

2 Combinaties van PN-juncties

Ing. Patrick Van Houtven

2 Dioden

Outline

- 2-1 Atoomstructuur van halfgeleiders
- 2-2 PN-junctie
- 2-3 Instellen van de diode
- 2-4 Diodekarakteristieken

Doelstellingen

- Omschrijven van de atoomstructuur van halfgeleiders
- Beschrijven van de karakteristiek van een PN-junctie
- Verklaren hoe een diode wordt ingesteld

2-1 Atoomstructuur van halfgeleiders

Elektronische componenten zoals dioden en transistoren zijn gemaakt van halfgeleidermateriaal.

Deze sectie handelt over het basisprincipe hoe halfgeleiders werken.

Wat moet je kunnen?

- Je omschrijft de atoomstructuur van halfgeleiders
- Je omschrijft hoe Si- en Ge-atomen kristallen vormen
- Een vergelijking maken tussen de energieniveaus in een geleider, halfgeleider en isolator

2-1 Atoomstructuur van halfgeleiders

Elektronenschillen en banen (blz. 43)

De elektrische eigenschappen van een materiaal kunnen verklaard worden aan de hand van hun atoomstructuur. Fig. 2,1 toont een Si-atoom volgens het Bohr-model.

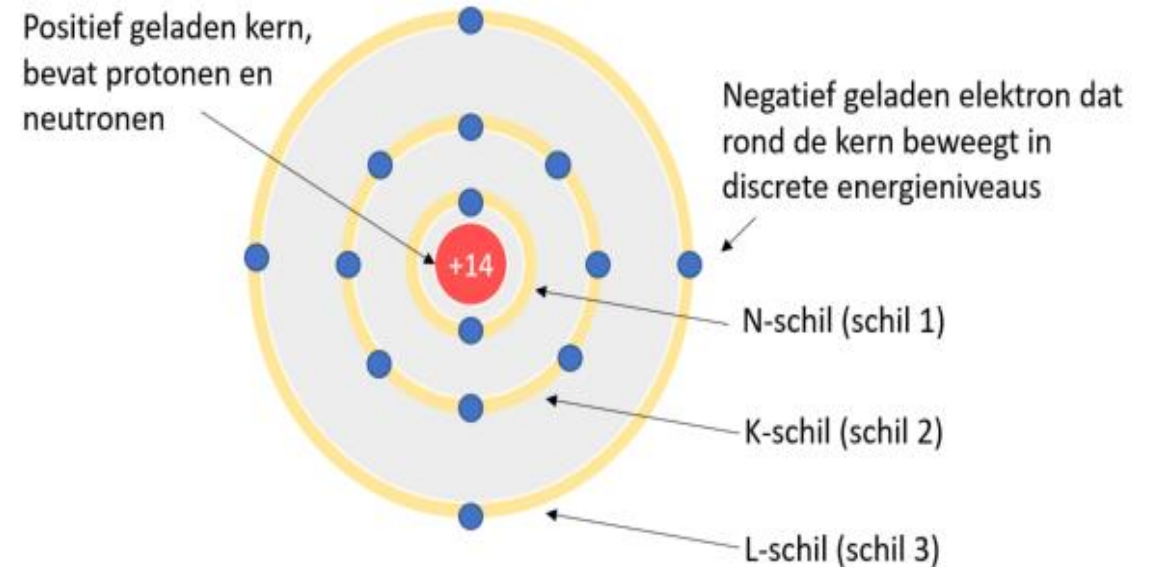
Opbouw atoom;

- Kern (nucleus) bevat positieve ladingen (protonen) en ongeladen deeltjes (neutronen)
- De elektronen die in een baan rond de kern bewegen zijn negatief geladen. Vanuit de quantummechanica weet men dat elektronen in feite een soort van “materie golven” zijn.

De afstand tot de kern bepaalt de hoeveelheid **energie** van een elektron. Hoe dichters bij de kern, hoe kleiner de hoeveelheid energie dat een elektron bezit.

Elektronen bewegen zich in bepaalde gebieden rondom de kern, deze worden **schillen (shells)** genoemd.

- Iedere schil kan maar een bepaald maximum elektronen bevatten.
- Het verschil in energieniveau's binnen een schil is veel kleiner dan het verschil in energieniveau's tussen twee schillen.
- De schillen worden genoemd met nummers 1, 2, 3, enz. Waarbij de schil met nummer 1 het dichtst bij de kern ligt (zie figuur 2-1). Een alternatieve benoeming van de schillen is een aanduiding met letters (K, L, M, ...)



2-1 Atoomstructuur van halfgeleiders

Valentie-elektronen, geleidingselektronen (conduction electrons) en ionen

Elektronen die zich in banen verder van de kern bewegen zijn minder sterk gebonden aan de kern dan de elektronen die in banen dicht bij de kern bewegen.

- Reden: aantrekkingskracht tussen de positieve kern en de negatief geladen elektronen is het groots het dichtst bij de kern en neemt af naarmate de afstand tot de kern groter wordt.

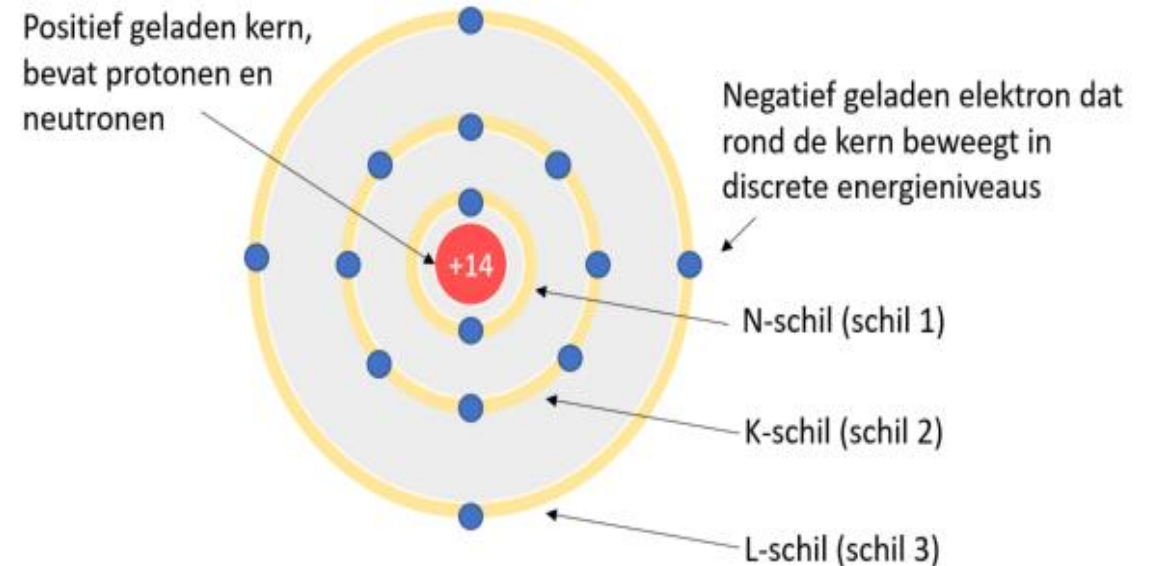
Elektronen in de buitenste schil worden **valentie-elektronen** genoemd. Ze bevatten de hoogste energie en relatief los gebonden met het atoom waartoe ze behoren. Voor Si (silicium) zijn de elektronen in de derde schil de valentie-electronen (zie fig. 2-1)

Soms bevat zo'n valentie-elektron zodanig veel energie dat het vrij kan komen van dit atoom. Men spreekt in dat geval van een **geleidingselektron (conduction electron)** of een vrij elektron.

Wanneer zo'n elektron het atoom verlaat blijft er een positief geladen atoom over. Men spreekt van een positief **ion**.

In sommige chemische reacties zal het vrije elektron zich binden met een neutraal atoom (of groep atomen). Alzo wordt er een negatief ion gevormd.

Samengevat: **atomen met elektronen te weinig zijn positieve ionen en atomen met elektronen te veel zijn negatieve ionen.**



2-1 Atoomstructuur van halfgeleiders

Metaalbindingen (Metallic Bonds blz. 44)

Metalen zijn vaak vaste stoffen bij kamertemperatuur.

- De kernen en binnenste elektronen nemen vaste posities in.
- Valentie-elektronen bevinden zich in de buitenste schil die valentieband wordt genoemd . Deze elektronen zijn "losjes" en kunnen zich vrij gemakkelijk losmaken van hun atomen waardoor ze tussen de metaalionen door kunnen bewegen in een band die de geleidingsband of conductieband wordt genoemd..
- Deze "vrije" elektronen zorgen voor een stroom van negatieve ladingen binnen de structuur waardoor de positief geladen ionen bij elkaar worden gehouden => metaalbinding.
- Bij metalen overlappen de valentieband en de geleidingsband elkaar => elektronen kunnen heel gemakkelijk van de valentieband overvloeien naar de geleidingsband (conductieband) en omgekeerd.
- De beweging van elektronen naar en van de geleidingsband veroorzaakt een bepaalde glans bij metalen.



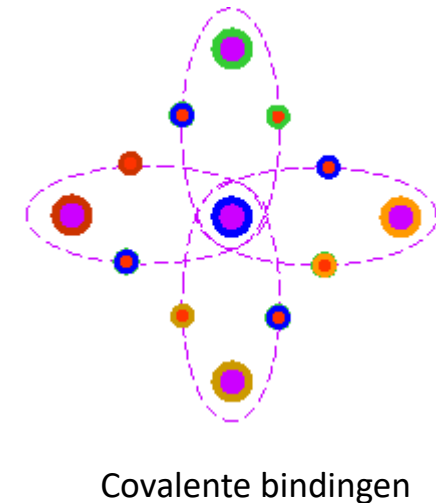
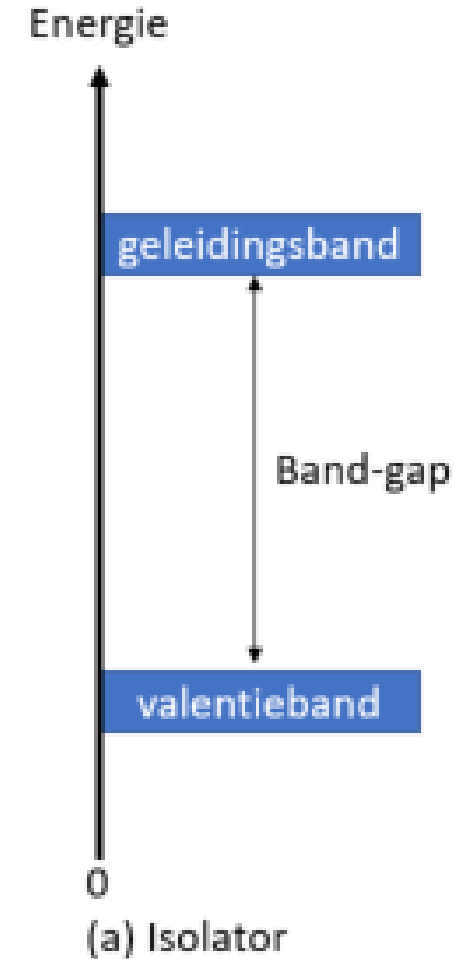
FIGURE 2-2

2-1 Atoomstructuur van halfgeleiders

Covalente bindingen (blz. 44)

Atomen in kristalstructuren blijven bij elkaar door de vorming van sterke covalente bindingen.

- Covalente binding bestaat uit twee elektronen die om elkaar draaien (spinnen) en gedeeld worden door beide atomen.
- Koolstof (C)) bijvoorbeeld heeft 4 valentie-elektronen => kan met 4 andere C-atomen 4 covalente bindingen vormen. Op die wijze bekomt ieder atoom 8 elektronen op zijn buitenste schil wat een toestand van chemische stabiliteit oplevert.
- De gedeelde elektronen zijn niet mobiel. Ieder gedeeld elektron in de binding hoort bij de covalente binding tussen de atomen van het kristal.
- Om de covalente binding te bekomen ontstaat er een grote energiegap (of bandgap genoemd) tussen de valentieband en de conductieband (geleidingsband) => kristalstructuren zoals diamant zijn isolatoren (niet geleiders) voor elektriciteit.
- Een bandgap is een ruimte waar zich geen elektron in stabiele toestand kan bevinden. Heeft het elektron onvoldoende energie om de conductieband te bereiken zal het terugvallen in de valentieband.
- Je hebt veel energie nodig om een elektron vanuit de valentieband over te brengen naar de conductieband. Figuur 2-2 (a)



2-1 Atoomstructuur van halfgeleiders

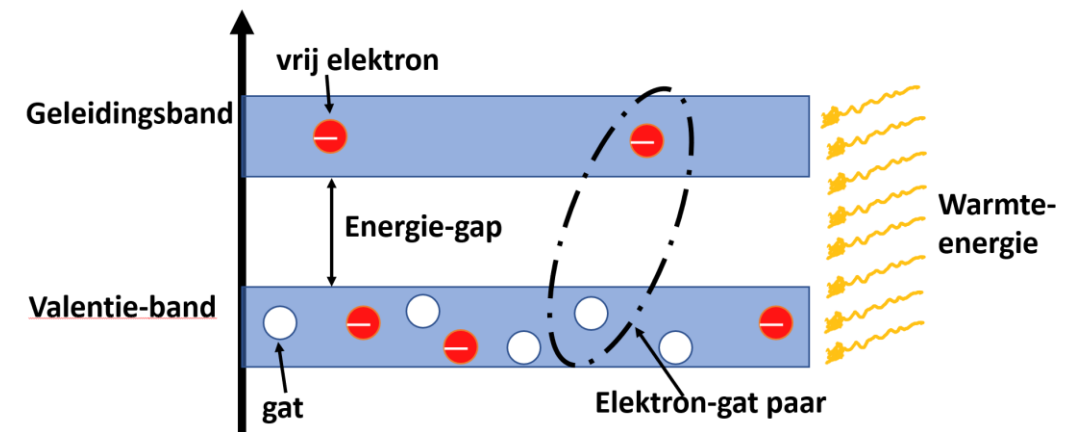
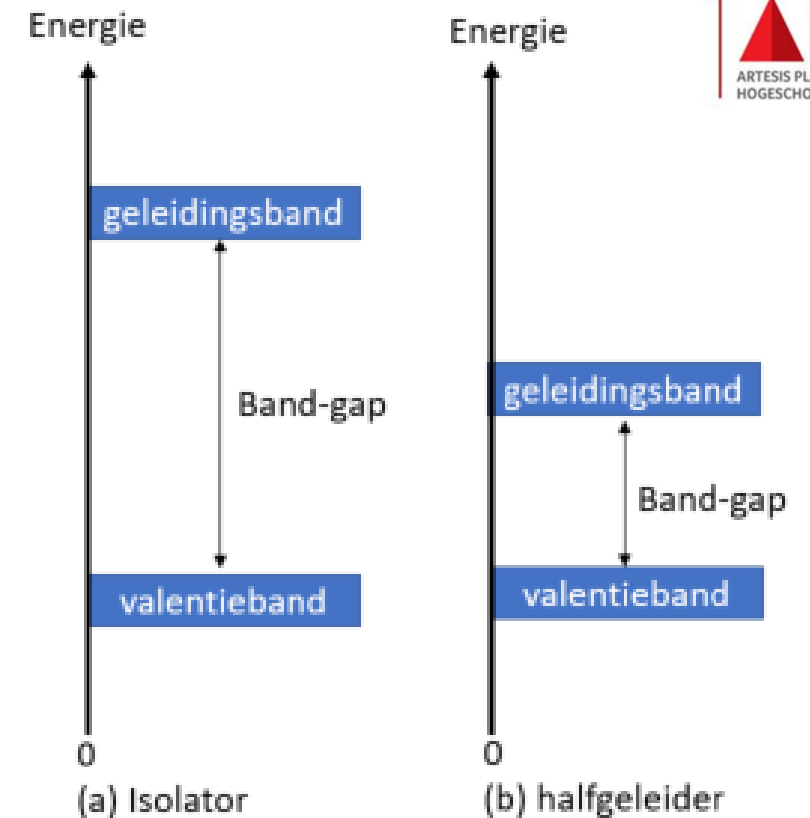
Elektronische componenten worden meestal uit materiaal gemaakt dat men halfgeleiders noemt. Veelal wordt Si gebruikt. Ook Ge (germanium) wordt soms gebruikt als basisstof.

- Bij kamertemperatuur => Si is een vaste stof met een covalente kristalstructuur.
- 1 Si-atoom vormt covalente bindingen met 4 andere Si-atomen. De structuur is vergelijkbaar met deze van diamant maar is niet zo stevig.

Wat is het belangrijkste verschil tussen isolator en halfgeleider (semiconductor)?

- De ruimte dat de conductionband scheidt van de valentieband (bandgap)
 - Bij halfgeleiders is deze lege ruimte smal. Elektronen kunnen gemakkelijk de geleidingsband bereiken door toevoeging van thermische energie (warmte)
 - Bij het absolute nulpunt (-273 K) => Alle elektronen bevinden zich in de valentieband. Maar bij kamertemperatuur hebben vele elektronen voldoende energie om over te vloeien naar de conductieband.
 - Eens de elektronen zich in de conductieband bevinden worden het vrije elektronen en zijn ze niet langer aan een atoom van het kristal verbonden.

Doden and Applications



2-1 Atoomstructuur van halfgeleiders

Elektronenstroom en gatenstroom

Als een elektron naar de conductionband springt, blijft er een lege ruimte over bij het atoom. Deze lege ruimte noemen we een **gat of hole**. => voor ieder elektron dat door de energie, behorende bij de temperatuur, verdwijnt naar de conductionband blijft een gat over in de valentieband. Men noemt dit de creatie van een elektron-gat paar (electron-hole pair)

- Recombinatie vindt plaats als een vrij elektron energie verliest en terugvalt in een gat in de valentieband
- Een stukje *intrinsiek* (zuiver) Si heeft op ieder moment bij kamertemperatuur een hoeveelheid vrije elektronen in de conductieband (zie fig. 2-3) en een gelijk aantal gaten in de valentieband.
- Legt men een spanning aan over dit stukje intrinsiek silicium, dan zullen de vrije elektronen gemakkelijk aangetrokken worden door de positieve klem van de spanningsbron. Deze beweging van elektronen is een type van stroom door een halfgeleider en wordt de *elektronenstroom* genoemd.

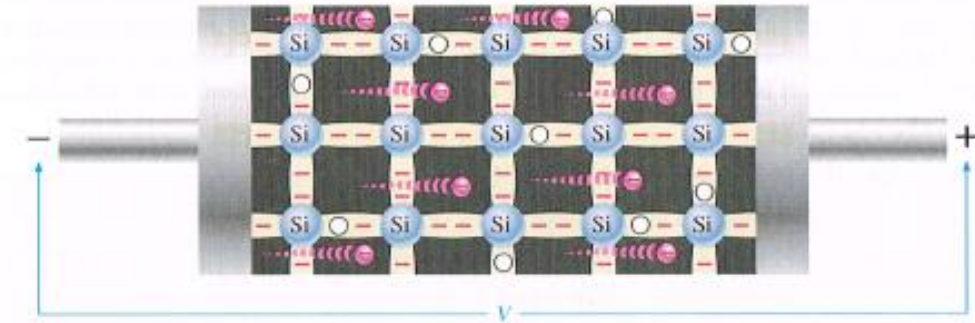
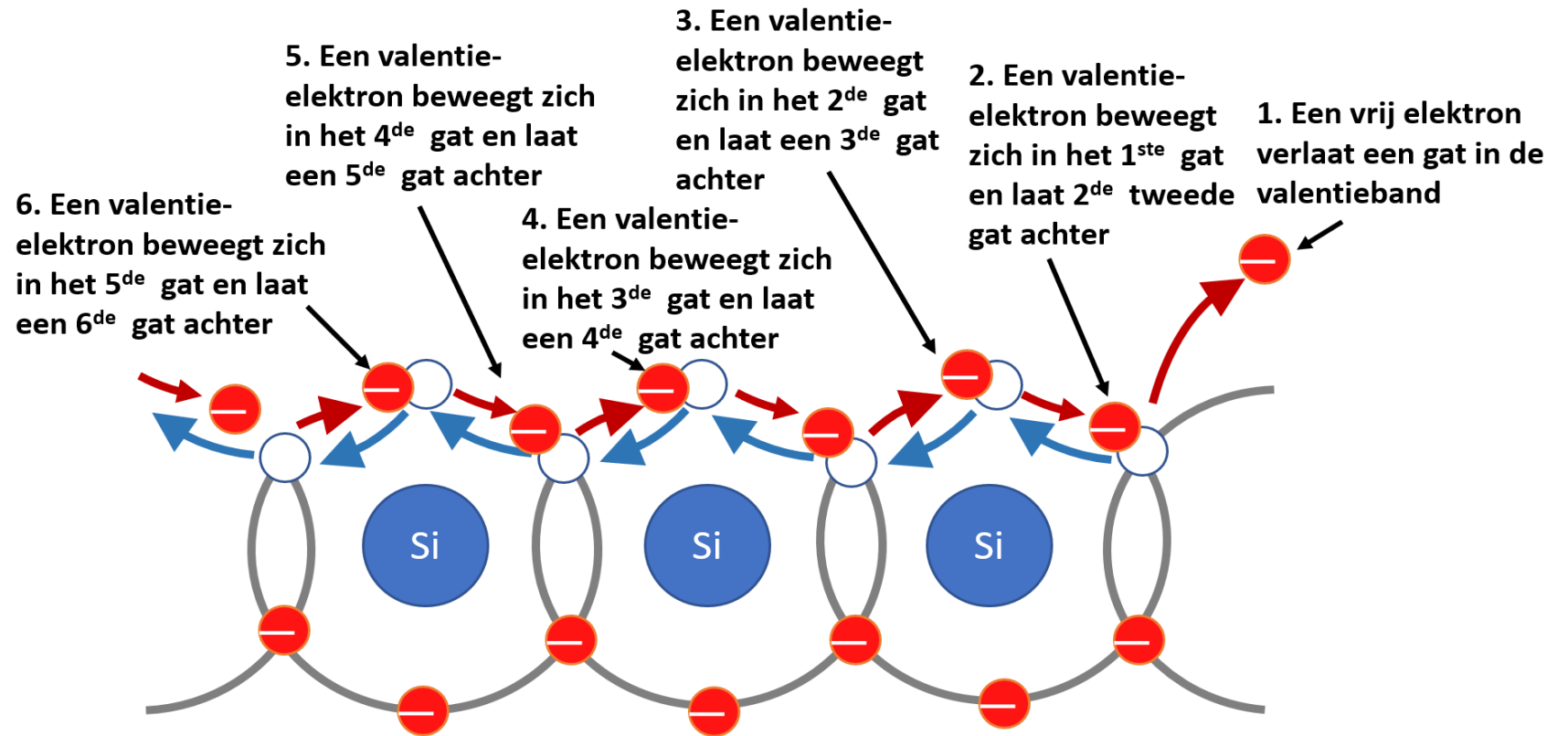


FIGURE 2-3 Electron current in intrinsic silicon is produced by thermally generated electrons.

