat voor de diode wordt gebruikt in circuits



Een diode, met een markering aan de negatieve kathode. Dit om te weten in welke richting het

de plaatsen in een elektrische kring.

(bron: Wikipedia public domain)

De diode heeft ook een paar simpele toepassingen. Het wordt onder andere gebruikt in de meeste toestellen waarin men batterijen nodig heeft. Dit om te vermijden dat er stroom vloeit indien de batterij met de verkeerde polarisatie wordt ingestoken. Ze worden ook nog gebruikt in gelijkrichters, die wisselspanning omzetten in gelijkspanning.

Diodes in sper worden ook gebruikt voor het maken van detectoren die radioactieve of kosmische emissies kunnen meten. De detective van een deeltje zorgt er dan voor dat de junctie even geleidend wordt.

Deze detectoren worden bv. gebruikt in deeltjesversnellers zoals die van CERN in Genève, of in experimenten waar kosmische emissies worden gemeten. Maar met dit type van detectoren meet men ook de mate van nucleaire emissies in kerncentrales of ziekenhuizen.

7 Transistor

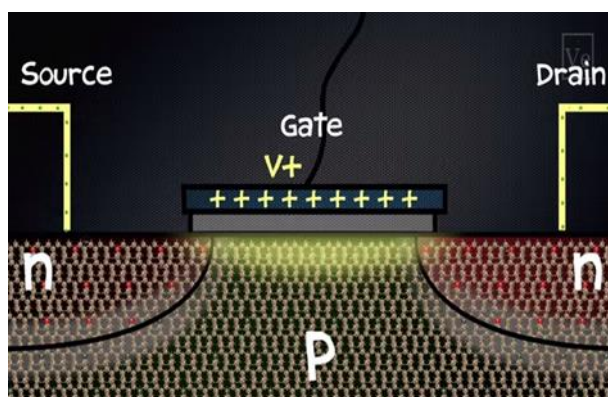
Het lijkt een enorme stap om van de materiegolven van De Broglie te gaan tot de moderne computer en elektronische apparatuur. Maar dit zijn dingen die wel eens gebeuren in fysica: gewoon door de wereld proberen te begrijpen ontstaan er nieuwe kansen en nieuwe mogelijkheden die men anders niet zou hebben kunnen bedenken.

We weten ondertussen hoe we een schakeling moeten maken die stroom in een richting toelaat maar niet in de andere: de diode. Wat gebeurt er nu indien we 2 van die diodes tegen elkaar sandwichen? Laat ons een p-halfgeleider plaatsen tussen twee n-halfgeleiders.

Zo een schakeling heet een transistor en het belang daarvoor voor zo goed als al onze elektrische toestellen kan amper overschat worden (men kan even goed een t-type plaatsen tussen twee p-types).

Je zult hoe dan ook twee pn-juncties krijgen, in plaats van één enkele zoals bij de diode. In zekere zin hebben we 2 diodes in tegengestelde zin achter elkaar geplaatst. Dit doelt lijkt op het eerste zicht nogal nutteloos aangezien er geen stroom door kan vloeien aangezien elk van diodes de stroom in één van de richtingen tegenhoudt.

De p-type in het midden is negatief geladen door de elektron die daarnaartoe zijn gemigreerd van elk van de n-types. Elektronen die proberen om van de source (de linker n-type) naar de drain (de rechter n-type) worden tegengewerkt door de negatieve ladingen op de pn-junctie. Er kan geen stroom vloeien door de transistor. Het is in de "uit" toestand.



Elk van de buitenste halfgeleiders is verbonden met een draad (links de source en rechts de drain). De middelste halfgeleider heet de gate.

Het doel is om toch een stroom te sturen van de source naar de drain.

Bron Veritasium Science Blog: How a transistor work?