2-1 Atoomstructuur van halfgeleiders

Elektronenstroom en gatenstroom

Een ander soort van stroom ontstaat er in de valentieband. Als een elektron de valentieband verlaat ontstaat er een gat in de kristalstructuur. Een valentie-elektron kan (met een beetje extra energie) zich verplaatsen naar een nabijgelegen gat en laat op zijn beurt een nieuw gat over. Men kan zich voorstellen dat het gat in dit geval zich verplaatst heeft in de kristalstructuur van de ene positie naar de andere. (zie fig. 2-4a) Deze stroom wordt de **gatenstroom** genoemd. Merk op dat deze gatenstroom tegengesteld vloeit aan de stroom van valentie-elektronen.



Als een valentie-elektron van links naar rechts beweegt om te recombineren met een gat, laat het een ander gat achter. Je kan dit aanzien als een gat dat zich van rechts naar links heeft bewogen in de valentieband. De blauwe pijlen duiden de effectieve beweging van de gaten aan.

Section 2-1 CHECKUP

1. In een intrinsieke halfgeleider, in welke energieband bevinden zich de vrije elektronen en in welke band de gaten?
2. Hoe ontstaan gaten in een intrinsieke halfgeleider?
3. Waarom vloeit er gemakkelijker stroom in een halfgeleider dan in een isolator?



2-2 PN-junctie

Wat is een PN-junctie?

- Intrinsiek Si of Ge is geen goede geleider. Het moet bewerkt worden om het aantal vrije elektronen en gaten te laten stijgen om zij geleidbaarheid te vergroten.
- Als een 5-waardige onzuiverheid wordt toegevoegd aan Si dan ontstaat er N-materiaal.
- Wordt een 3-waardige onzuiverheid toegevoegd aan Si, dan ontstaat er P-materiaal.
- Gedurende de fabricage vormen deze materialen een grens dat PN-junctie wordt genoemd. Het zijn juist de eigenschappen van zo'n PN-junctie dat toelaat om dioden en transistoren te laten werken

Wat moet je kunnen?

- Een vergelijk maken tussen P-type en N-type halfgeleidermateriaal
- Een voorbeeld van donor- en acceptor materiaal geven
- Omschrijven hoe een PN-junctie tot stand komt.

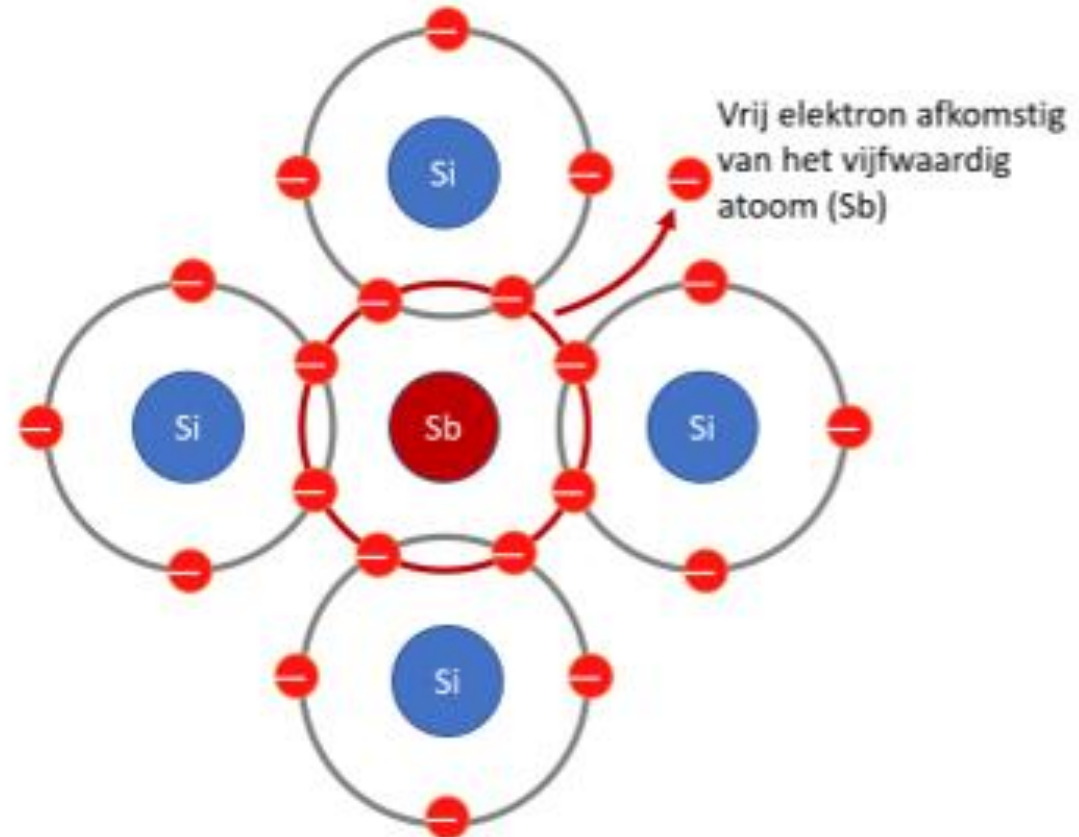
Doping (blz. 46)

Het verhogen van de geleidbaarheid door toevoeging van onzuiverheden in een intrinsiek kristal wordt **doping** genoemd.

Er zijn twee mogelijkheden om intrinsiek kristal te doperen

- **Toevoegen van 5-waardige onzuiverheden**
 - Vb Antimoon (Stibium Sb), deze is 5-waardig en heeft dus 5 valentie-elektronen
 - Antimoon (Sb) bindt zich met 4 Si-atomen en bekommt zo 9 elektronen op de buitenste schil. Om in een stabiele toestand te komen stoot Sb het 5^{de} elektron af. (spreekt van donor) Dit wordt een vrij elektron in de conductieband => meer vrije elektronen dan gaten => elektronen zijn meerderheidsladingsdragers en gaten zijn de minderheidsladingsdragers => **N-kristal** gecreëerd. Merk op dat de totale lading 0 blijft vermits voor elk vrij elektron, een positief Sb-ion in het kristal aanwezig is.

Vorming van N-kristal
(doperen met 5-waardige atomen)



2-2 PN-junctie

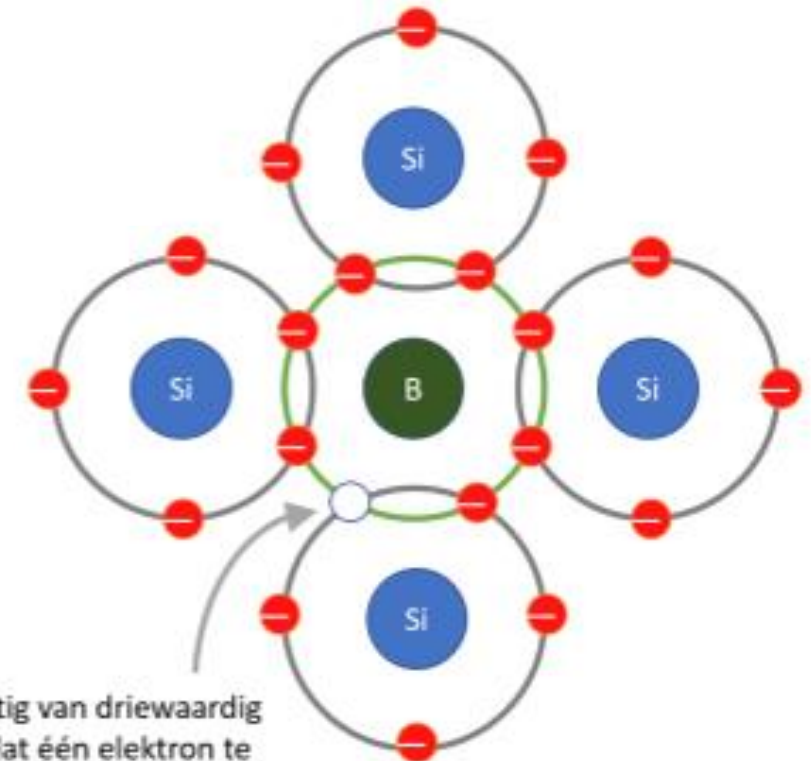
Doping (blz. 46)

Het verhogen van de geleidbaarheid door toevoeging van onzuiverheden in een intrinsiek kristal wordt **doping** genoemd.

Er zijn twee mogelijkheden om intrinsiek kristal te doperen

- **Toevoegen van 3-waardig onzuiverheden**
 - Vb. Borium (B), is 3-waardig en heeft dus 3 valentie-elektronen op de buitenste schil.
 - B maakt covalente bindingen met de zich omringende Si-atomen en heeft één elektron te weinig om 4 covalente bindingen op te bouwen. Hierdoor wordt kunstmatig een gat gecreëerd. Een 3-waardig atoom is dus een acceptor vermits het een elektron nodig heeft voor de 4^{de} covalente binding. Op deze wijze ontstaan veel gaten in het kristal en wordt **een P-kristal** gecreëerd. In een P-kristal zijn de gaten de meerderheidsladingsdragers en de elektronen de minderheidsladingsdragers. Merk op dat de totale lading van het P-kristal gelijk is aan 0 vermits voor ieder, op deze wijze gemaakt, gat een negatief B-ion aanwezig is in het kristal.
- **Waarom zijn er toch nog gaten in het N-kristal en elektronen in het P-kristal?**
 - Door thermische energie worden nog steeds covalente bindingen tussen Si-atomen onderling verbroken. (zie ontstaan van ladingsdragers in intrinsiek kristal)

Vorming van P-kristal
(doperen met 3-waardige atomen)



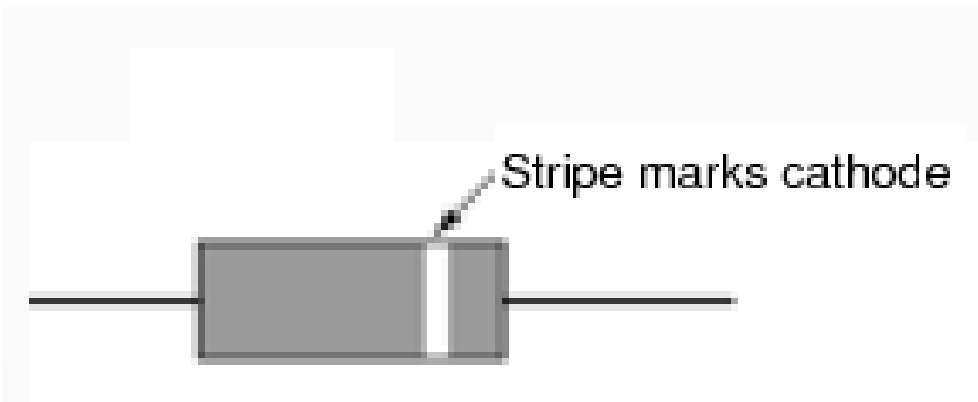
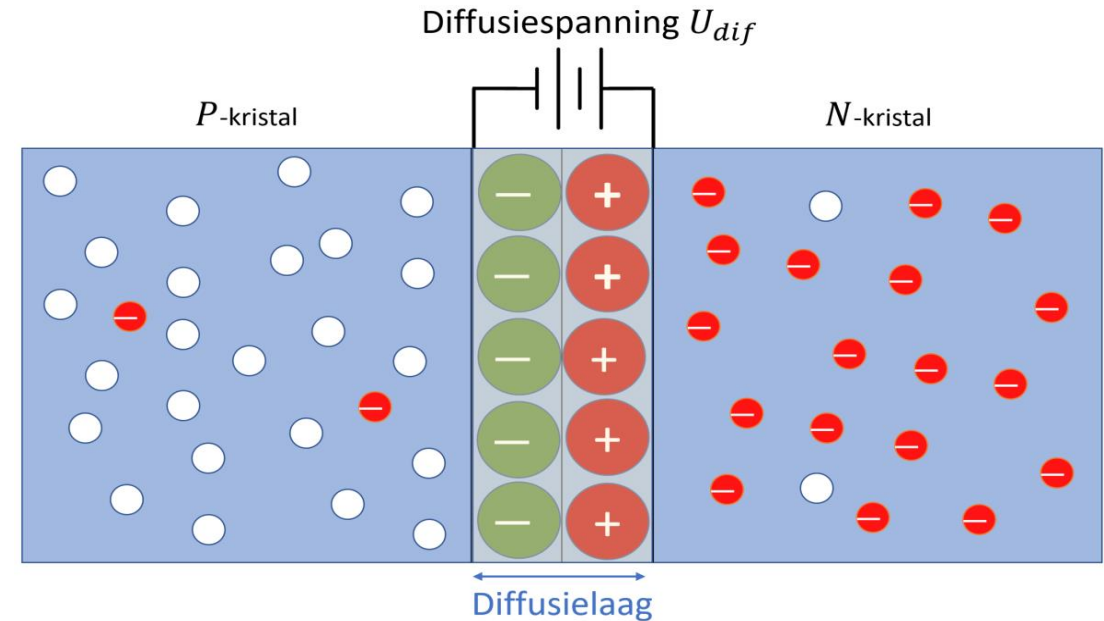
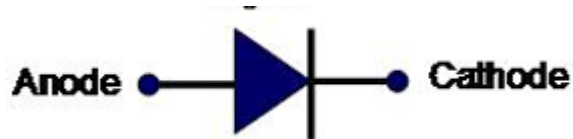
Gat afkomstig van driewaardig atoom (B) dat één elektron te weinig heeft om vier covalente bindingen te maken

2-2 PN-junctie

PN-junctie (blz.47)

Ontstaat door een intrinsiek kristal voor de ene helft met N-materiaal te doperen en voor de andere helft met P-materiaal. Tussen de twee gebieden ontstaat er een **PN-junctie**

- N-gebied heeft veel vrije elektronen (meerderheidsladingsdragers) en enkele thermisch gecreëerde gaten (minderheidsladingsdragers)
- P-gebied bestaat uit veel gaten (meerderheidsladingsdragers) en enkele thermisch gecreëerde elektronen (minderheidsladingsdragers)
- De PN-junctie vormt de basis van een diode en vormt de basis van alle halfgeleidercomponenten.

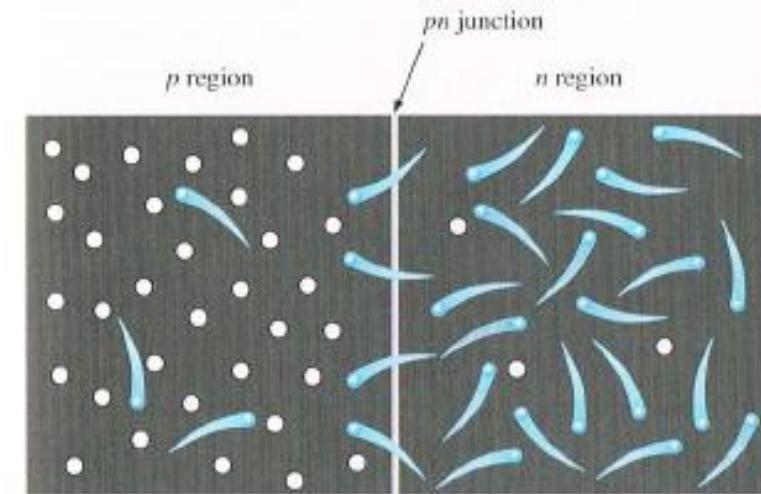


2-2 PN-junctie

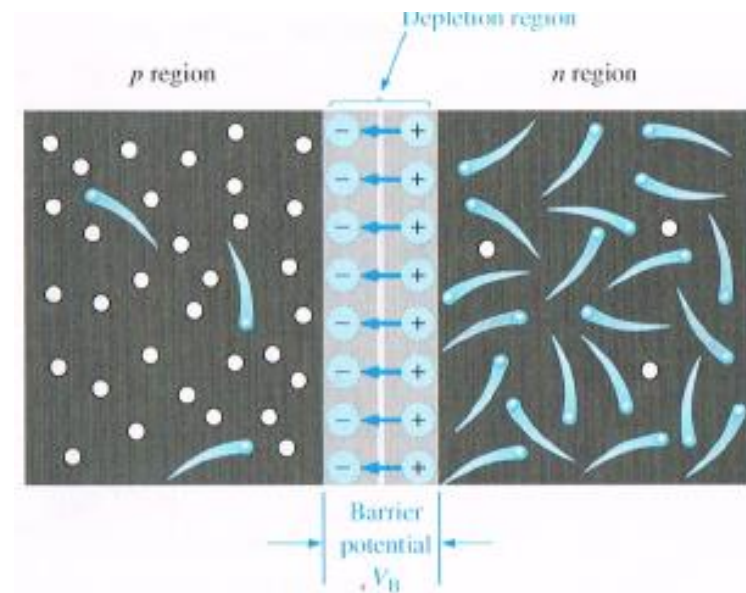
De diffusielaag (depletion region)

Tijdens de vorming van de PN-junctie zullen sommige elektronen uit het N-gebied het P-gebied instromen

- Elektron dat P-gebied instroomt (fig 2-5a) zal recombineren met een gat bij een 3-waardig atoom => rond het overgangsgebied ontstaat in het P-gebied een negatief ion en blijft in het N-gebied een positief ion over
- Wanneer meerdere elektronen de grens oversteken tussen N- en P-gebied zullen er meerdere recombinaties gebeuren en ontstaan aan de overgang in het P-gebied meerdere negatieve ionen en in het N-gebied meerdere positieve ionen.
- De aanwezigheid van de positieve en negatieve ionen, elk aan beide zijden van de junctie doet een elektrisch veld ontstaan waardoor er een potentiaalverschil ontstaat tussen beide gebieden. Dit potentiaalverschil wordt **diffusiespanning of barrier potential V_B** genoemd.
- De opstapeling van positieve en negatieve ionen blijft voortduren tot het negatief potentiaal zodanig groot is geworden dat elektronen die het grensgebied willen oversteken afgestoten zullen worden. Dit gebeurt als de diffusiespanning over de diode 0,7 V (Si) of 0,3 V (Ge) is geworden.
- Vermits Ge-dioden enkel in speciale gevallen worden gebruikt, wordt algemeen aangenomen dat de diffusiespanning (barrier voltage) over de diode gelijk is aan 0,7 V
- De laag ionen die tussen het P- en N-gebied ontstaat wordt het diffusiegebied of depletion (uitputtingsgebied) genoemd. In deze laag bevinden zich zeer weinig vrije ladingsdragers. Ideaal gezien is er in dit gebied geen enkele vrije ladingsdrager zonder uitwendige energie aangelegd.



(a) At the instant of junction formation, free electrons in the *n* region near the *pn* junction begin to diffuse across the junction and fall into holes near the junction in the *p* region.



(b) For every electron that diffuses across the junction and combines with a hole, a positive charge is left in the *n* region and a negative charge is created in the *p* region, forming a barrier potential, V_B . This action continues until the voltage of the barrier repels further diffusion.

Section 2-2CHECKUP

1. Hoe wordt een N-type halfgeleider gevormd?
2. Hoe wordt een P-type halfgeleider gevormd?
3. Wat is een PN-junctie?
4. Wat is de waarde van de diffusiespanning (barrier potential) voor silicium?



2-3 Instellen van de halfgeleiderdiode

Welke basisinstellingen zijn er?

- Een PN-junctie vormt een halfgeleiderdiode. Er vloeit geen stroom door de junctie bij evenwicht.
- Het voornaamste nut van een diode is de mogelijkheid om de stroom enkel in één richting te laten vloeien. Of er stroom vloeit is afhankelijk van de instelling.
- Er zijn 2 basisinstellingen voor een diode (in geleiding (forward) of in sper (reverse))
- Elk van deze condities wordt gecreëerd via het aanleggen van een externe spanningsbron in de juiste richting over de PN-junctie van de diode.

Wat moet je onthouden?

- Een beschrijving geven hoe je de diode in doorlaat en in sper instelt.
- De definitie van doorslag (avalanche breakdown)

2-3 Instellen van de halfgeleiderdiode

Voorwaartse instelling (Forward Bias)

De term **bias** refereert naar een vaste DC-spanning waarmee de werkingsvoorwaarde van de halfgeleidercomponent wordt vastgelegd.

Forward bias of diode instellen in geleiding is de conditie dat toelaat dat er een stroom vloeit door de PN-junctie.

Fig,2-6 toont de polariteit om een diode in geleiding te brengen.

Diode staat in doorlaat (forward bias) als de anode positiever is dan de kathode (meer bepaald 0,7 V voor Si en 0,3 voor Ge)

Werkingsprincipe:

- Door het aansluiten van de voedingsklemmen wordt langs de N-zijde elektronen in het kristal gestuurd en langs de P-zijde worden er elektronen uit het kristal aangetrokken door de positieve klem.
- Zolang de aangelegde spanning niet hoger is dan de diffusiespanning of barrier potential (0,7 V) kunnen er (praktisch) geen elektronen door de diffusielaag (depletion region)
- Van zodra de aangelegde spanning hoger is dan de 0,7 V die over de diffusielaag staat, hebben de vrije elektronen in het N-gebied voldoende energie om door deze diffusielaag te vloeien => er vloeit een elektronenstroom (meerderheidsladingsdragers in de conductieband vanuit het N-gebied naar het P-gebied).
- Eens de vrije elektronen in het P-gebied zijn aangekomen, recombineren deze met de vele gaten die daar aanwezig zijn. De vrije elektronen verlaten bijgevolge de conductieband en komen in de valentieband terecht (ze worden dus valentie-elektronen). Daar bewegen ze van gat tot gat richting positieve klem van de voeding. Deze beweging van valentie-elektronen veroorzaakt een beweging van gaten (meerderheidsladingsdragers in het P-gebied) in de tegenovergestelde richting

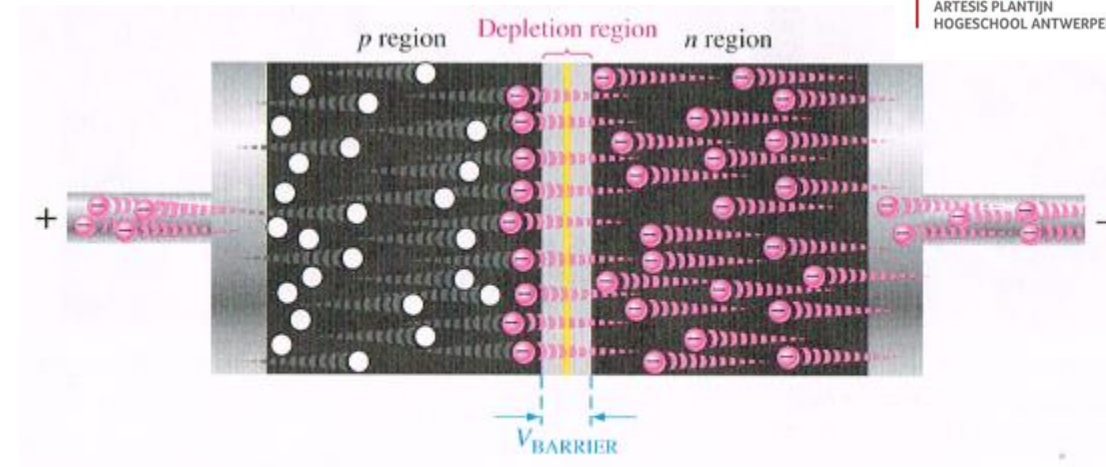


FIGURE 2-6 Electron flow in a forward-biased semiconductor diode.

2-3 Instellen van de halfgeleiderdiode

Instelling in sper (Reverse Bias) (blz.49)

Reverse bias of **diode in sper** aansluiten is de conditie die verhindert dat er stroom zou vloeien door de PN-junctie..

Fig.2-7a toont de polariteit om een diode in sper aan te sluiten.

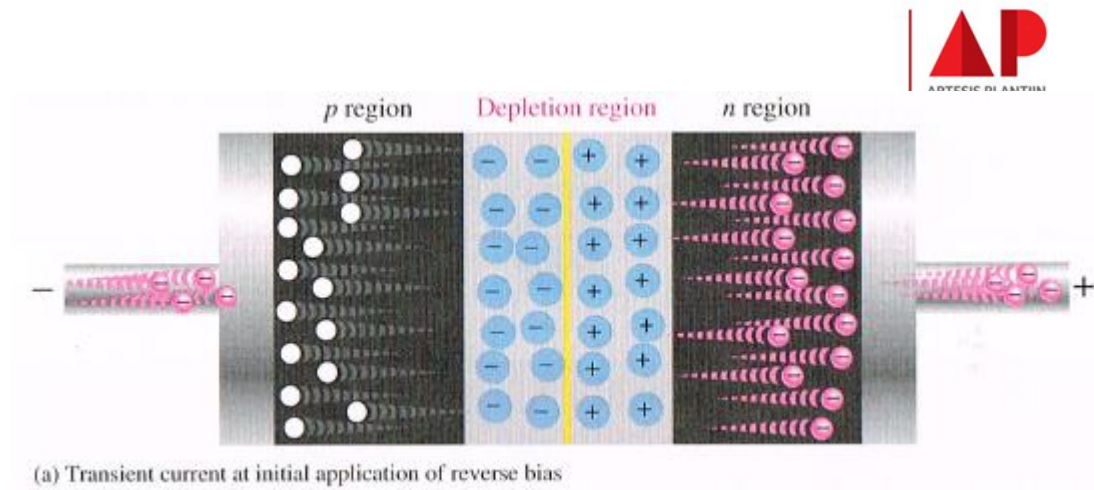
Diode staat in sper als de anode negatiever is dan de kathode.

Weringsprincipe:

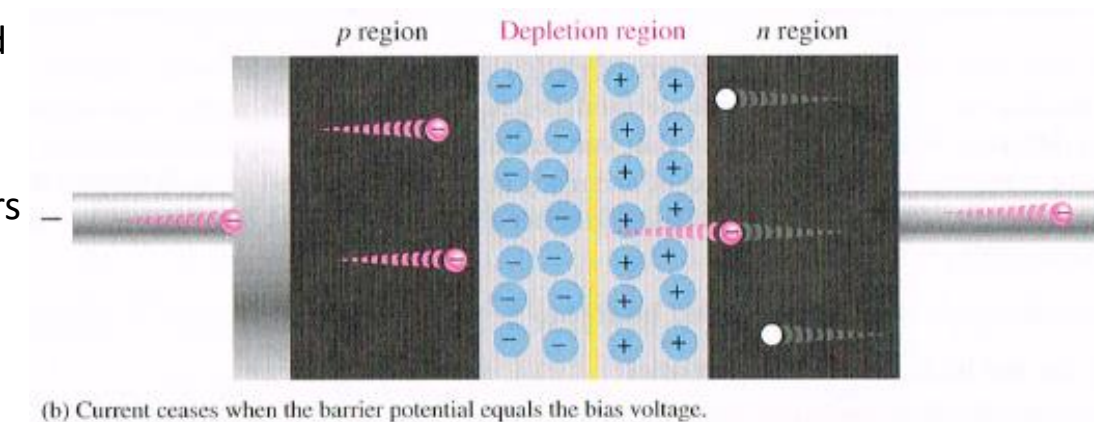
- Negatieve klem van de voeding trekt de gaten aan in P-gebied en de positieve klem van de voeding trekt de vrije elektronen aan in het N-gebied => in het gebied rond de PN-overgang blijven enkel nog ionen over en (praktisch) geen vrije ladingsdragers.
- Hoe groter de aangelegde spanning in sper => hoe meer vrije ladingsdragers door de bron worden aangetrokken en hoe groter de diffusielaag (deplationlayer) wordt rond de PN-junctie. Deze laag noemen we ook de sperlaag. De spanning over de diode is gelijk aan deze van de aangelegde spanning.

Peak Inverse Votage (PIV)

- Als een diode in sper is geschakeld moet deze bestand zijn tegen de maximum aangelegde sperspanning. Als de diode hiertoe niet is bestand, zal deze doorslaan.
- De maximale inverse spanning over een diode wordt aangegeven door PIV(peak inverse voltage). De hoeveelheid vereiste PIV is afhankelijk van de toepassing. Voor veel toepassingen moet de PIV hoger zijn dan de inverse spanning (sperspanning) over de diode.

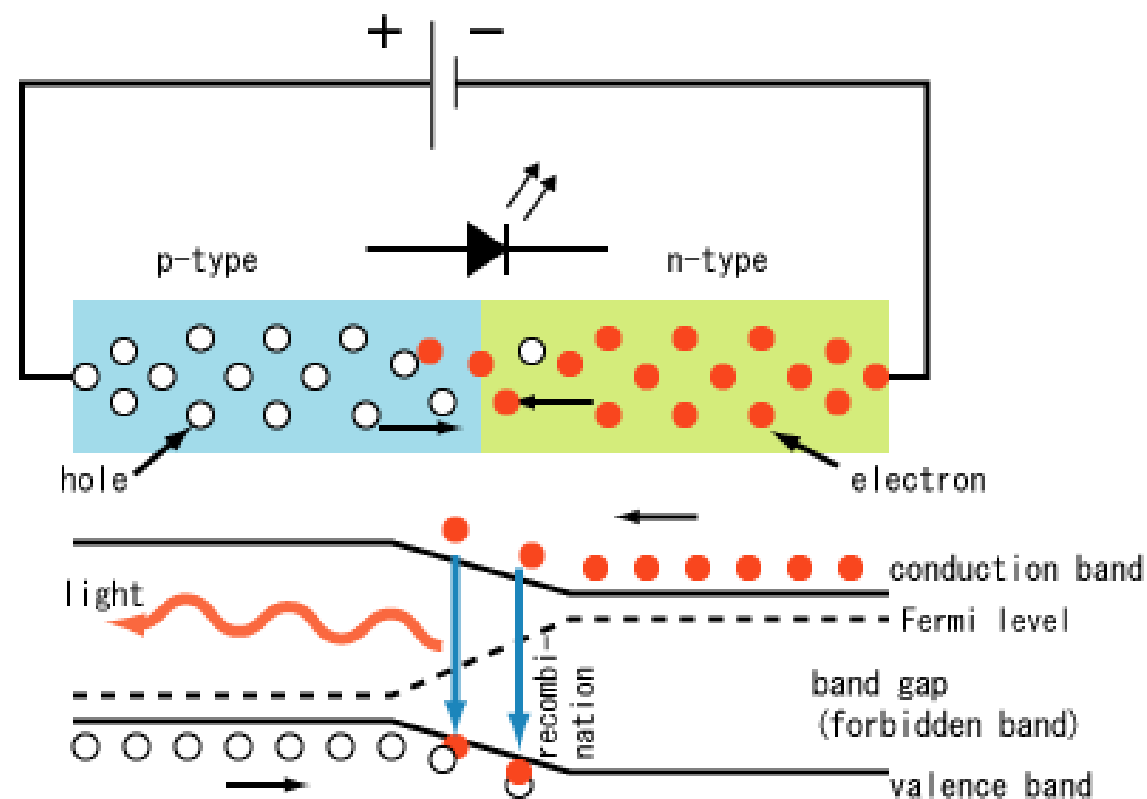
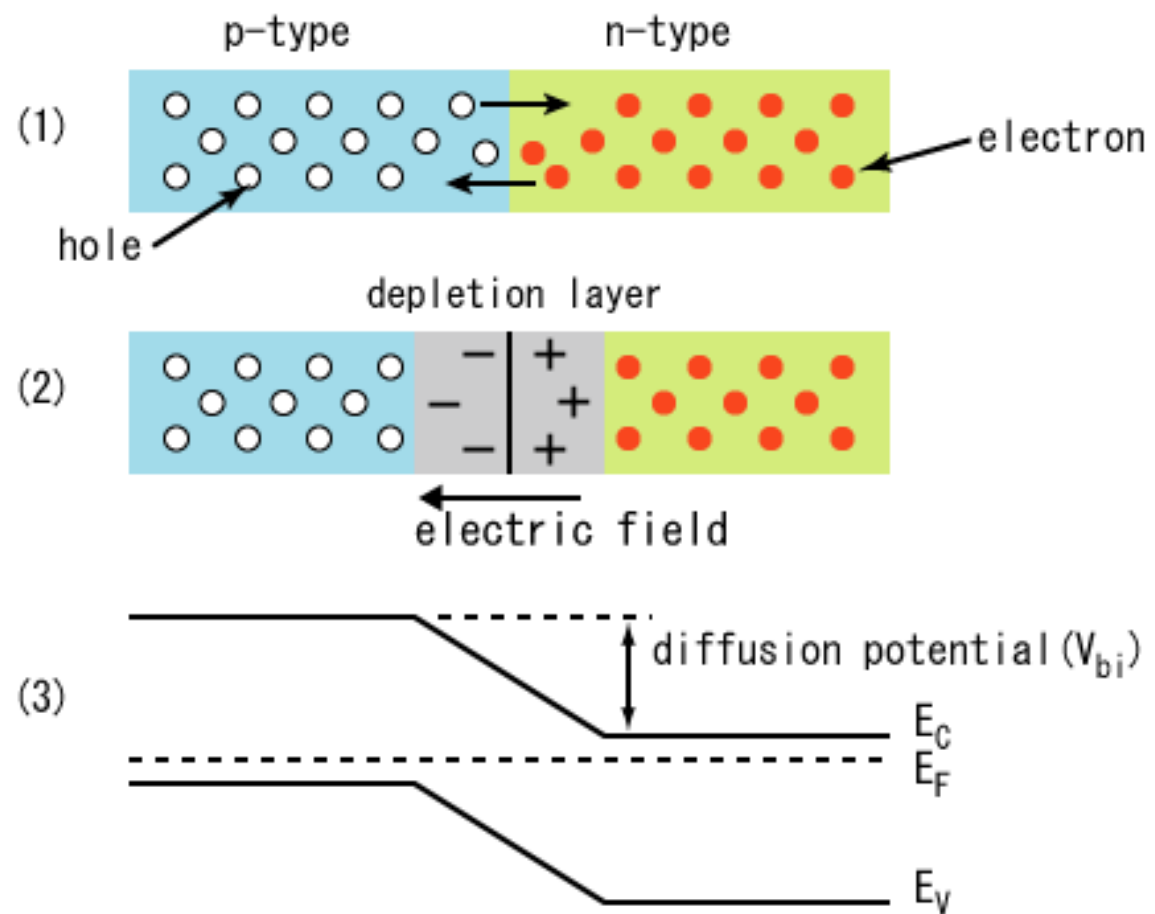


(a) Transient current at initial application of reverse bias



(b) Current ceases when the barrier potential equals the bias voltage.

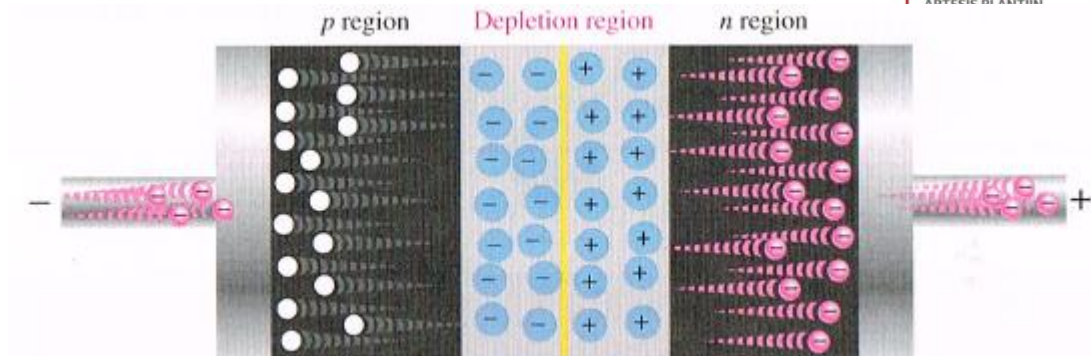
FIGURE 2-7 Reverse bias.



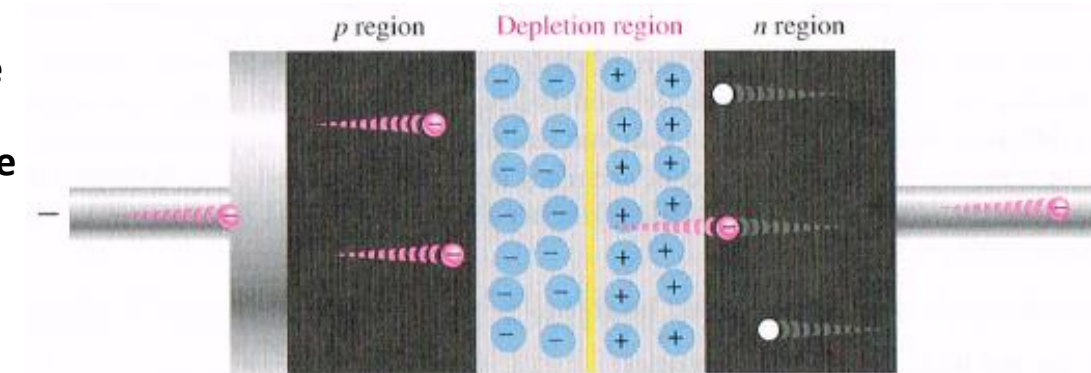
2-3 Instellen van de halfgeleiderdiode

Reverse Breakdown

- Wanneer de reverse-biased spanning (sperspanning) blijft stijgen, dan zal op een gegeven moment toch noemenswaardige stroom door de diode beginnen te vloeien.
- Door de stijgende sperspanning verkrijgen de vrije elektronen als maar meer energie van de uitwendige aangelegde bron.
- Hierdoor gaan ze sneller bewegen. Wanneer zo'n vrij elektron (met veel energie) in de buurt van een atoom komt is er grote kans dat deze op een valentie-elektron botst. Hierdoor wordt dit valentie-elektron losgeslagen uit de covalente binding en komt in de conductieband terecht. Dit nieuwe vrije elektron gaat op zijn beurt bewegen richting positieve klem van de bron en onderweg botsen op andere atomen, waardoor weer nieuwe vrije elektronen ontstaan, enz ... Men noemt dit effect het **avalanche effect**
- Het gevolg hiervan is dat de stroom snel toeneemt en er meer warmte wordt geproduceerd in de diode. Op een gegeven moment wordt de warmte binnen de diode zo hoog dat er in het binnenste van de diode beschadiging optreedt.
- Veel dioden kunnen niet tegen deze doorslag (avalanche effect) en zullen stuk gaan als dit effect zich voordoet.
- Enkel de zenerdiode is zodanig opgebouwd om te opereren in het doorslaggebied (reverse -breakdown).



(a) Transient current at initial application of reverse bias



(b) Current ceases when the barrier potential equals the bias voltage.

FIGURE 2-7 Reverse bias.

Section 2-3 CHECKUP

1. Welk zijn de twee instellingen van een diode?
2. In welke instelling wordt een stroom van meerderheidsladingsdragers geproduceerd?
3. Welke is de basisinstelling dat een verbreding van de diffusielaag (deplation region) veroorzaakt?
4. Wat is avalanche breakdown?



2-4 Diodekarakteristieken (blz. 50)

Wat is een diodekarakteristiek?

- Diodekarakteristiek is een grafische voorstelling van de stroom-spanningsrelatie van de diode.
- Drie diodenmodellen worden hier besproken. Ieder model geeft een ander soort benadering van een werkelijke diode zodat je één van deze modellen kan kiezen voor analyse van een bepaalde toepassing.
- In sommige gevallen is een eenvoudige benadering reeds voldoende om de werking van de schakeling te verklaren. In andere situaties heb je een meer geavanceerd model nodig.

Wat moet je onthouden?

- Hoe een diodekarakteristiek verloopt
- Verklaren hoe je een diodekarakteristiek kan zichtbaar maken op de oscilloscoop.
- De beschrijving van de drie modellen die gebruikt worden om een diode voor te stellen in een circuit.

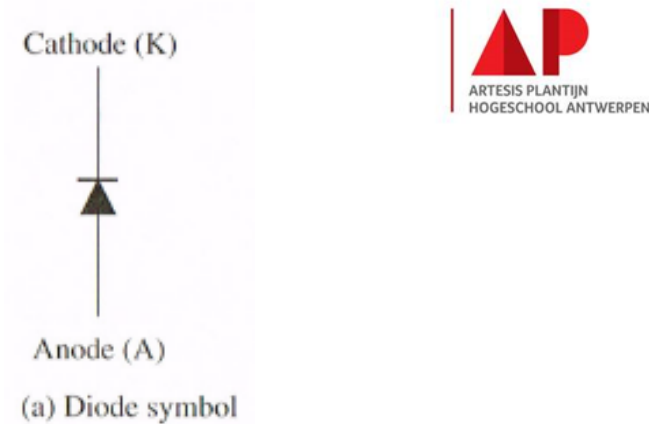
2-4 Diodekarakteristieken

Diodesymbool

Figuur 2-8(a) toont het standaard schemasymbool van een diode voor algemene doeleinden.

De twee aansluitdraden van de diode zijn de anode (A) en de kathode (K).

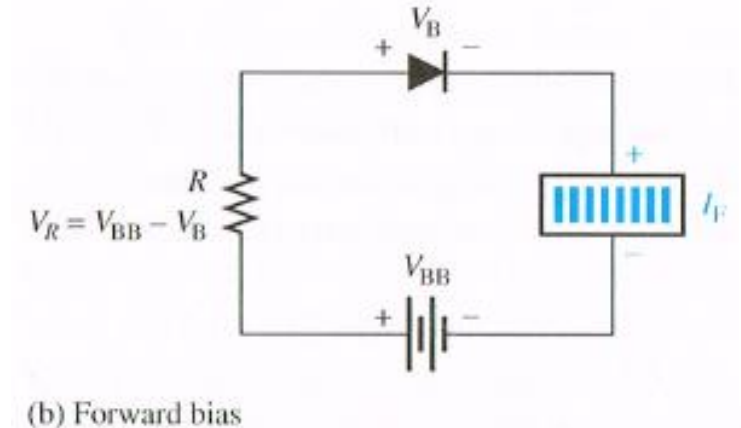
De pijl duidt steeds de kathode aan.



Figuur 2-8(b) toont een diode in doorlaat geschakeld via een spanningsbron en een weerstand die de stroom begrensd. De anode is positiever dan de kathode waardoor er een relatief grote stroom door de schakeling vloeit.

Over een diode in doorlaat staat de diffusiespanning (barriervoltage V_B)

Over de weerstand staat een spanning gelijk aan de bronspanning min de diffusiespanning over de diode ($V_R = V_{BB} - V_B = V_{BB} - 0,7 \text{ V}$)



Figuur 2-8(c) toont een diode in sper (reverse bias). De anode is negatief ten opzichte van de kathode. Hierdoor zal de diode geen elektrische stroom geleiden.

De (bijna) volledige spanning V_{BB} staat over de diode.

Over de weerstand staat zo goed als geen spanning. In het geval van een ideale diode is V_R gelijk aan 0 V.

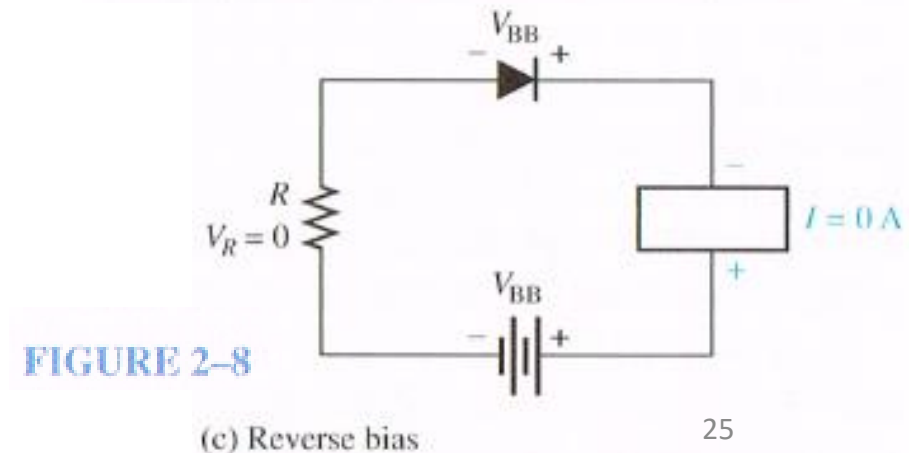


FIGURE 2-8

2-4 Diodekarakteristieken

Fig. 2-9 geeft een aantal typische dioden weer in een aantal regelmatig voorkomende behuizingen. A staat voor Anode-aansluiting en K voor Kathode-aansluiting.