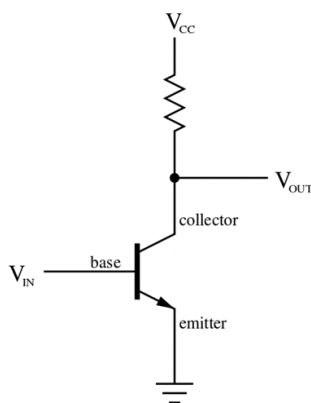
Wat gebeurt er nu indien je een

spanning aanlegt op de gate?

Indien daar een positieve spanning op wordt aangelegd, dan heft deze het effect van de negatieve ladingen aan de pn-junctie op. Hierdoor kan er wel stroom vloeien van de source naar de drain. De transistor is nu in de "aan" toestand.

Indien de spanning op de gate wordt weggenomen springt de transistor terug in de "uit" toestand. We hebben zo een schakelaar zonder bewegende onderdelen! Deze transistoren kunnen gemakkelijker in grote getallen worden geproduceerd dan mechanische schakelaars. Bovendien kunnen ze microscopisch klein worden gemaakt.

Het is opmerkelijk dan gewoon door de eigenschappen van een Kristal te benutten, we in staat blijken te zijn om een schakelaar te



bouwen die aan of uit kan worden gezet, gewoon door een spanning al dan niet aan te leggen op de gate. Omdat dit allemaal elektronisch is, zonder bewegende mechanische onderdelen, kunnen deze transistoren enorm snel aan en uit worden geschakeld zodat vele operaties op een korte tijd kunnen worden uitgevoerd. Dit vergt bovendien minder energie vergeleken met mechanische schakelaars.

Een transistor heeft 2 voornaamste toepassingen: het werkt als een schakelaar, of het kan als een versterker worden gebruikt. Hiernaast zie je een schakeling met een transistor daarin.

8 Toepassing: LED

In een LED (light emitting diode of licht uitzendende diode) verliezen elektronen in de hogere conductieband energie in de vorm van licht. Ze "vallen" dus door de energie gap en daarbij zenden ze licht uit.

Zullen deze uitzendingen van energie in bepaalde vaste hoeveelheden zijn, of kunnen elektronen om het even welke hoeveelheid energie afgeven hierbij?

.....

Het band gap kwantummodel van vaste stoffen, samen de relatie van Einstein-Planck voorspelt dat de energie gap (GROTER/KLEINER/GELIJK) is voor blauw licht dan voor rood licht. Leg uit waarom.

.....



Zou een blauwe led meer voltage nodig hebben dan een rode om op te lichten? (Ja/Nee) Waarom?

.....

Experiment: Neem een led en een veranderlijke spanningsbron. Meet met een multimeter bij welke spanning de led aangaat. (Denk eraan om gelijkspanning aan te leggen over de led in de juiste richting).

Kleur van de led	U (V)
Rood	
Geel	
Groen	
Blauw	

Is de voorspelling van de kwantumtheorie en het band gap model hiermee in overeenkomst? Ja/Nee

9 Toepassing: Zonnecel

Je weet dat zonnepanelen elektriciteit kunnen generen.

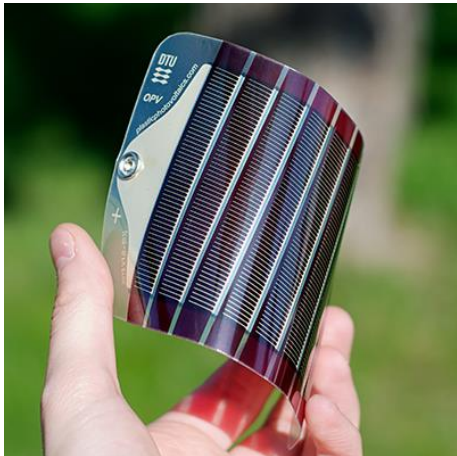
Kun je bedenken – op basis van het band gap model – wat er in principe zou kunnen gebeuren in de stof waaruit een zonnecel is gemaakt zodat er elektriciteit zou worden gegenereerd?