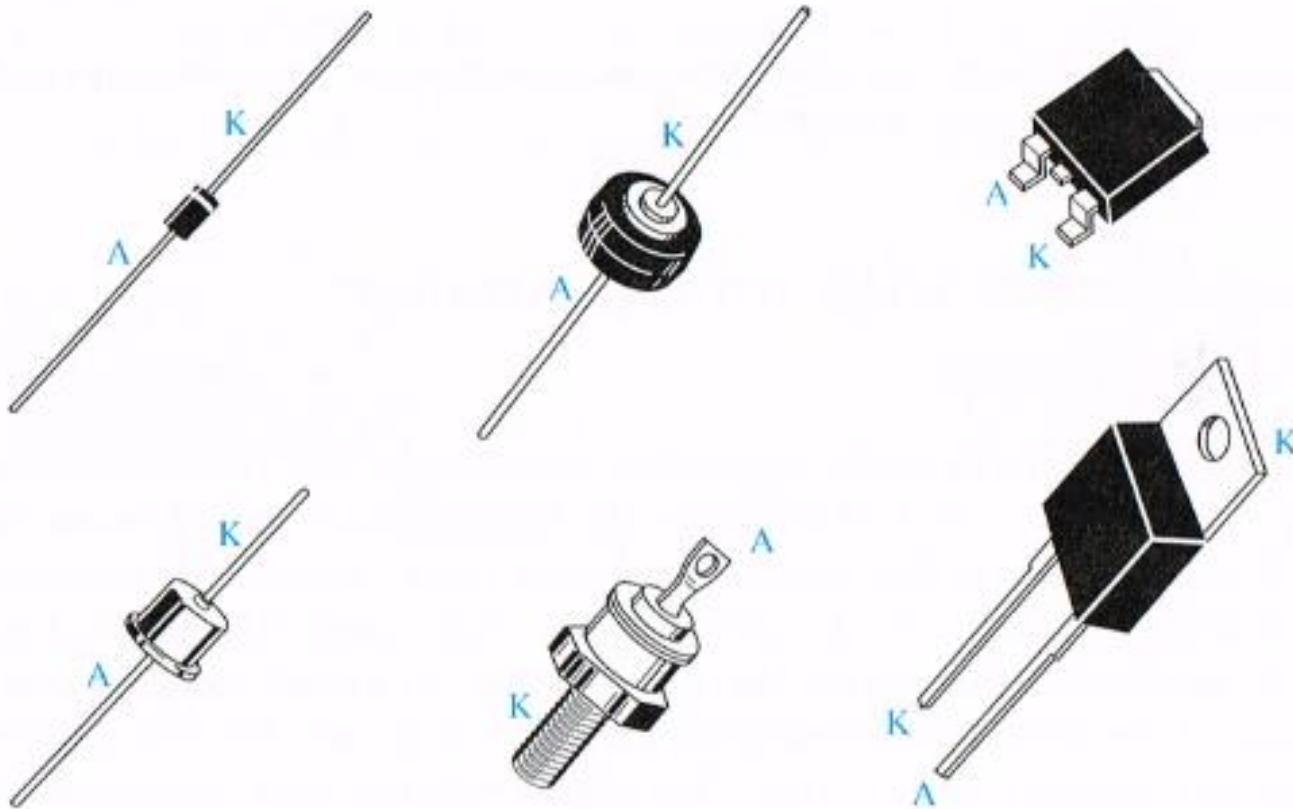
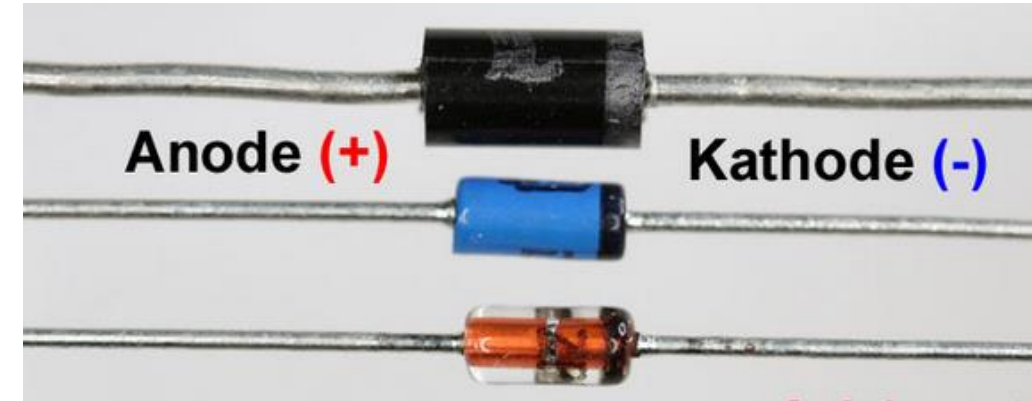


FIGURE 2-9 Typical diode packages and terminal identification.



2-4 Diodekarakteristieken

Verloop van de diodekarakteristiek (diode characteristic curve (blz. 51))

Het rechterbovenkwadrant laat de curve zien van de diode in doorlaat.

- Beneden diffusiepotentiaal (barriervoltage) (0,7 V) vloeit er nagenoeg geen voorwaartse (forward) stroom I_F bij een gegeven voorwaartse spanning V_F (lager dan 0,7 V). Voor germanium is de diffusiespanning 0,3 V => nagenoeg geen stroom voor spanningen lager dan 0,3 V.
- Eens V_F de waarde van de diffusiespanning bereikt, begint de stroom sterk te stijgen en wordt begrensd door een seriële weerstand. De spanning over de in doorlaat ingestelde diode (forward-biased diode) blijft ongeveer 0,7 V. Deze diffusiespanning of barriervoltage wordt ook dikwijls gerefereerd met “spanningsval over de diode” (diode drop).

Het linkerbenedenkwadrant geeft de grafiek weer van de in sper (reverse-biased) aangesloten diode.

- Als de sperspanning of reverse voltage V_R negatiever wordt (naar links bewegen), blijft de stroom ongeveer bijna 0 (orde μA) totdat de breakdown spanning V_{BR} wordt bereikt.
- Als breakdown wordt bereikt, vloeit er een grote stroom door de diode die, als ze niet wordt begrensd, de diode kan vernietigen.
- Meestal is V_{BR} groter dan 50 V.
- Bij de meeste toepassingen van gewone dioden wordt een instelling in het reverse breakdown gebied niet gemaakt.

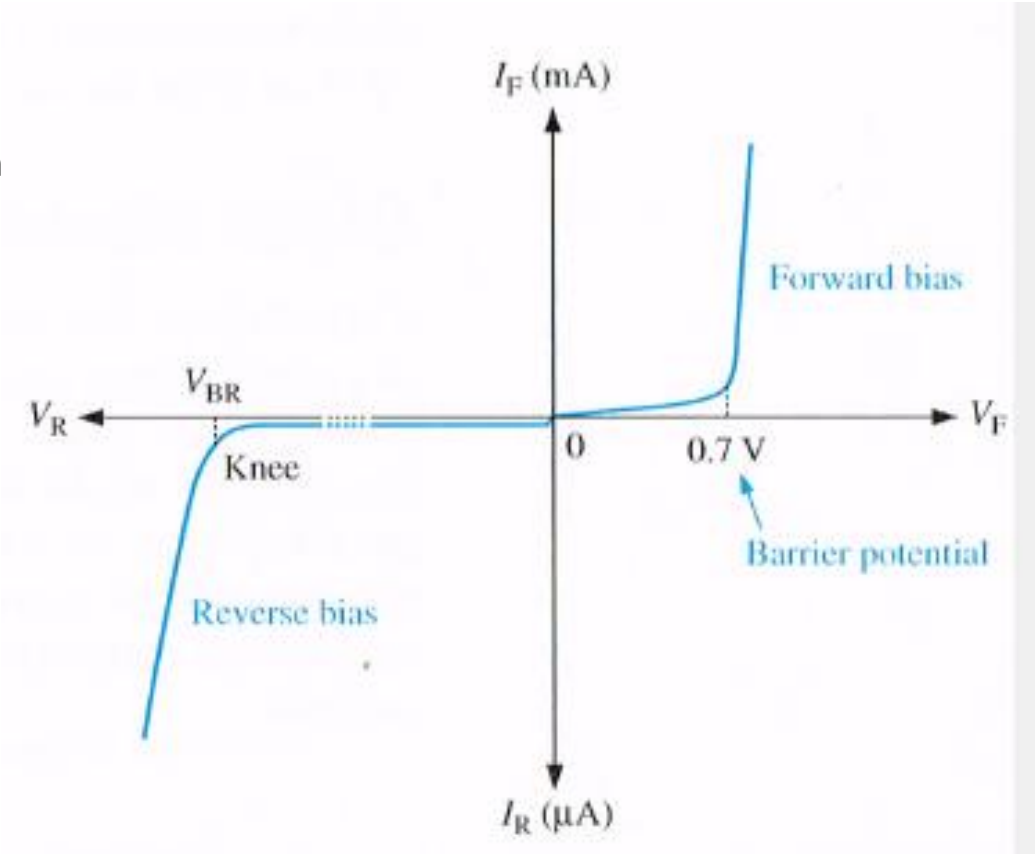


FIGURE 2-10

2-4 Diodekarakteristieken

Weergeven van de diodekarakteristiek via een oscilloscoop

Je kan de diodecurve weergeven via de schakeling zoals weergegeven in figuur 2-11

Signaal is een 5 V_{pp} dat is gecenterd rond 0 V.

Channel 1 laat de spanningsval over de diode zien en Channel 2 de spanningsval over de weerstand (evenredig met de stroom door de schakeling). Channel 2 moet wel geïnverteerd worden vermits de spanning hier in tegengestelde richting is ten opzichte van Channel 1

De oscilloscoop in X-Y mode plaatsen; hierdoor wordt de spanning van Channel 2 verticaal weergegeven (V_R) en de spanning van Channel 1 horizontaal (V_{diode})

De massa van de signaalgenerator moet niet dezelfde zijn als deze van de scoop (indien één van de toestellen niet geaard is! – anders is er een kortsluiting tussen de massa's van de scoop en de generator)

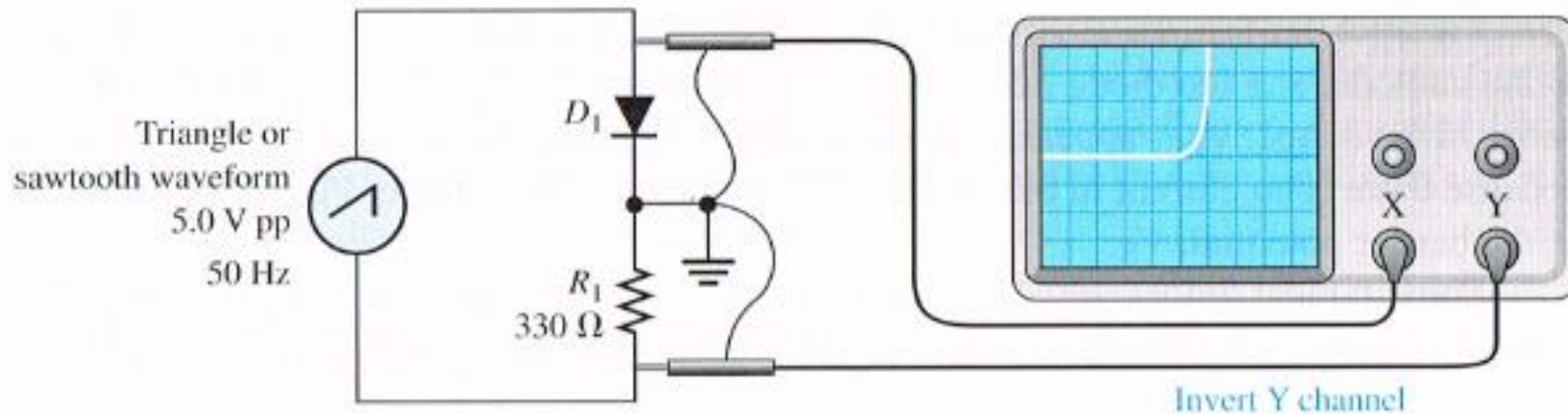


FIGURE 2-11 Plotting the IV curve for a diode on an oscilloscope. The oscilloscope is placed in the X-Y mode and the Y channel is inverted.

2-4 Diodekarakteristieken

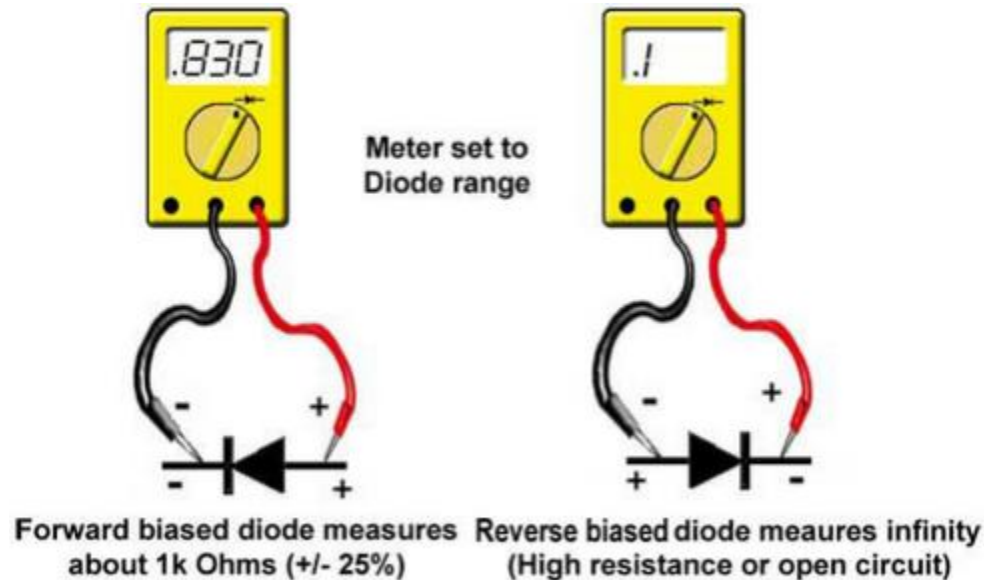
Dioden uitmeten met een Ohmmeter of multimeter (blz. 52)

De inwendige batterij van bijna alle Ohmmeters is in staat om een diode in doorlaat of in sper te plaatsen. Dit laat toe om snel nat te gaan of een diode nog bruikbaar is of niet.

Diode nakijken met analoge meter: plaats deze in de stand $R \times 100 \text{ ohm}$ om de stroom door de diode te begrenzen. Plaats de meterkabels zodat de diode in doorlaat staat en vervolgens keer je de kabels om. Het gevolg is dat de meter een lagere weerstand meet als de diode in doorlaat staat dan deze in sper. Indien de diode niet stuk is, is er een groot verschil tussen de weerstand in doorlaat en deze in sper (factor 1000 of meer verschil)

De actuele aflezing op de meter is afhankelijk van hoe groot de inwendige spanningsbron is in de ohmmeter.

Veel digitale multimeters hebben een diode testpositie die de diodespanning in doorlaat zal aangeven en een overbelasting zal weergeven als de diode in sper staat.

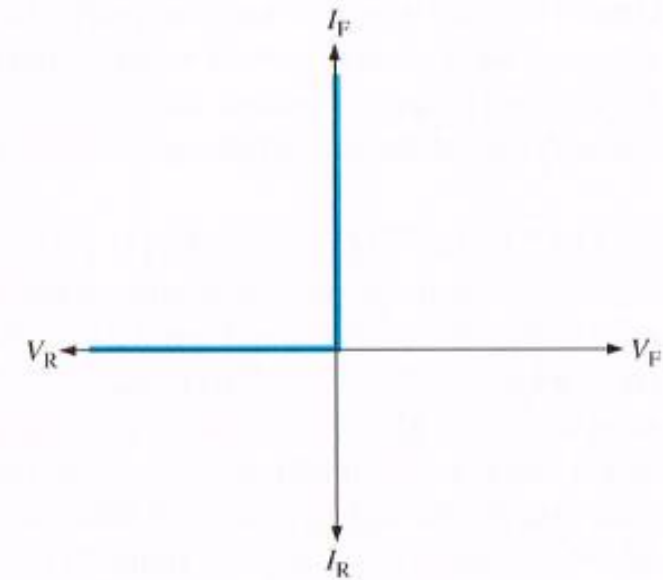
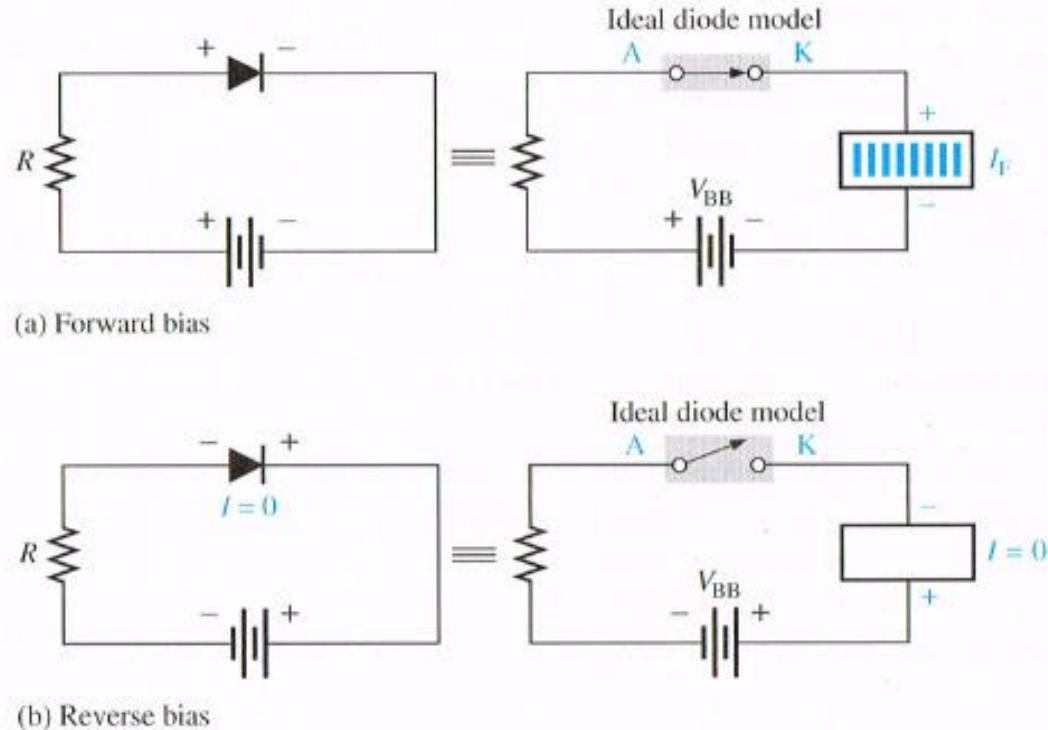


2-4 Diodekarakteristieken

Diode Model (equivalente schema's diode)

Het ideale model (fig2-12)

- Diode wordt aanzien als een schakelaar
 - Diode in doorlaat => schakelaar dicht
 - Diode in sper => schakelaar open
- In het ideale model zijn de voorwaartse spanningsval over de diode en de stroom in sper steeds gelijk aan 0
- Ideaal model houdt geen rekening met diffusiespanning (barrier potential), interne weerstand van de diode en andere effecten.
- In veel toepassingen is dit model bruikbaar (als de instelspanning veel hoger is dan de diffusiespanning)



(c) Ideal characteristic curve (color)

FIGURE 2-12 Ideal model of a diode as a switch.

2-4 Diodekarakteristieken

The offset model (blz. 53)

In dit model is het ideale model uitgebreid met de diffusiespanning (barrier voltage).

De diode in doorlaat wordt voorgesteld als een gesloten schakelaar met in serie een kleine batterij met potentiaal 0,7 V (Si) (diffusiespanning)

De positieve klem van de batterij is verbonden met de anode => V_{BB} moet deze “batterijspanning” overwinnen vooraleer de diode begint te geleiden.

Als de diode in sper wordt ingesteld, wordt deze, net als bij het ideale model, voorgesteld door een open schakelaar. (reden : diffusiespanning heeft geen effect op de in instelling in sper (beide bronnen staan in serie met dezelfde polariteit))

De karakteristieke curve is weergegeven in figuur 2-13 (c))

In het verloop van de cursus wordt dit model gebruikt voor analyses (tenzij anders vermeld)

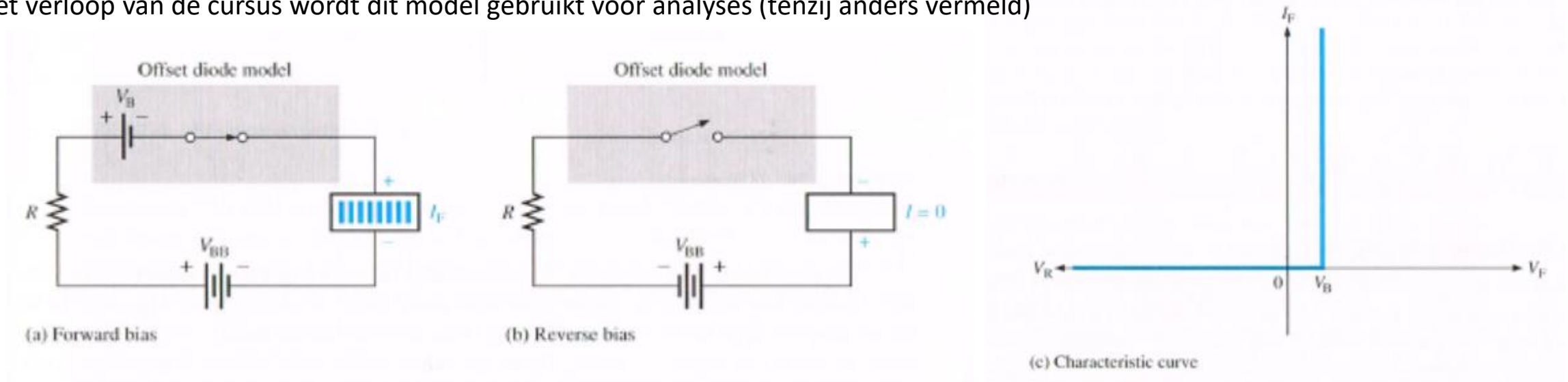


FIGURE 2-13 The offset model for a diode. The barrier potential is included in this model.

2-4 Diodekarakteristieken

The offset-resistance model

Figuur 2-14(a) toont het model van de diode in geleiding ingesteld. De weerstand in doorlaat is in principe een AC-weerstand. Deze weerstand varieert (afhankelijk van waar hij gemeten wordt) maar wordt hier voorgesteld als een vaste weerstand => rechte lijn benadering

Figuur 2-14(b) toont hoe de sperweerstand zijn invloed heeft op het equivalent schema van de diode in sper. Het gevolg van deze sperweerstand is dat er een heel kleine stroom in de schakeling zal vloeien als de diode in sper staat.

Figuur 2-14(c) toon de karakteristiek van dit model.

Er zijn nog andere effecten op kleine schaal zoals de junctiecapaciteit. Deze zijn in dit model niet inbegrepen. In die gevallen (voornamelijk HF-analyse) wordt gebruik gemaakt van een computermodel.

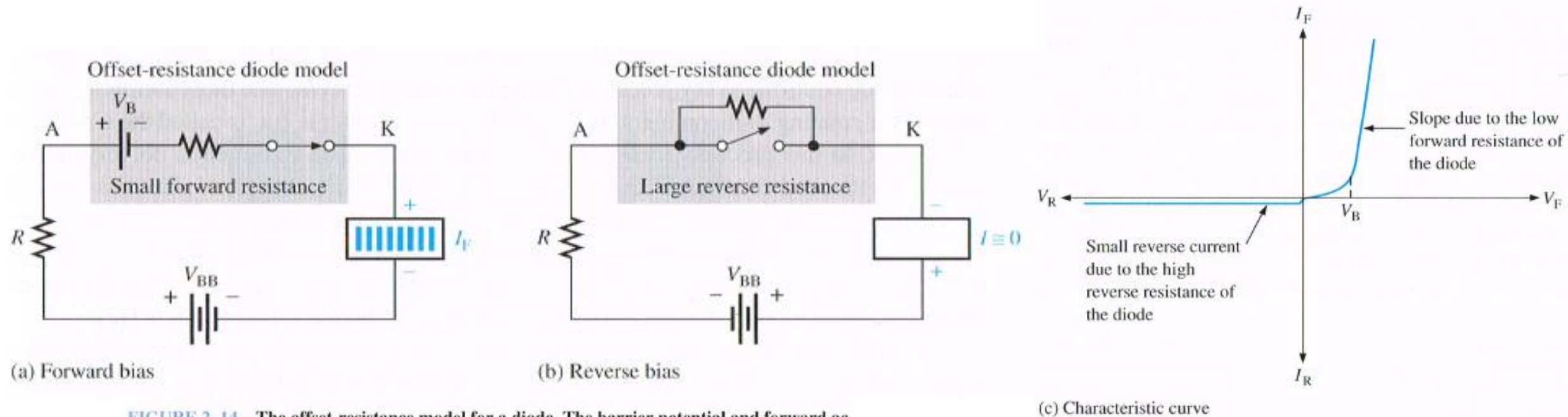


FIGURE 2-14 The offset-resistance model for a diode. The barrier potential and forward ac resistance is included in this model.

3 Bipolaire Junction Transistors (BJTs) blz. 111

Outline

- 3-1 Structuur van BJTs
- 3-2 BJT instelcircuits
- 3-3 Datasheetparameters en AC-beschouwingen
- 3-4 Gemeenschappelijke emitterschakeling
- 3-5 Gemeenschappelijke collectorschakeling
- 3-6 Gemeenschappelijke basisschakeling
- 3-7 BJT als schakelaar
- 3-8 Transistorbehuizing en terminalidentificatie
- 3-9 Troubleshooting

Doelstellingen

- Beschrijven van de opbouw en werking van de BJT
- De werking verklaren van de vier basic instellingsschakelingen om een transistor in te stellen
- Omschrijving geven van transistorparameters en karakteristieken
- Analyseren van de werking van GES
- Analyseren van de werking van GCS
- Analyseren van de werking van GBS
- Beschrijving hoe een transistor als schakelaar kan worden gebruikt
- Herkennen van verschillende behuizingen en configuraties van transistoren
- Troubleshoot diverse fouten in transistorschakelingen

In deze sectie wordt besproken hoe een transistor is samengesteld uit verschillende halfgeleidermaterialen en welke de standaard transistorsymbolen zijn.

Het gebruik van de belastingslijn wordt besproken bij het instellen van de transistor

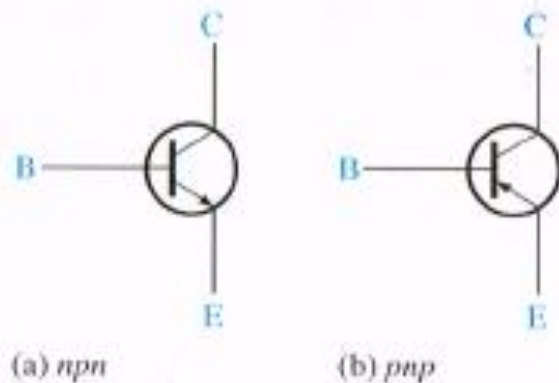
Wat moet je kunnen?

- De basisconstructie van een BJT beschrijven
- Het verschil weergeven tussen PNP en NPN transistors
- BJT-stromen definiëren en hun onderlinge relatie verklaren
- Een belastingslijn construeren voor een bepaald transistorcircuit
- Definiëren van de begrippen cutoff en saturation

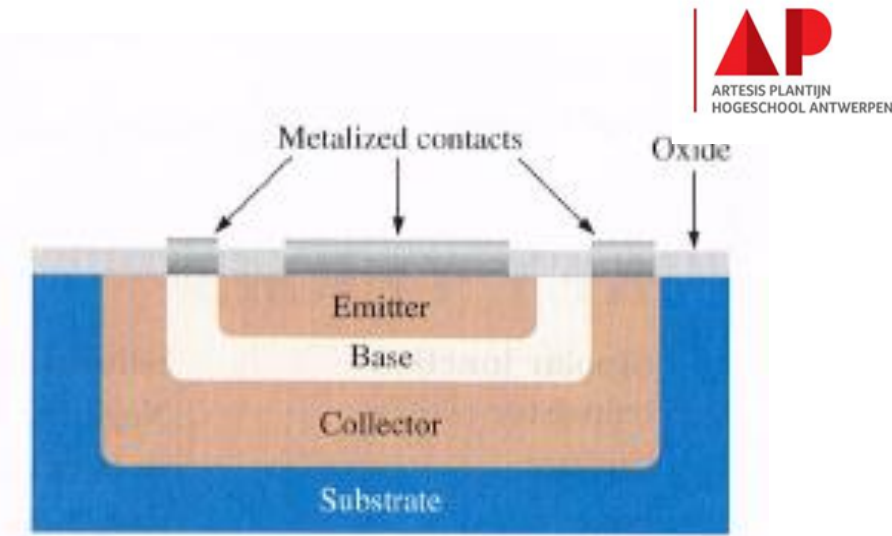
3-1 Structuur van een bipolaire BJT

- Opgebouwd met drie gedopeerde halgeleidergebieden die emitter, basis en collector worden genoemd.
- Deze drie gebieden worden gescheiden door 2 PN-juncties
- Er zijn twee typen BJTs (zie fig 3-1) : PNP (2 P-gebieden met daartussen een dun N-gebied) en NPN (2 N-gebieden met daartussen een dun P-gebied)
- PN-junctie tussen Basis en Emitter is de basis-emitterjunctie; PN-junctie tussen basis en collector is de basis-collectorjunctie (zie fig. 3-1 (b)). Beide junctions gedragen zich net zoals diodejuncties.
- Alhoewel emitter en collector van hetzelfde type materiaal zijn, het dopingsniveau en andere eigenschappen zijn verschillend.
- Beide typen worden veel gebruikt. Vermits de NPN-type meer gebruikt wordt, wordt in de cursus dit type gebruikt om de werking te verklaren.
- Term bipolair verwijst naar zowel gaten als elektronen die gebruikt worden als ladingsdragers binnen in de transistor.

FIGURE 3-2 Standard bipolar junction transistor symbols.



BJTs



(a) Basic epitaxial planar structure

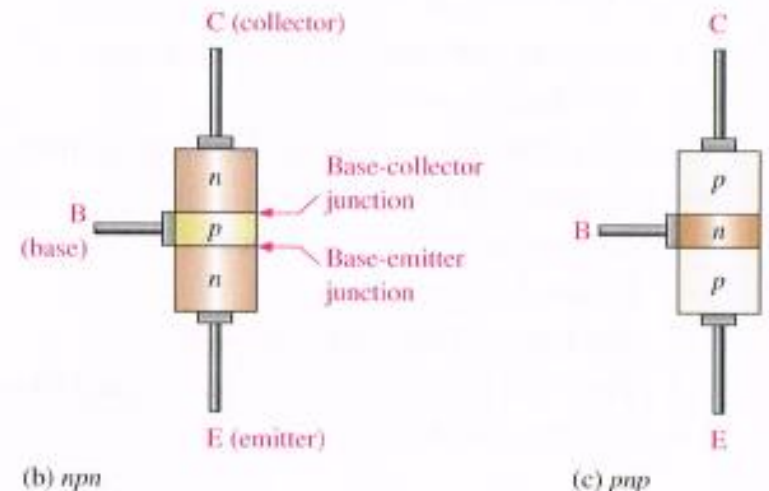
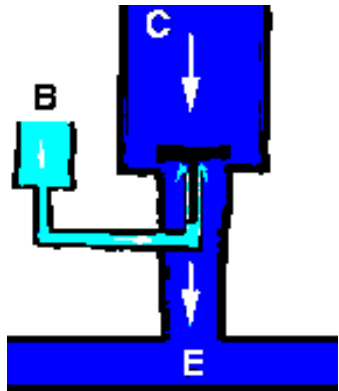


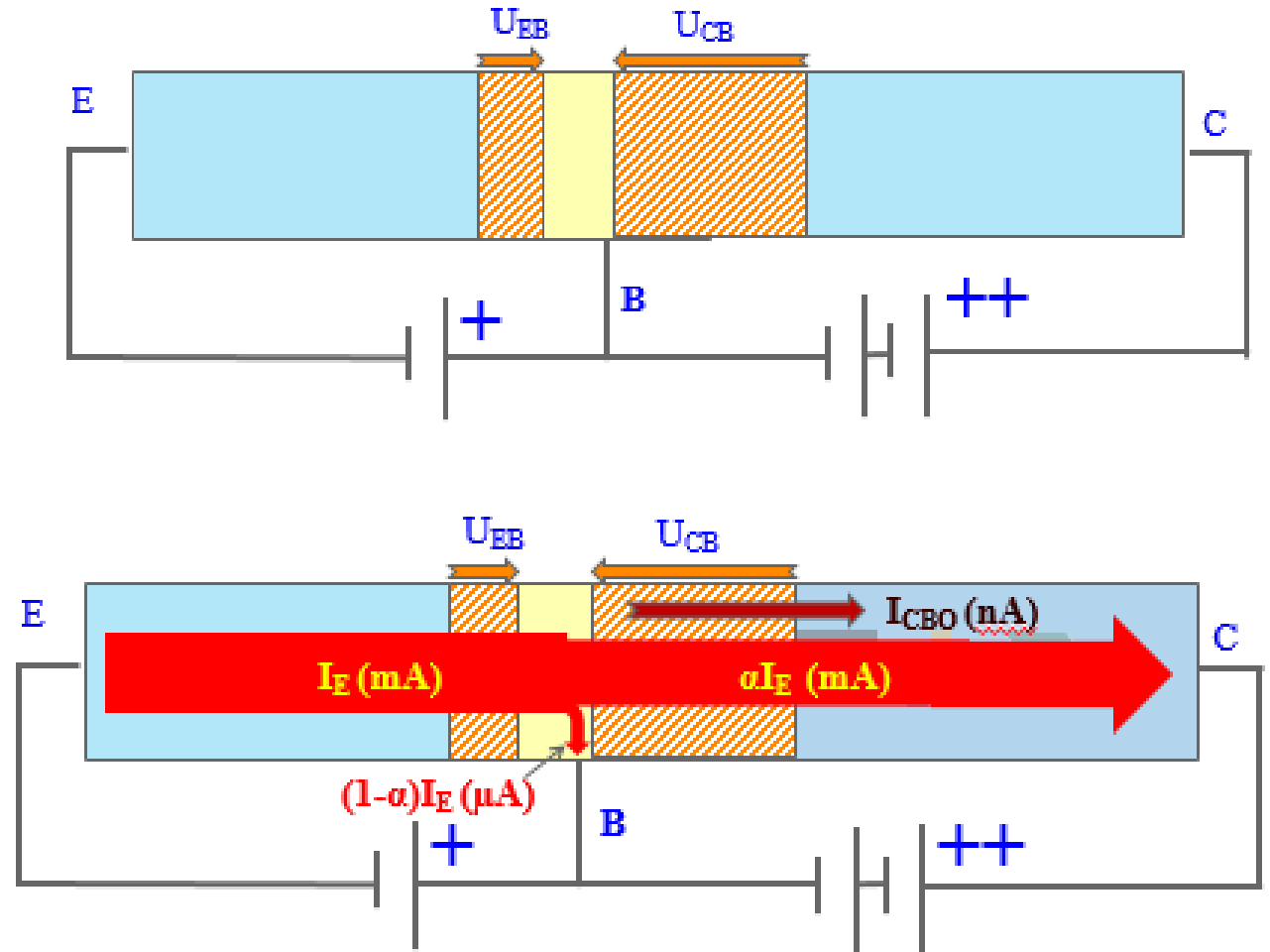
FIGURE 3-1 Construction of bipolar junction transistors.

3-1 Structuur van een bipolaire BJT

- $U_{EB} > 0,7 \text{ V} \Rightarrow$ grote stroom tussen E en B
- U_{CB} = invers aangesloten spanning; hoe groter deze spanning, hoe groter de sperlaag tussen Basis en Collector



$$I_B = I_E - \alpha I_E - I_{CBO} = (1 - \alpha) I_E - I_{CBO}$$
$$I_C = \alpha I_E + I_{CBO}$$
$$I_E = (1 - \alpha) I_E - I_{CBO} + \alpha I_E + I_{CBO} = I_B + I_C$$



3-1 Structuur van een bipolaire BJT

$$I_B = I_E - \alpha I_E - I_{CBO} = (1 - \alpha) I_E - I_{CBO}$$

$$I_C = \alpha I_E + I_{CBO}$$

$$I_E = (1 - \alpha) I_E - I_{CBO} + \alpha I_E + I_{CBO} = I_B + I_C$$

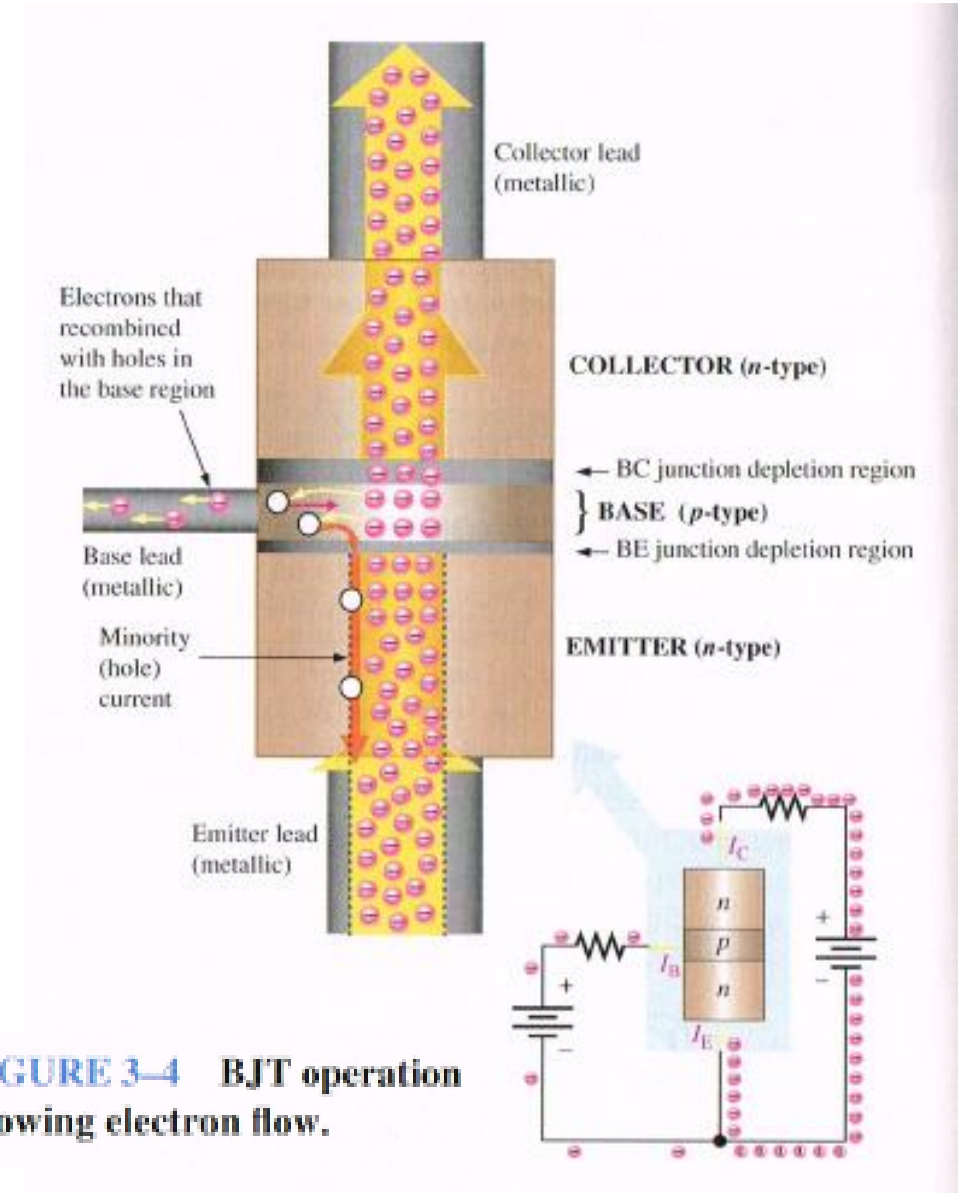
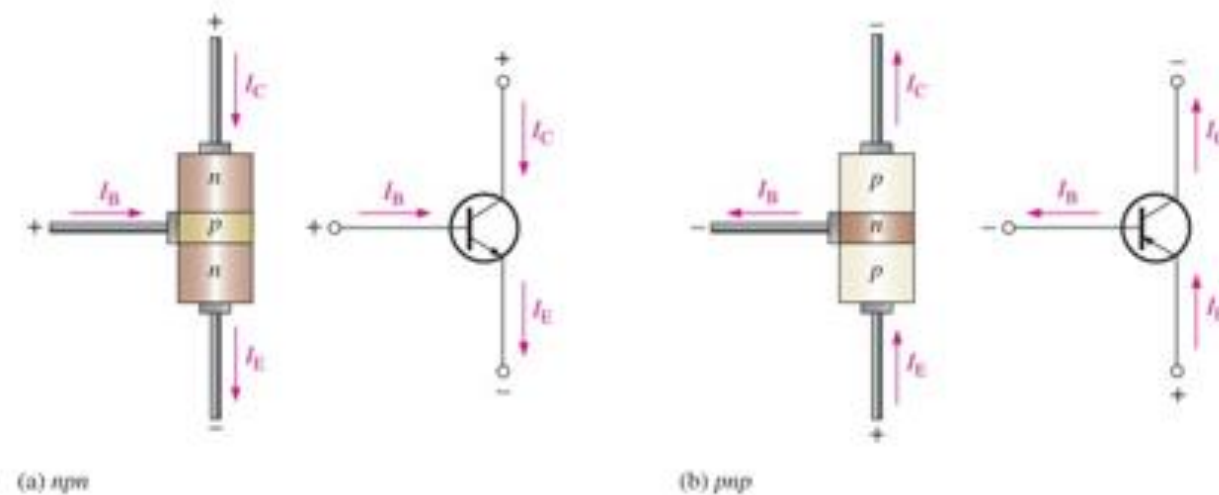


FIGURE 3-4 BJT operation showing electron flow.

- Merk op dat de pijl van een transistor wijst in de richting van de conventionele stroom
- De emitterstroom is de som van de collectorstroom en de basisstroom. Dit is : $I_E = I_C + I_B$.

Gemeenschappelijke Basisschakeling GBS

Coventionele stroomzin

- Wet van Kirchhoff :

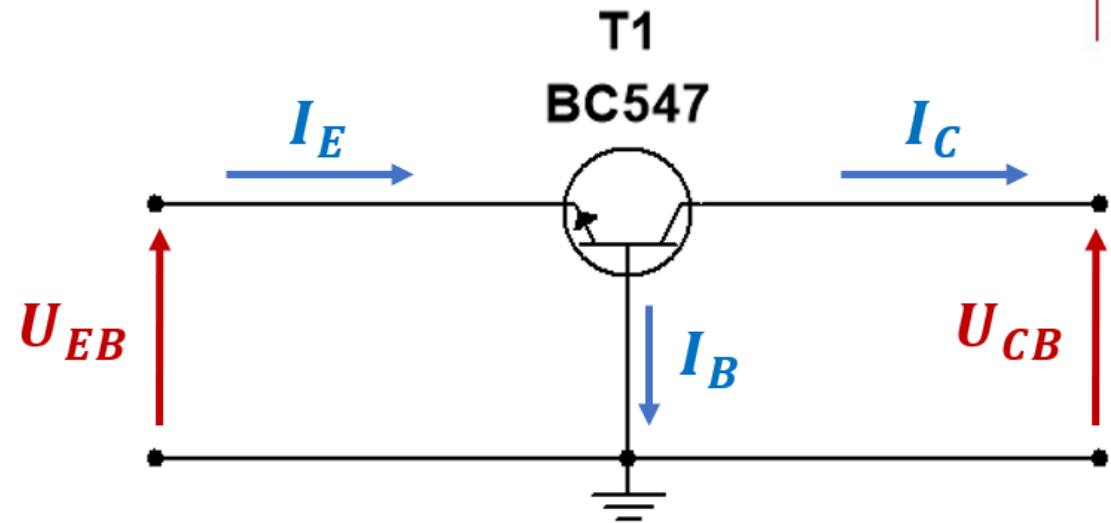
- $I_E = I_B + I_C$ (ingangsstroom)
- $I_C = \alpha I_E + I_{CBO}$ (uitgangsstroom)
- $I_B = (1 - \alpha) I_E - I_{CBO}$

- Stroomversterking** = $\frac{\text{Uitgangsstroom}}{\text{Ingangsstroom}} = \frac{I_C}{I_E} = \frac{\alpha I_E + I_{CBO}}{I_E}$

- Verwaarlozing van $I_{CBO} \Rightarrow$

- stroomversterking = $\alpha = \frac{I_C}{I_E} = H_{FB}$

- Meestal $\alpha = 0,99 \Rightarrow$ GBS heeft een stroomversterking van ongeveer 1 (in werkelijkheid wordt de stroom lichtjes verzwakt)



- Ingangsimpedantie

- $Z_{in(basis)} = \frac{U_{EB}}{I_E} = \frac{I_E \times r'_e}{I_E} = r'_e$ (laag)

- Uitgangsimpedantie

- $Z_{out(basis)} = \frac{U_{CB}}{I_C} = \frac{I_C \times r'_{cb}}{I_C} = r'_{cb}$ (gemiddeld)

- Spanningsversterking

- $A_u = \frac{U_{CB}}{U_{EB}}$

- GBS vindt men vooral in HF-schakelingen als ook in schakelingen die een lage ingangsimpedantie vereisen.