.....

Een zonnepaneel werkt dus op basis van het intern foto-elektrisch effect.

Denk je dat er een verband moet zijn tussen de grootte van de band gap en de kleur van het licht waarbij de zonnepaneel werkt? Verklaar je redenering.

.....



De halfgeleiders in zonnecellen zijn op basis van silicium of germanium. Op dit moment is er ook veel onderzoek naar het maken van zonnepanelen van organische halfgeleiders, met name gebaseerd op koolstof. Deze zouden interessante en veelbelovende eigenschappen hebben waaronder buigbaarheid. Dit zou het gemakkelijker maken om ze te plaatsen op daken, tenten, boten, auto's, enz. Voor het moment is hun efficiëntie en stabiliteit echter nog (ver) onder die van de niet organische tegenhangers.

Organische zonnecellen doen denken aan natuurlijke processen, zoals fotosynthese in planten, waar de energie van het licht wordt gevangen op het moleculair niveau.

Bron: plasticphotovoltaics.org

10 Toepassing: toekomst perspectieven

In het huidig onderzoek probeert men transistoren in de nano- en sub-nanoschaal te maken. Dit zijn groottes vergelijkbaar met de grootte van de atomen zelf waardoor er nieuwe fysieke grenzen worden bereikt. Op die schaal spelen fenomenen zoals verlies als gevolg van kwantumtunneling of te trage signaalverwerking als gevolg van de eindigheid van de lichtsnelheid. Indien er geen manieren worden bedacht om deze grenzen te omzeilen zou de snelheid waarmee nieuwe technologieën werden ontwikkeld de laatste 50 jaar wel wat kunnen vertragen.

Er zijn bijna 5 miljard transistoren op een huidig Intel 22nm processor (de zogenaamde Xeon Phi processor familie). De structuren op een chip zijn zo klein geworden dat ze al veel kleiner zijn dan een menselijke cel, bacteriën of zelfs virussen. Er worden doorbraken verwacht in het domein van bio-sensoren, nieuwe toepassingen in de gezondheidszorg en biowetenschappen. De mogelijkheid bestaat om volledige laboratoria te vervangen door kleine, relatief goedkope, snelle en nauwkeurige "labo's op en chip". Dankzij deze ontwikkelingen kunnen aandoeningen zoals kanker op in een vroeg stadium (en indien nodig continu) worden vastgesteld. Sommige testen die nu nog in een dokters praktijk of zelfs in ziekenhuizen worden uitgevoerd zouden van bij u thuis kunnen worden gedaan.

Het is duidelijk dat toepassingen van halfgeleiders die nog ontwikkelend moeten worden ons zullen helpen om bepaalde uitdagingen van de moderne tijden zoals de klimaatverandering, gezondheidsproblemen en duurzame energiebronnen vinden aan te gaan.

11 Concepten van leerstation VII

Klassieke concepten

Geen!

Kwantumconcepten

Elk energieniveau heeft een aantal "toestanden", waarin het elektron zich kan bevinden. Indien deze vol zijn, moet een ander elektron in een ander, mogelijks **hoger** energieniveau gaan zitten. Het verbod voor elektronen om in dezelfde toestand te zitten staat bekend als **het van Pauli.**

De specifieke configuratie van toegelaten energieniveau's bepalen de (*fysiche/chemische*) **eigenschappen** van elk element in het periodiek systeem der elementen.

Door het *uitsluitingsprincipe van Pauli*, kunnen de verschillende elektronen in een kristal niet in eenzelfde toestand zijn. Als gevolg hiervan zullen de energieniveau's van de atomen **verschuiven**. Deze zullen een dichte verzameling van energietoestanden vormen en de energieniveau's van de individuele atomen zullen niet meer van elkaar onderscheidbaar zijn: ze vormen een **energie**

Energie banden in een kristal worden van elkaar gescheiden door **energie band.....**