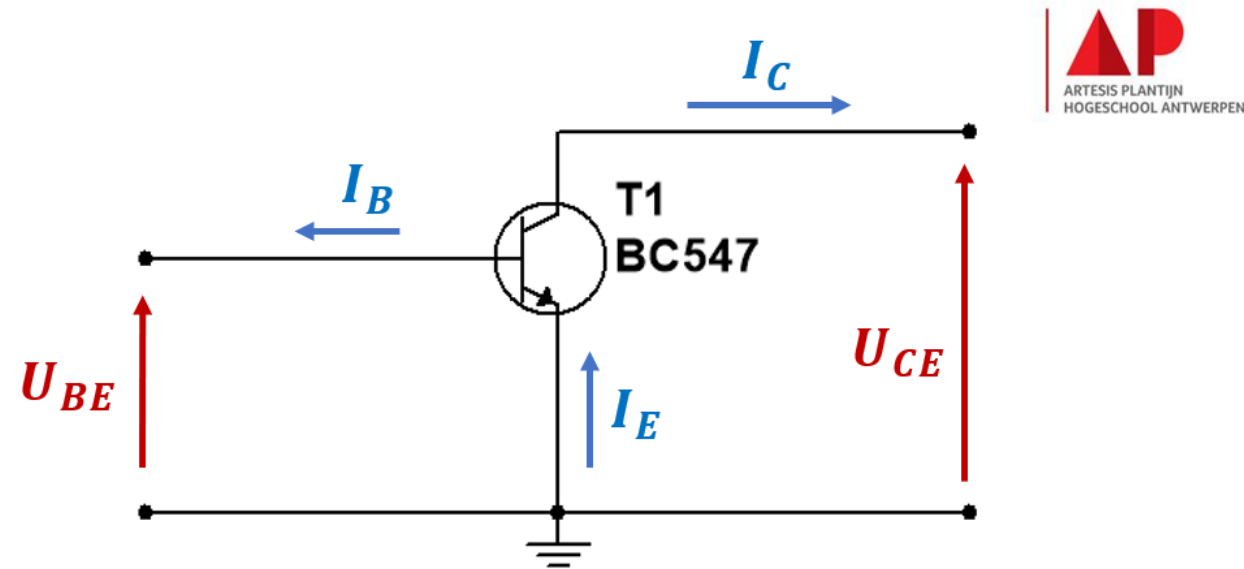
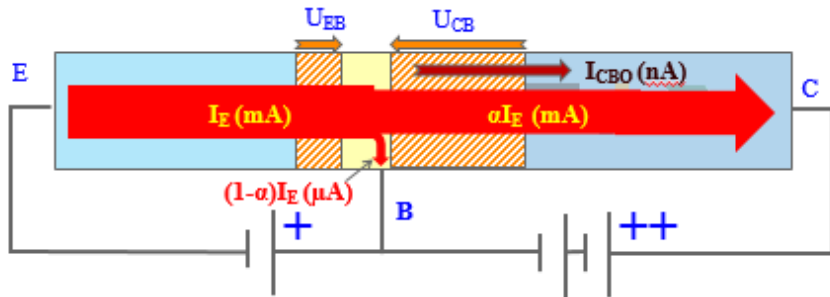
Structuur van een bipolaire BJT

Gemeenschappelijke Emitterschakeling GES

Wet van Kirchhoff:

- $I_E = I_B + I_C$
- $I_C = \alpha I_E + I_{CBO}$
- $I_B = (1 - \alpha) I_E - I_{CBO}$

- $\text{Stroomversterking} = \frac{\text{Uitgangsstroom}}{\text{Ingangsstroom}} = \frac{I_C}{I_B} = A_i$
- $A_i = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$ (mits verwaarlozing I_{CBO})
- $\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} = H_{FE} = \text{stroomversterkingsfactor van GES}$
- Als $\alpha = 0,99 \Rightarrow \text{GES heeft een stroomversterking van } \frac{0,99}{1 - 0,99} = 99$
- **Merk op dat ingangsstroom is in tegenfase met uitgangsstroom \Rightarrow GES geeft 180° faseverschuiving !**



- Ingangsimpedantie
 - $Z_{in(emitter)} = \frac{U_{BE}}{I_B} = \frac{I_E \times r'_e}{I_B}$
 - $Z_{in(emitter)} = \frac{\beta \times I_B \times r'_e}{I_B} = \beta \cdot r'_e = h_{ie} \text{ (gemiddeld)}$
- Uitgangsimpedantie
 - $Z_{out(emitter)} = \frac{U_{CE}}{I_C} = \frac{I_C \times r'_{ce}}{I_C} = r'_{ce} \text{ (gemiddeld)}$
- Spanningsversterking
 - $A_u = \frac{U_{CE}}{U_{BE}}$
- **GES is de meest voorkomende schakeling; deze schakeling levert een groot vermogenoverdracht op ($A_p = A_u \times A_i$) en komt het meest voor in versterkerschakelingen**

Structuur van een bipolaire BJT

Gemeenschappelijke Collectorschakeling GCS

- Wet van Kirchhoff

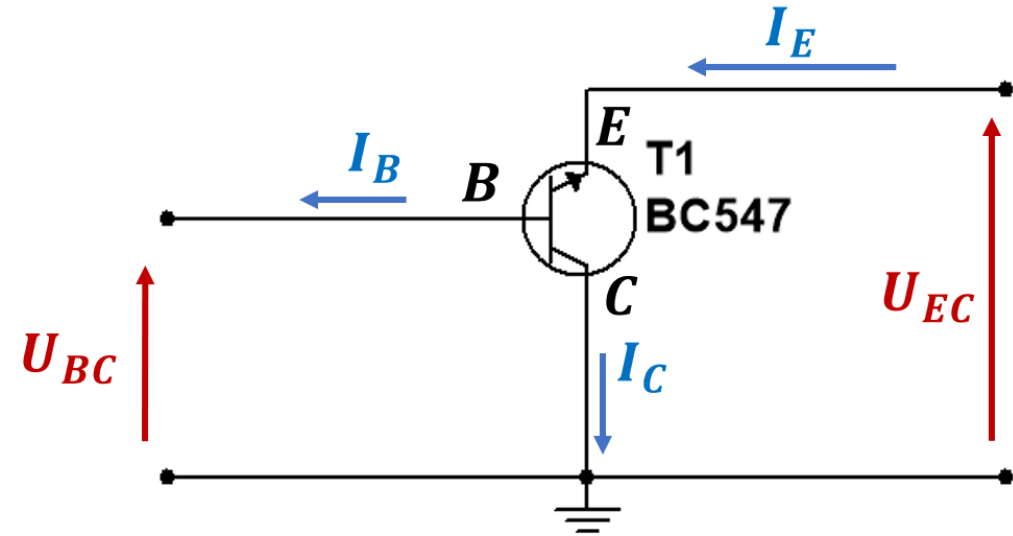
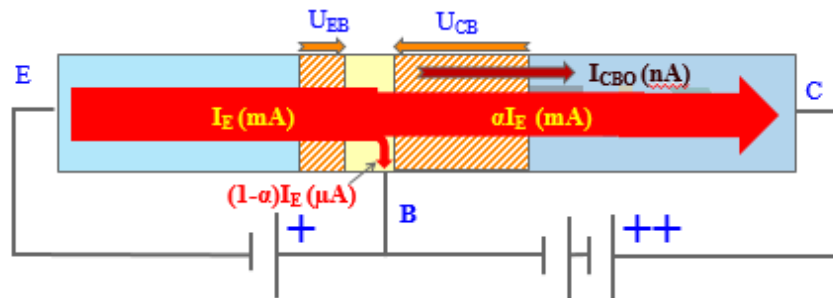
- $I_C = \alpha I_E + I_{CBO}$
- $I_B = (1 - \alpha) I_E - I_{CBO}$
- $I_E = I_B + I_C$

- Stroomversterking = $\frac{\text{Uitgangsstroom}}{\text{Ingangsstroom}} = \frac{I_E}{I_B} = A_i$

- $A_i = \frac{1}{1 - \alpha} = H_{FC}$ (mits verwaarlozing I_{CBO})

- Als $\alpha = 0,99 \Rightarrow$ GCS heeft een stroomversterking van $\frac{1}{1 - 0,99} = 100$

- Merk op dat $H_{FE} = H_{FC} * H_{FB}$ of: $\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} = \frac{1}{1 - \alpha} * \alpha$**



- Ingangsimpedantie

- $Z_{in(collector)} = \frac{U_{BC}}{I_B} = \frac{U_{BE} + U_{EC}}{I_B} = \frac{I_E \times r'_e + I_E \times R_L}{I_B}$
- $Z_{in(collector)} = \frac{I_E (r'_e + R_L)}{I_B} = \frac{\beta \cdot I_B (r'_e + R_L)}{I_B}$
- $Z_{in(collector)} = \beta \cdot (r'_e + R_L)$ (hoog)

- Uitgangsimpedantie

- $Z_{out(collector)} = \frac{U_{EC}}{I_E} \cong r'_e$ (klein)

- Spanningsversterking

- $A_u = \frac{U_{EC}}{U_{BC}}$

- GCS wordt omwille van zijn hoge ingangswaarsand en lage uitgangswaarsand als buffer gebruikt.

- GCS heeft de grootste stroomversterking

3-1 Structuur van een bipolaire BJT

Karakteristieken van een BJT (blz.116)

Basis-Emitter karakteristiek (fig. 3-8)

- Identiek als diodekarakteristiek => bij foutzoeken bij een transistor kan men deze spanning opmeten om na te gaan of de transistor in geleiding is.
- Spanning veel groter dan 0,7 V => veel kans dat er een onderbreking is in de aansluiting van basis en/of emitter
- Spanning gelijk aan 0V => transistor is niet in geleiding

Collectorkarakteristiek (uitgangskarakteristiek)

- Geen I_C als $I_B = 0$ => collectorkarakteristiek tekenen => bepaalde I_B instellen en constant houden.
- Circuit fig. 3-9(a) kan gebruikt worden om karakteristiek op te meten.
- $V_{CE} \approx 0,7V$ => basis-collectordiode komt in sper => $I_C = \beta_{DC} \cdot I_B \Rightarrow I_C$ blijft nagenoeg constant bij stijgende V_{CE} . Werkelijkheid I_C stijgt lichtjes doordat de sperlaag (depletionregion) van de CB-dioden groter wordt.
- I_B op een andere waarde instellen => analoge $I_C - U_{CE}$ -karakteristiek gevormd (fig 3-9(c)).

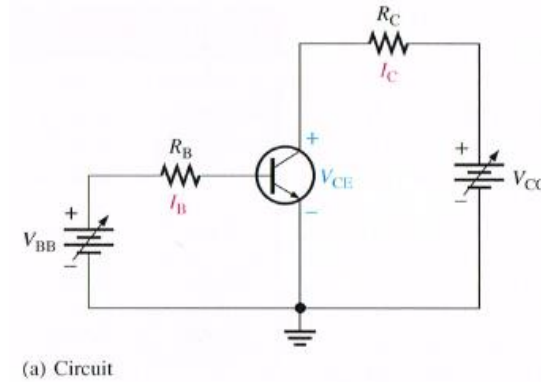


FIGURE 3-8 Base-emitter characteristic.

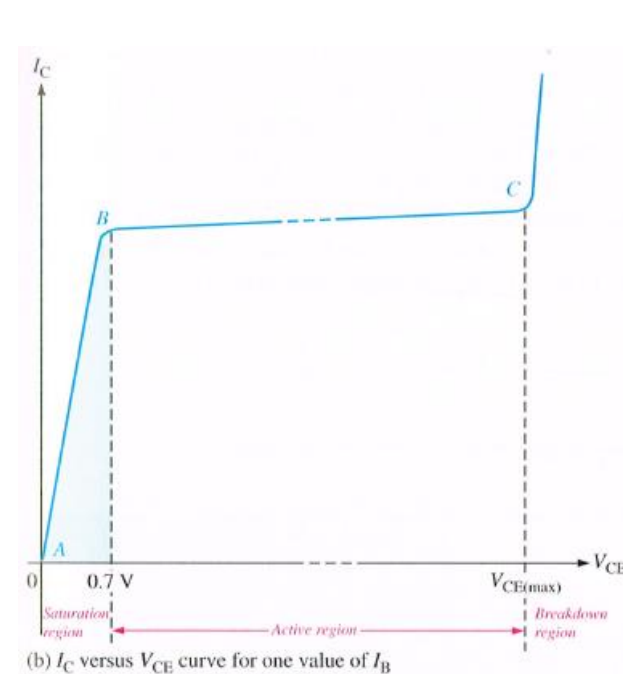


FIGURE 3-9 Collector characteristic curves.

3-1 Structuur van een bipolaire BJT

EXAMPLE 3-2

Sketch the family of collector curves for the circuit in Figure 3-10 for $I_B = 5\ \mu\text{A}$ to $25\ \mu\text{A}$ in $5\ \mu\text{A}$ increments. Assume that $\beta_{DC} = 100$.

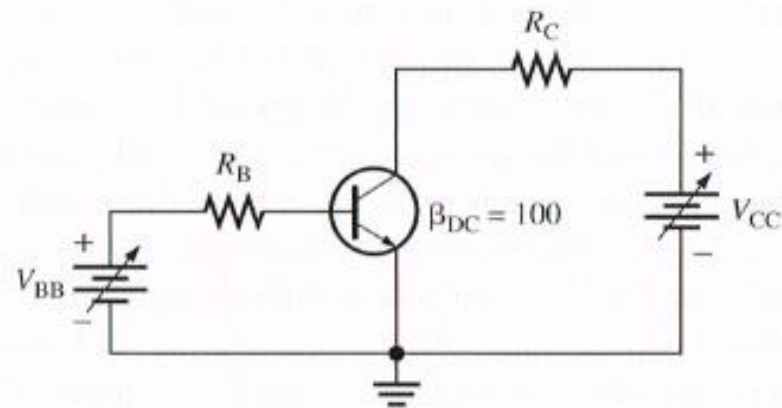


FIGURE 3-10

SOLUTION

Table 3-1 shows the calculations of I_C using the relationship $I_C = \beta_{DC} I_B$. The resulting curves are plotted in Figure 3-11. To account for the forward Early voltage, the resulting curves are shown with an arbitrary upward slope as previously discussed.

TABLE 3-1	
I_B	I_C
$5\ \mu\text{A}$	$0.5\ \text{mA}$
$10\ \mu\text{A}$	$1.0\ \text{mA}$
$15\ \mu\text{A}$	$1.5\ \text{mA}$
$20\ \mu\text{A}$	$2.0\ \text{mA}$
$25\ \mu\text{A}$	$2.5\ \text{mA}$

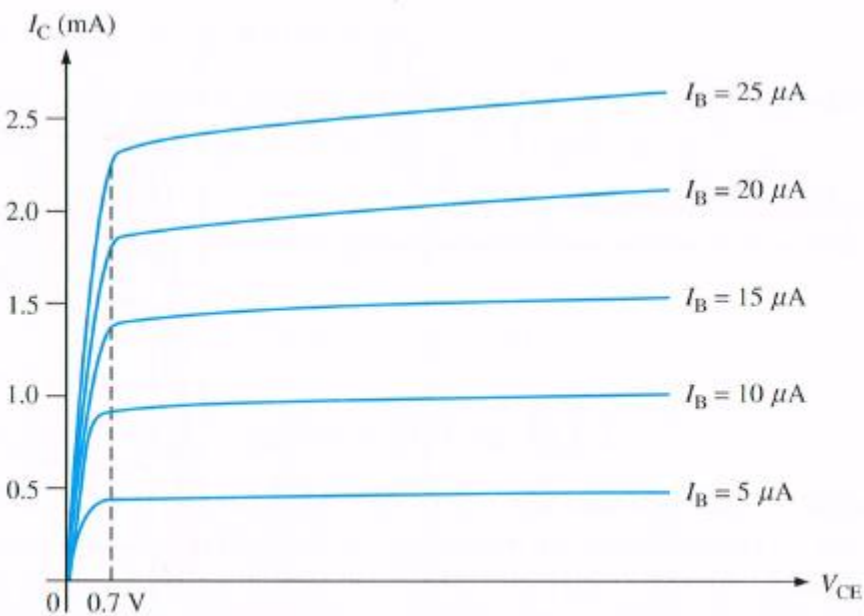


FIGURE 3-11

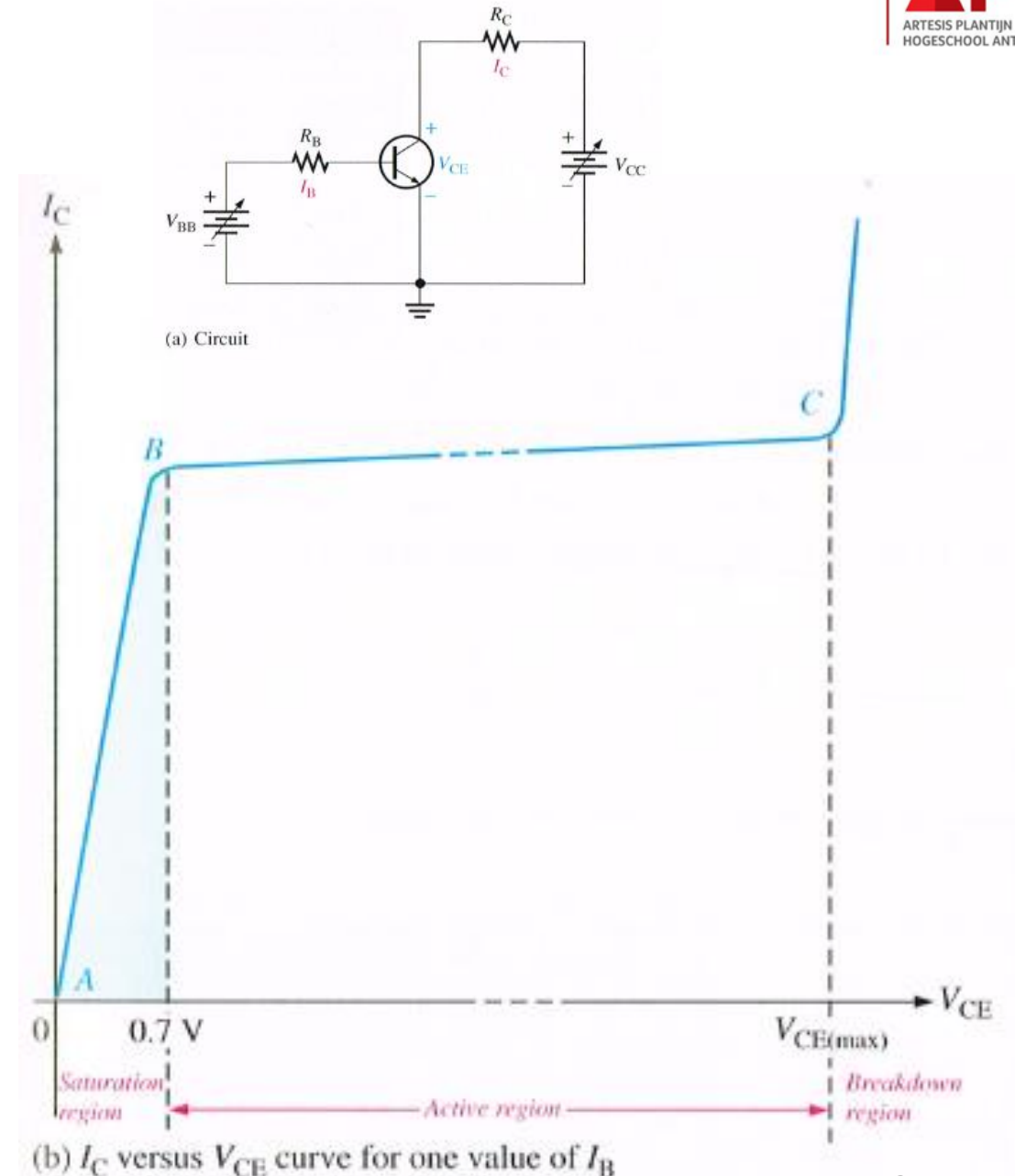
3-1 Structuur van een bipolaire BJT

Cutoff en saturation (verzadiging)

- $I_B = 0 \Rightarrow$ transistor is in cutoff \Rightarrow praktisch geen I_C enkel een kleine hoeveelheid lekstroom I_{CEO} die te verwaarlozen is.
- In cutoff zijn zowel BE-diode als BC-diode in sper aangesloten. De collectorstroom is zo goed als 0 mA \Rightarrow spanningsval over $R_C = 0V$
- BE-junctie in doorlaat gepolariseerd en de basisstroom wordt vergroot \Rightarrow collectorstroom vergroot $\Rightarrow V_{CE}$ daalt ten gevolge van een grotere spanningsval over R_C
- Als I_B groot genoeg is staat nagenoeg de volledige voedingsspanning V_{CC} over R_C met nagenoeg geen spanning meer over de transistor (ideaal 0V). Deze conditie staat bekend als saturatie (verzadiging)
- Saturatie treedt op als de voedingsspanning V_{CC} staat over de totale weerstand van het collectorcircuit R_C .

$$I_{C(sat)} = \frac{V_{CC}}{R_C}$$

- Eens I_B hoog genoeg om verzadiging te veroorzaken, de formule van de stroomversterking $I_C = \beta_{DC} / I_B$ is niet langer geldig.
- Als V_{CE} zijn verzadigingswaarde bereikt (ideaal gelijk aan 0V; praktisch 0,1 tot 0,3 V (tot 3 V voor vermogentransistor))



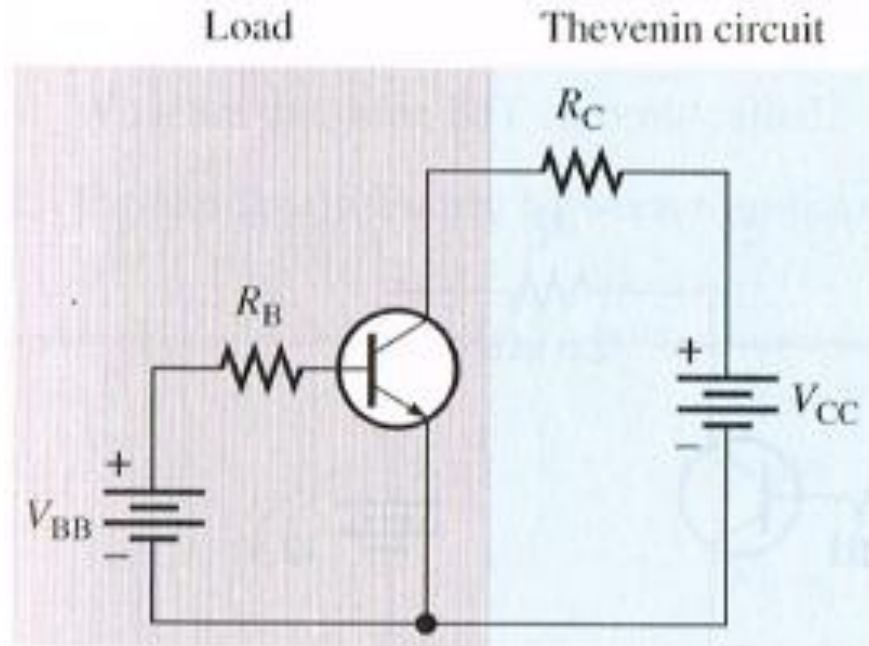
(b) I_C versus V_{CE} curve for one value of I_B

FIGURE 3-9 Collector characteristic curves.

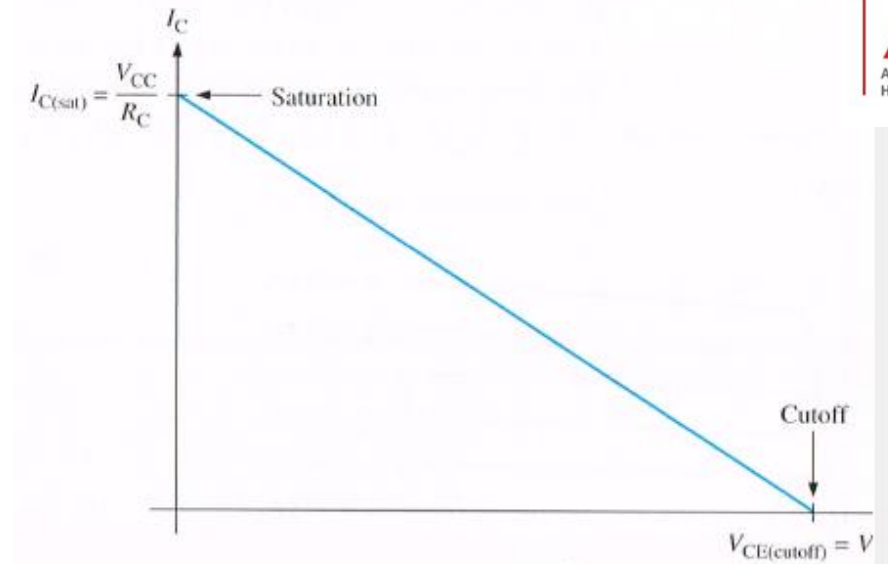
3-1 Structuur van een bipolaire BJT

DC belastingslijn

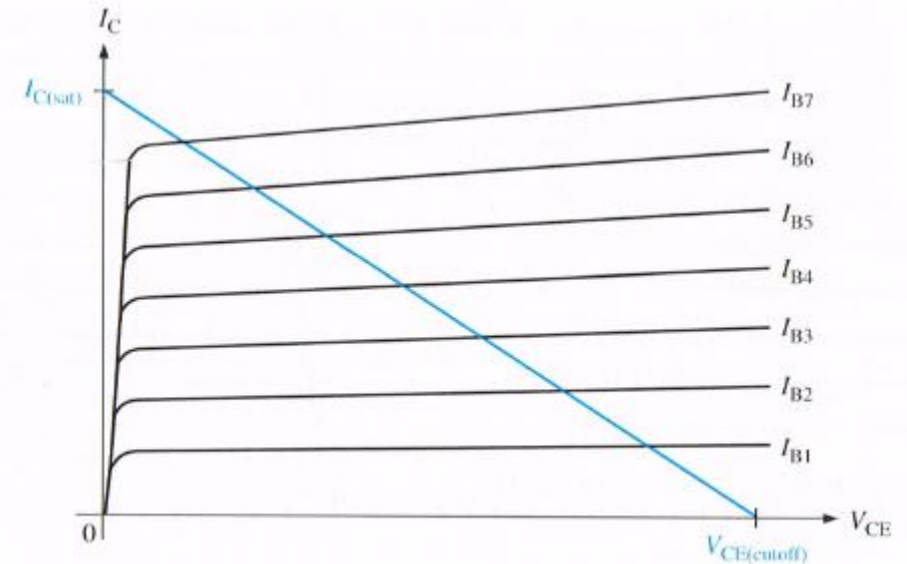
- Een rechte lijn tussen verzadigingspunt (saturation) en cutoff stelt de belastingslijn voor van het circuit.



(a) The collector circuit, shown in the blue box, is a Thevenin circuit. The transistor circuit, shown in the gray box, is the load.



(b) DC load line for the Thevenin circuit in (a)



(c) Collector characteristic curves superimposed on the dc load line

Section 3-1 CHECKUP

1. Hoe worden de 3 BJT-stromen genoemd?
2. Wat is de definitie van β_{DC} ?



4-1 Structuur van Field-effect transistors (blz 178)

Wat is het verschil met BJT?

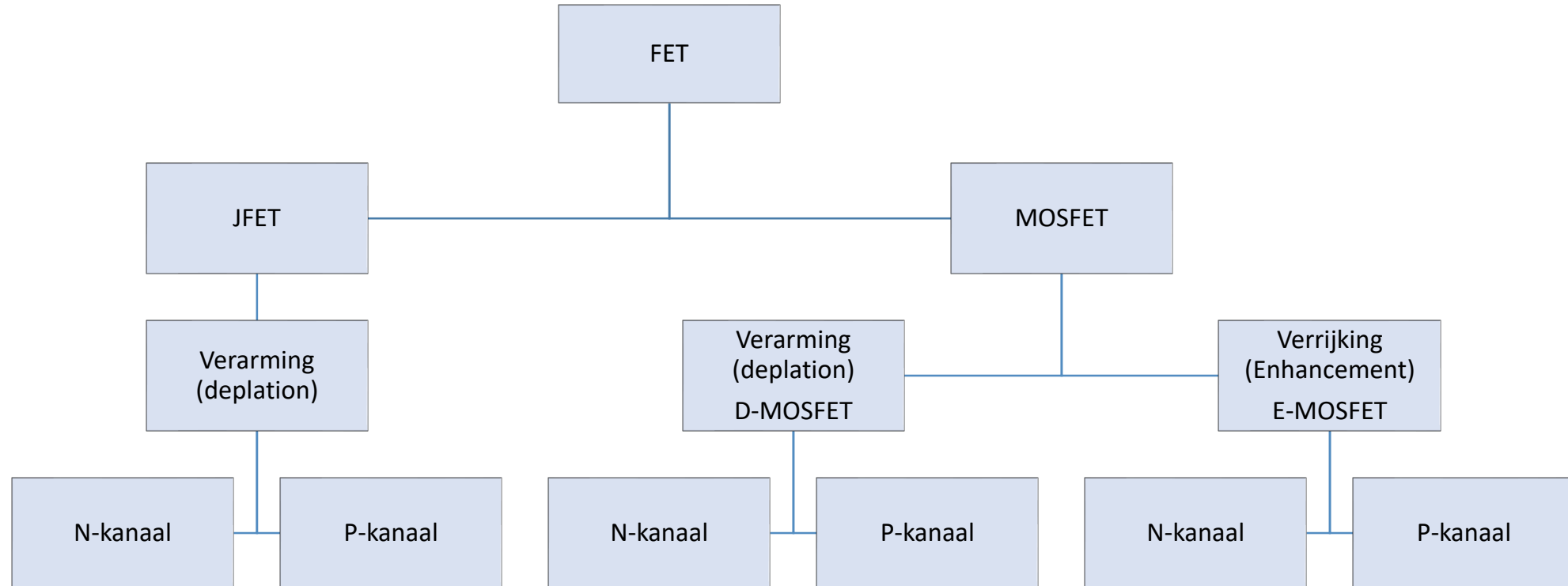
Bipolar junction transistor (BJT) is een door stroom gecontroleerde component. De basisstroom controleert de collectorstroom.

Field effect transistor is een spanningsgestuurde component. De spanning aan de gate controleert de hoeveelheid stroom door de component

Wat moet je kunnen?

- De basisclasificaties voor FET's kunnen beschrijven
- Het principiële verschil tussen transistor en FET weergeven.

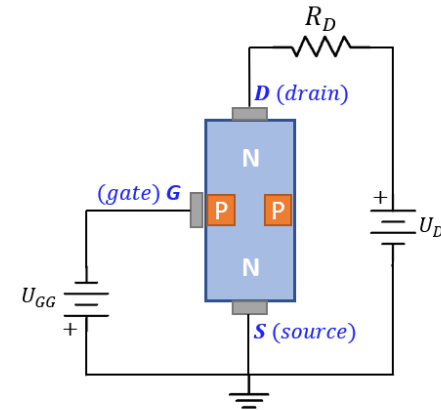
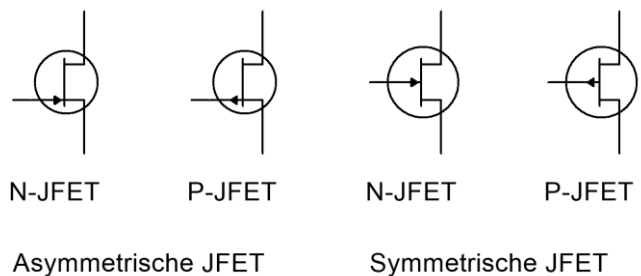
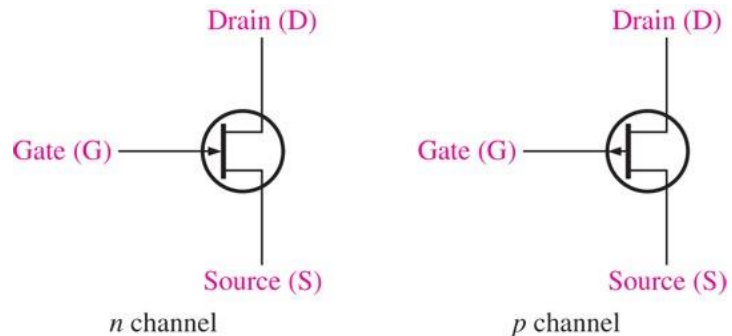
De FET Familie



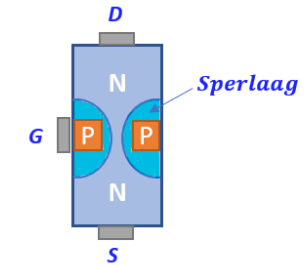
4-2 JFET-karakteristieken

JFET operation

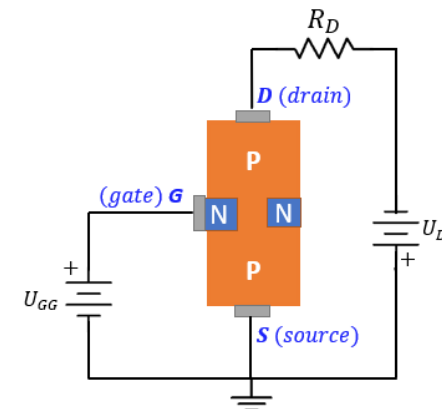
- JFET (= Junction Field Effect Transistor)
 - N- en P-type materiaal
 - 3 Terminals:
 - Drain (= Collector)
 - Gate (= Base)
 - Source (= Emitter)



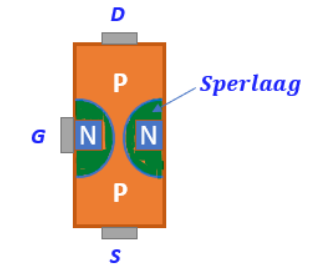
(a) principewerking JFET



(b) In sper aangesloten vernauwd het kanaal tussen drain en source



(a) principewerking PJFET



(b) In sper aangesloten P-JFET

4-2 JFET-karakteristieken

JFET operation (blz. 180)

Door de Gate-Source terminals te reverse biassen (in sper instellen) kan men de stroom I_D regelen

Opmerking: een JFET wordt altijd gebruikt met de gate-source PN-junctie reverse biased (in sper aangesloten), nooit forward biased (in doorlaat aangesloten)

JFET Symbolen

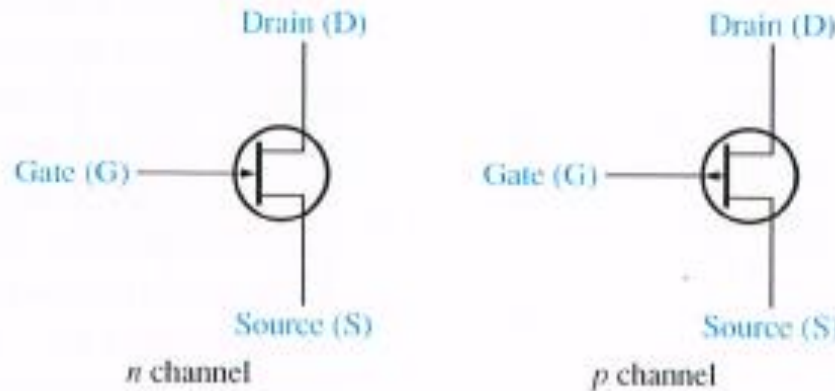


FIGURE 4-4 JFET schematic symbols.

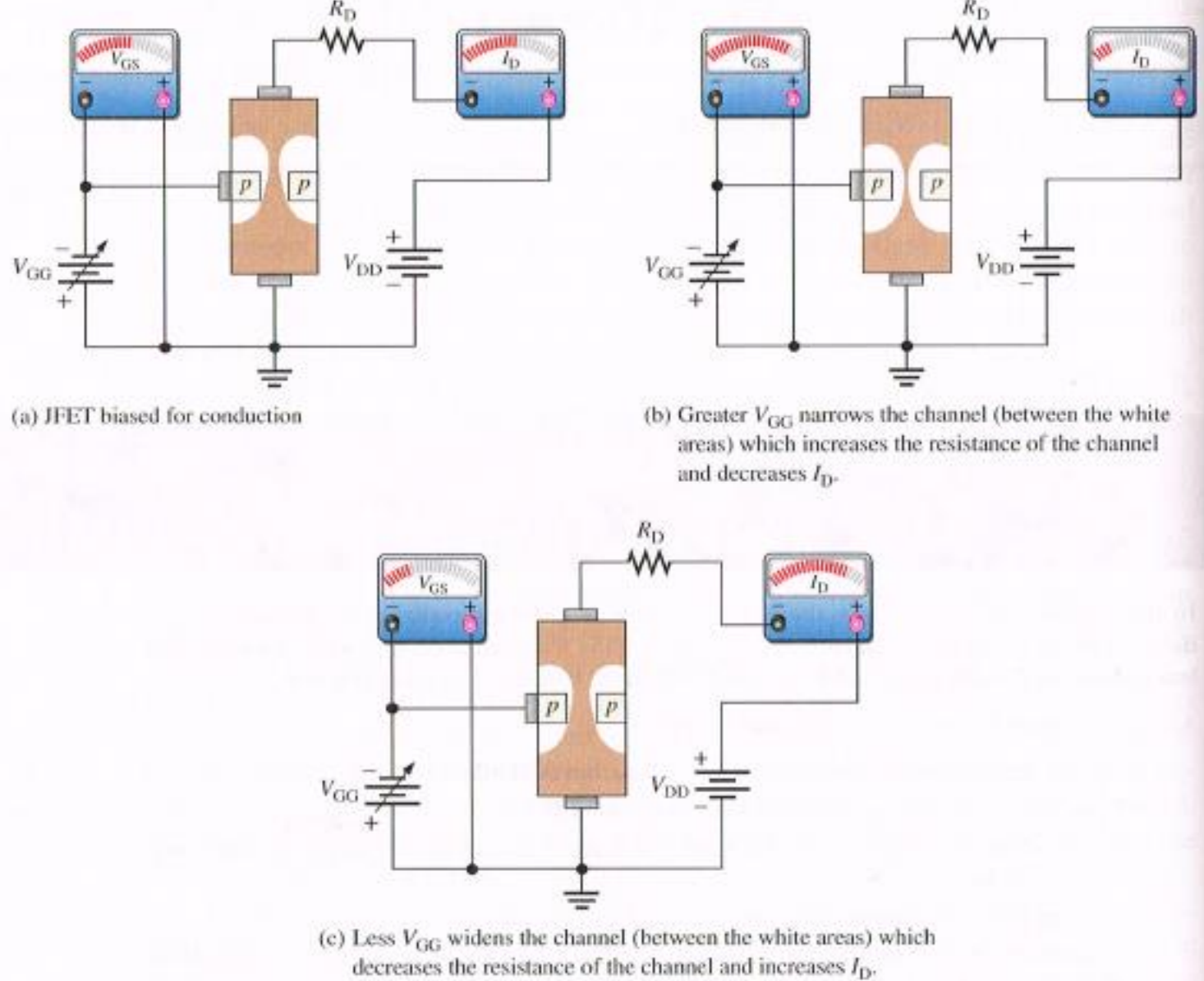


FIGURE 4-3 Effects of V_{GG} on channel width, resistance, and drain current ($V_{GG} = V_{GS}$).

4-2 JFET-karakteristieken

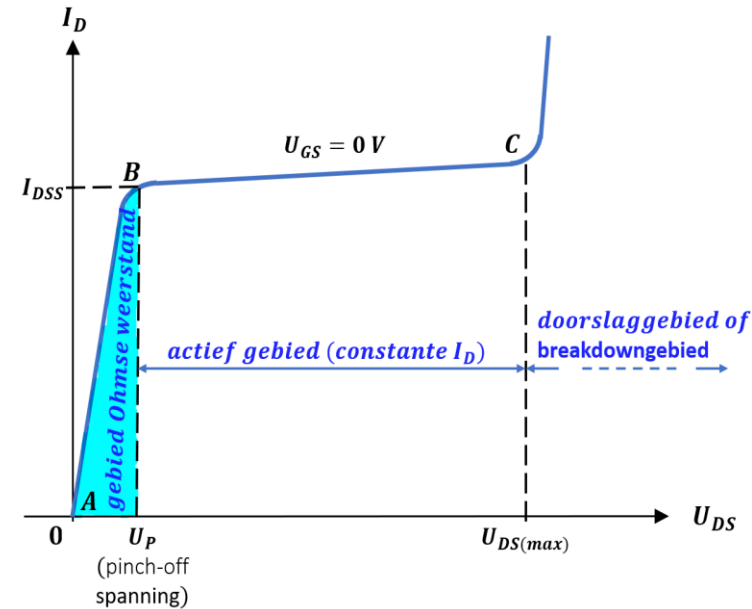
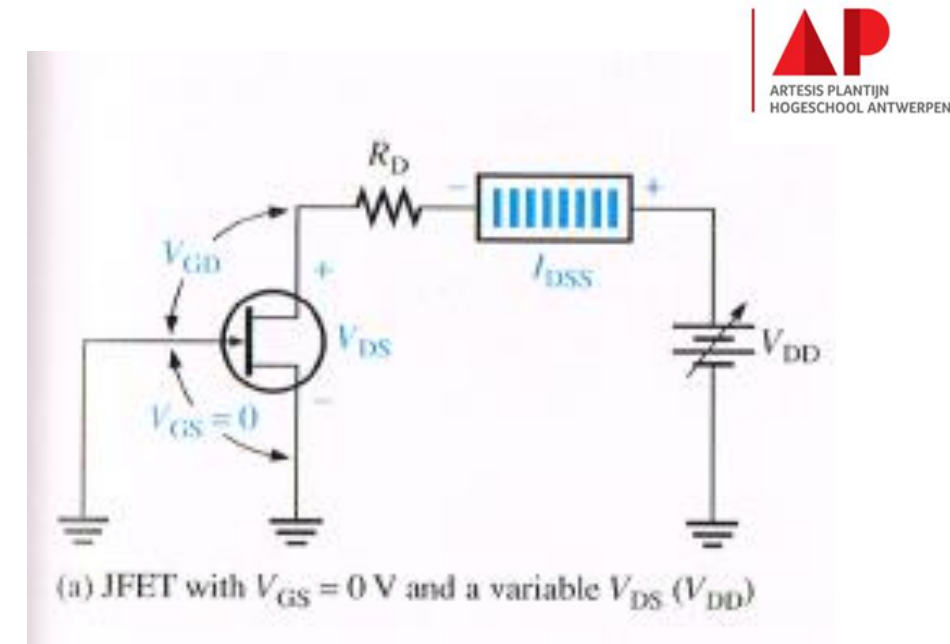
JFET-uitgangskarakteristiek

Beschouw N-kanaal FET waar gate-source spanning = 0 V ($V_{GS} = 0V$; zie fig. 4-5 (a))

Als V_{DD} (en dus ook V_{DS}) stijgt $\Rightarrow I_D$ zal evenredig stijgen (fig. 4-5 (b) tussen de punten A en B) In dit gebied is de kanaalweerstand nagenoeg constant vermits de sperlaag (depletion region) niet groot genoeg is om een beduidend effect te hebben. Deze regio wordt de

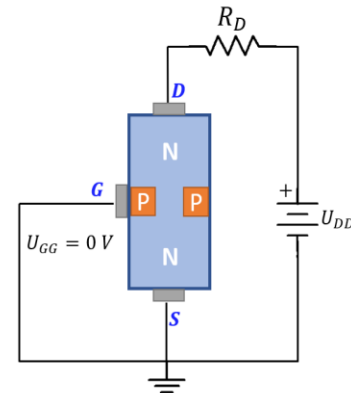
Ohmse regio genoemd (of gebied van de weerstand) omdat V_{DS} en I_D gerelateerd zijn aan de wet van Ohm. De waarde van de weerstand kan verandert worden door de gatespanning \Rightarrow men kan de JFET ook gebruiken als **spannings-gestuurde weerstand**

Bij punt B (fig. 4-5(b)) de curve komt nagenoeg horizontaal en I_D blijft nagenoeg constant. Als V_{DS} stijgt $\Rightarrow I_D$ blijft relatief constant. Dit gebied wordt het **constante stroomgebied** (constant-current region) genoemd.



FETs

(a)



(b)

4-2 JFET-karakteristieken

Pinch-Off Voltage (blz. 182)

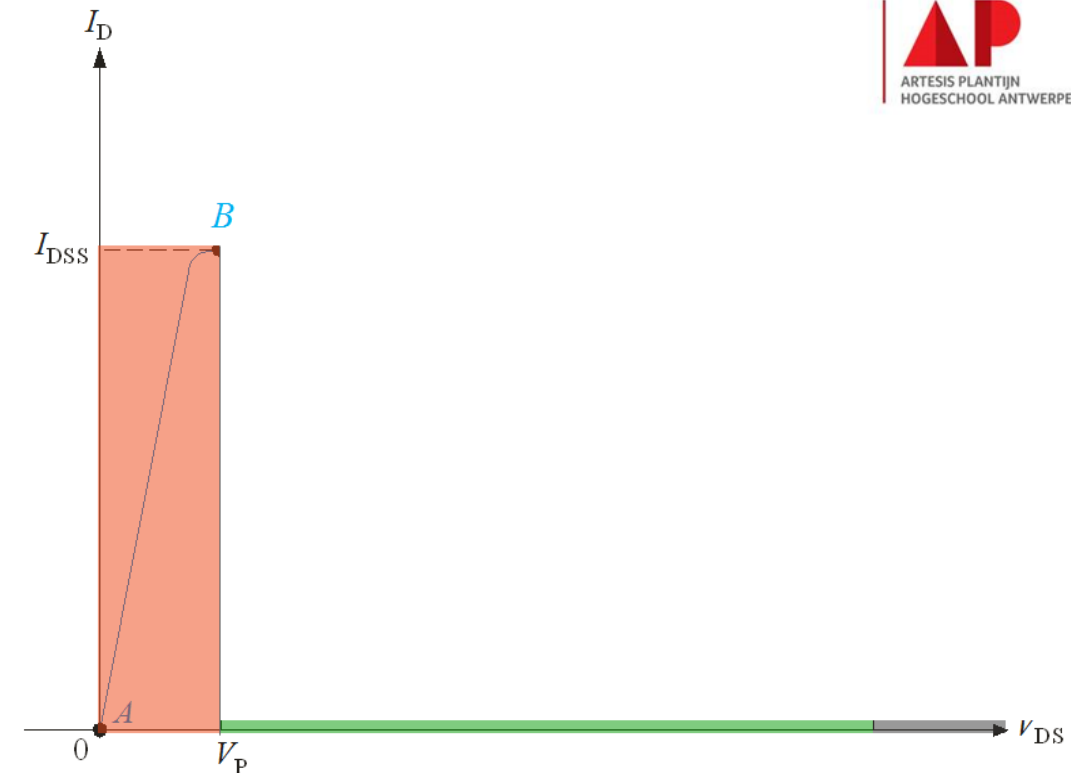
Pinch off voltage V_p is de waarde van V_{DS} , bij een $V_{GS} = 0V$ waarbij I_D constant wordt.

Per JFET vaste waarde (datasheet)

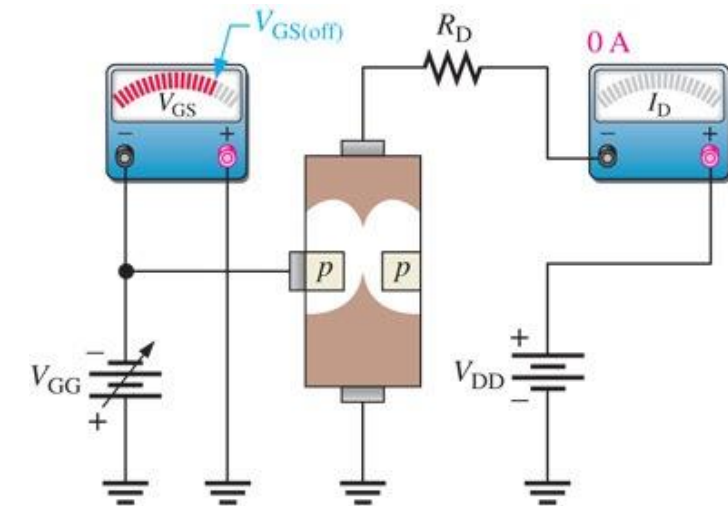
Maar als $V_{GS} < 0V$, dan zal pinch-off bij een kleinere V_{DS} (afvlakking) gebeuren dan V_p

I_D bij pinch-Off = I_{DSS}

Dit is de maximale drain stroom een JFET kan leveren bij $V_{GS} = 0V$

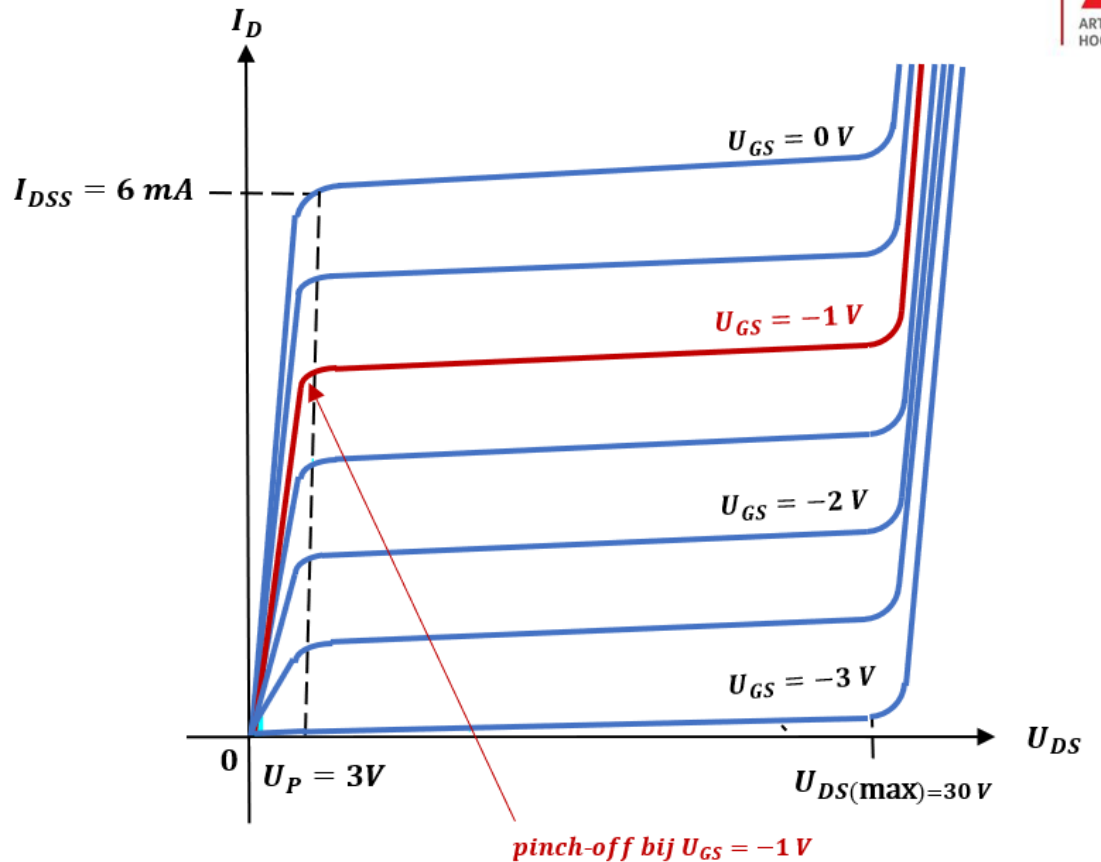
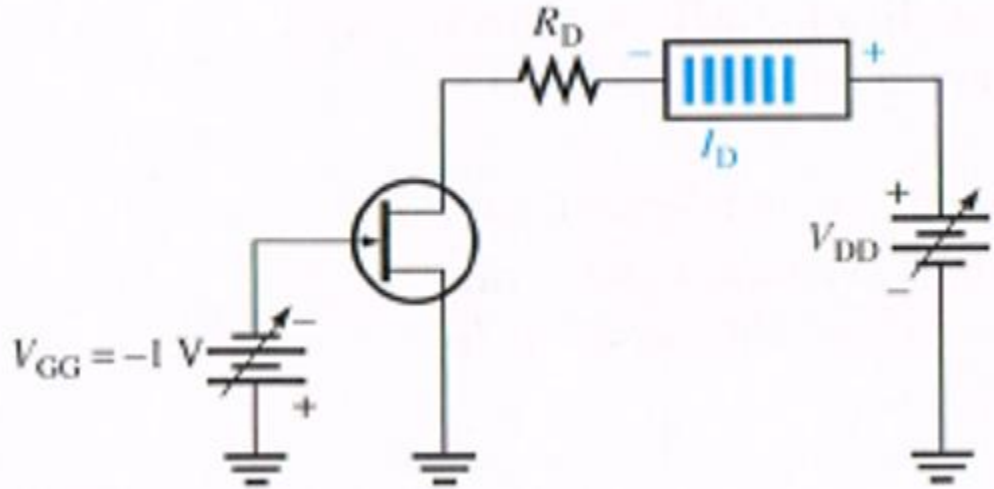


- Men kan V_{GG} zo groot maken, zodanig dat de FET volledig dichtknijpt en er geen drainstroom kan vloeien.
- De spanning waarbij dit gebeurt noemt men de cut-off spanning $V_{GS(off)}$



4-2 JFET-karakteristieken

V_{GS} controleert I_D (blz. 182)



Pinch-off doet voor zich bij een lagere U_{DS} als U_{GS} negatiever wordt

Door V_{GS} negatiever te maken, ontstaat een reeks drain-karakteristieken zoals weergegeven in fig. 4-6
 V_{GS} wordt negatiever \Rightarrow kanaal wordt door de groter wordende sperlaag verder verkleind $\Rightarrow I_D$ wordt kleiner
Merk op dat hoe negatiever de waarde van V_{GS} is, hoe lager V_{DS} is wanneer JFET de pinch-off spanning V_p bereikt (daar waar de stroom constant begint te blijven) \Rightarrow de hoeveelheid drainstroom wordt dus gecontroleerd door V_{GS}

4-2 JFET-karakteristieken

Cutoff Voltage versus Pinch-off voltage (blz. 182)

Verschillende betekenis:

Cut-off is waarde van V_{GS} waarbij $I_D = 0A$

Pinch-off is waarde van V_{DS} waarbij I_D afvlakt bij $V_{GS} = 0V$

Gelijkenis:

$V_{GS(off)}$ en V_p hebben zelfde absolute waarde (omgekeerd teken)

Vb: Als $V_{GS(off)} = -5V$ dan is $V_p = 5V$

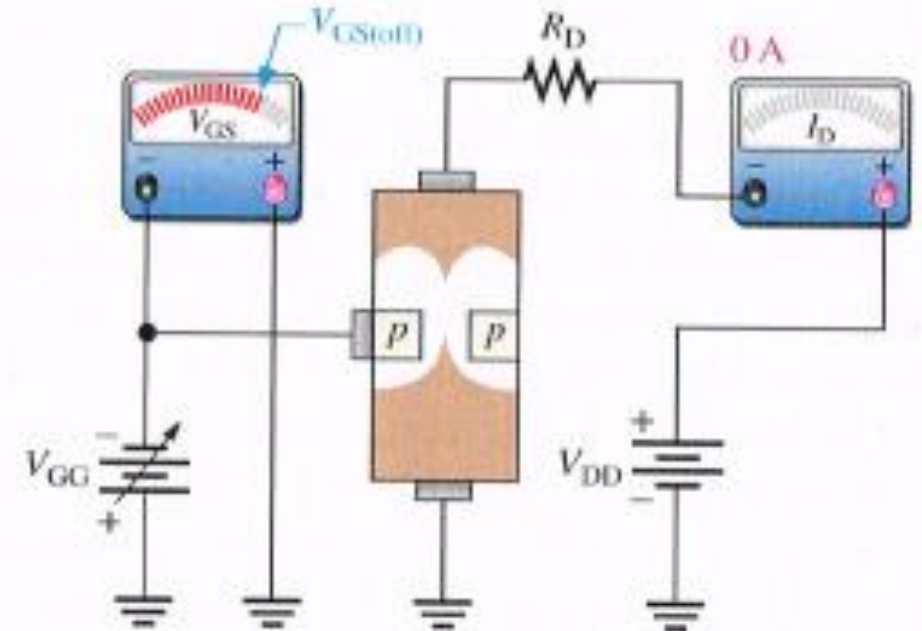


FIGURE 4-7 JFET at cutoff.

4-2 JFET-karakteristieken

JFET Transconductance Curves

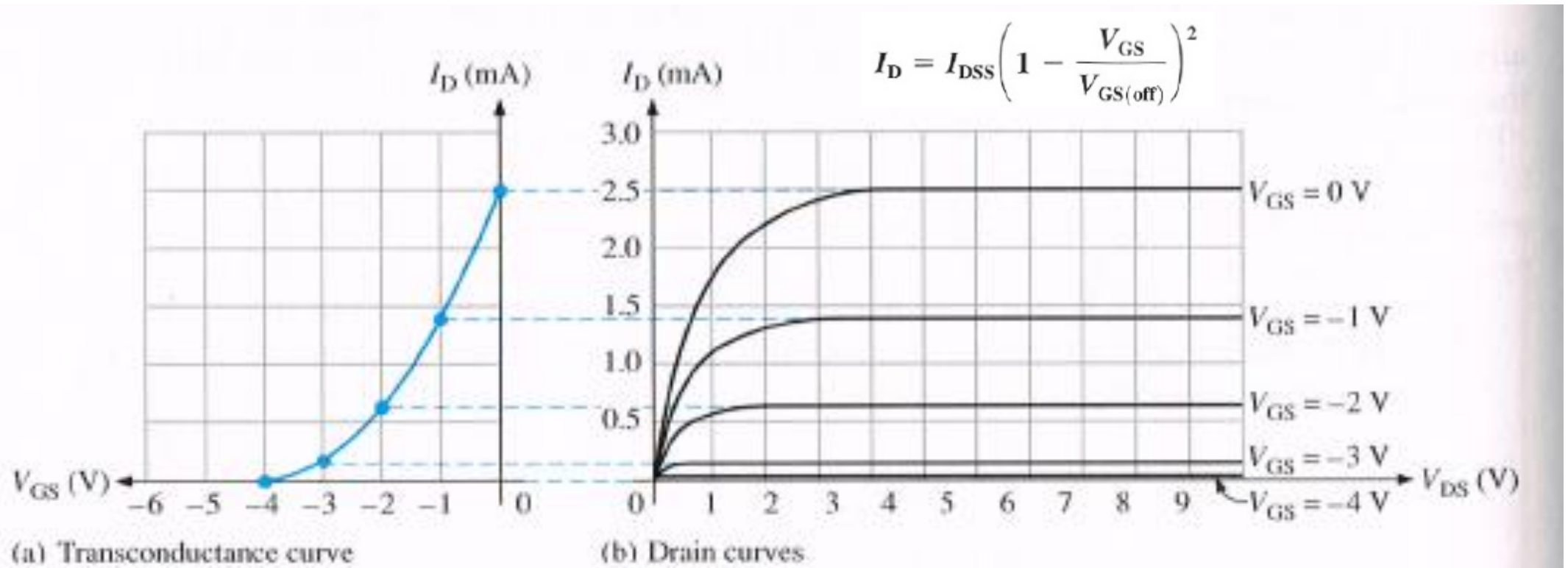


FIGURE 4-9 Representative characteristic curves for an MPF102 *n*-channel JFET.

voorbeeld: I_D bij $U_{GS} = -1$ V : $I_D = 2,5 \text{ mA} \left(1 - \frac{-1 \text{ V}}{-4 \text{ V}} \right)^2 = 2,5 \text{ mA} \times (0,75 \text{ V})^2 = 1,4 \text{ mA}$

4-2 JFET-karakteristieken

JFET Transconductance Curves

V_{GS} bepaald de hoeveelheid I_D

0V of negatief => reverse bias ingesteld

Bij 0V V_{GS} , $I_D = I_{DSS}$

Des te negatiever V_{GS} , des te kleiner I_D

Als $I_D = 0$, dan is $V_{GS} = V_{GS\ off}$

Transconductantie curve => omdat een wijziging in spanning wordt vertaald in een wijziging stroom

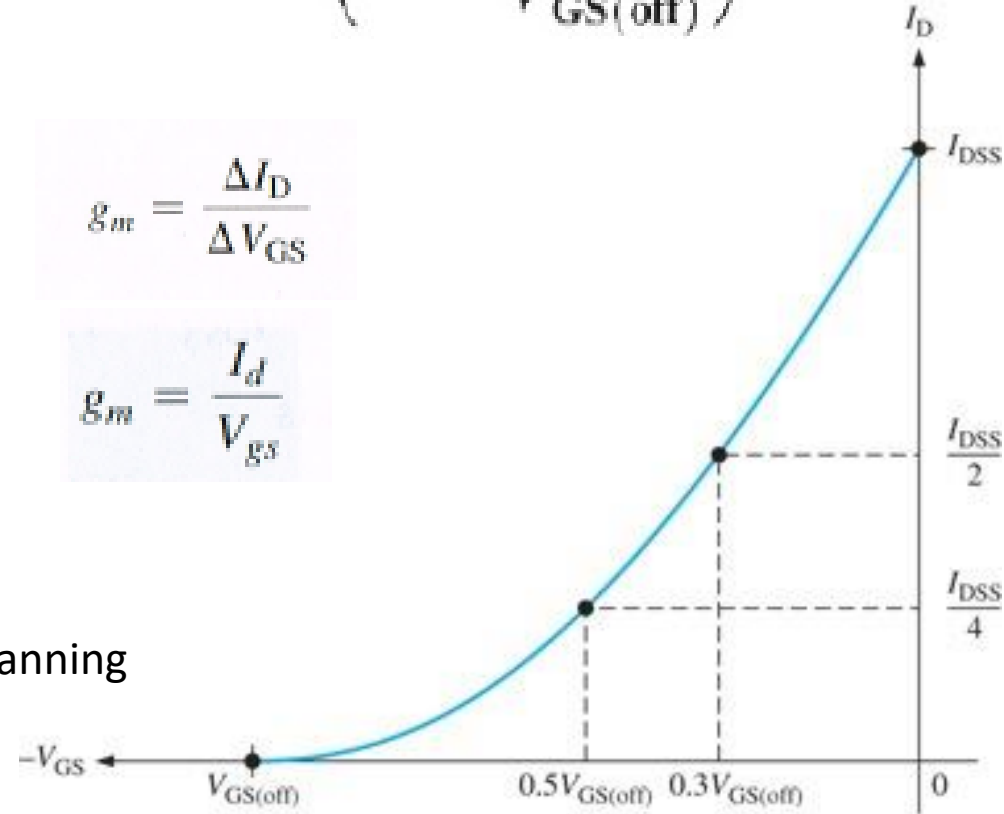
g_m is de transconductantie of steilheid (kan ook weergegeven zijn als y_{fs})

g_{mo} is de steilheid bij $I_D = I_{DSS}$ (kan ook weergegeven zijn als y_{fs})

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS(off)}} \right)^2$$

$$g_m = \frac{\Delta I_D}{\Delta V_{GS}}$$

$$g_m = \frac{I_d}{V_{gs}}$$



4-2 JFET-karakteristieken

JFET input resistance en capacitance (blz. 185)

EXAMPLE 4-3

The data sheet for an n -channel JFET shows a maximum I_{GSS} of -0.1 nA at 25°C for $V_{GS} = -30$ V and a maximum I_{GSS} of -100 nA at 150°C for $V_{GS} = -30$ V. Determine the minimum input resistance at 25°C .

SOLUTION

$$R_{IN} = \left| \frac{V_{GS}}{I_{GSS}} \right| = \frac{30 \text{ V}}{0.1 \text{ nA}} = \mathbf{300 \text{ G}\Omega}$$

PRACTICE EXERCISE

Determine the minimum input resistance for this JFET at a temperature of 150°C .

JFET ingangsweerstand en capaciteit (blz. 185)

- PN-junctie in sper heeft een zeer hoge weerstand. Bij een JFET is de gate-source junctie invers gepolariseerd waardoor de weerstand van deze junctie ook zeer hoog is.
- Via datagegevens kan je de ingangsweerstand van de JFET bepalen aan de hand van de gatesperstroom (gate reverse current I_{GSS} en een bepaalde ingangsspanning V_{GS} :

$$R_{IN} = \frac{|V_{GS}|}{I_{GSS}} \quad (4 - 2)$$

- Door het feit dat de ingangsweerstand zeer hoog is (in sper gepolariseerde junctie), betekent dit dat de ingangscapaciteit van een JFET ook over het algemeen ook hoger is dan van een bipolair junctie transistor.
- De grootte van de ingangscapaciteit zal wel afhankelijk zijn van de grootte van de aangelegde inverse spanning over de gate-source junctie. Zo heeft een 2N5457 JFET een maximale ingangscapaciteit C_{iss} van 7 pF bij $V_{GS} = 0V$.

Section 4-2 CHECKUP

1. Geef een andere naam voor de transfertcurve van een JFET.
2. Heeft een P-kanaal JFET een positieve of een negatieve V_{GS} nodig?
3. Hoe wordt de drainstroom geregeld in een JFET?
4. De V_{DS} -spanning bij het pinch-off punt van een bepaalde JFET is gelijk aan 7 V. Indien de V_{GS} spanning gelijk is aan 0 V, hoeveel bedraagt dan de spanning V_p ?
5. Als de V_{GS} -spanning van een bepaalde JFET negatiever wordt, stijgt of daalt dan de drainstroom?
6. Welke waarde moet V_{GS} hebben om een cutoff te produceren in een P-kanaal JFET als $V_p = -3$ V?



4-4 MOSFET-karakteristieken

Wat is een MOSFET?

De metal-oxide semiconductor field effect transistor (MOSFET) verschilt van de JFET in het feit dat een MOSFET geen PN-junctie heeft. In de plaats daarvan is de gate van de MOSFET geïsoleerd van het kanaal via een heel dun laagje siliciumdioxide (SiO_2).

De 2 basistypen MOSFET's zijn depletion (verarming) of D-MOSFET en enhancement (verijking) of E-MOSFET.

Van de twee basistypen is de E-MOSFET de meest gebruikte.

Omdat polykristalijn silicium nu gebruikt wordt als gate-materiaal in plaats van metaal, worden MOSFET's soms ook IGFET's (insulated-gate of geïsoleerde gate) genoemd.

Wat moet je kunnen?

- De verschillen in constructie van de MOSFET's kunnen beschrijven
- Het symbool voor een N en P-MOSFET kunnen tekenen. Dit zowel voor D-MOSFET als voor E-MOSFET.
- Verklaren hoe een MOSFET werkt in depletion mode en enhancement mode.
- De transconductantiecurve (stijlheid) en de drainkarakteristiek interpreteren en het verband met elkaar omschrijven

4-4 MOSFET-karakteristieken

MOSFET (= Metal oxide semiconductor field-effect transistor)

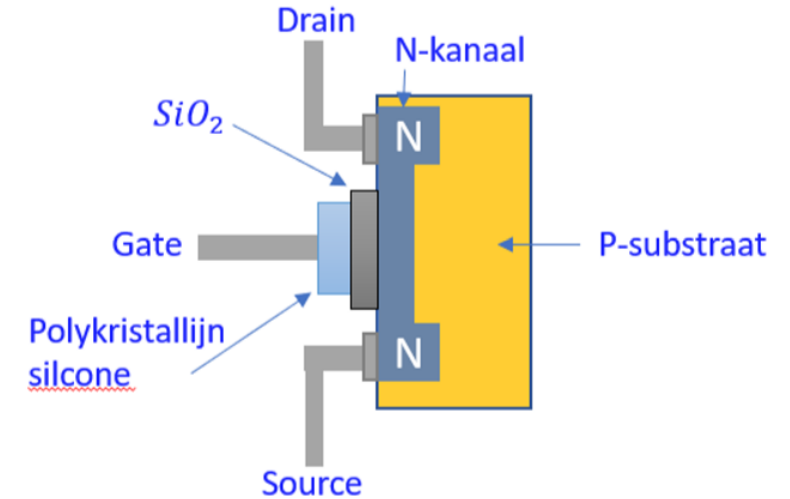
Heeft in tegenstelling tot JFET geen enkele pn junctie.

Twee typen:

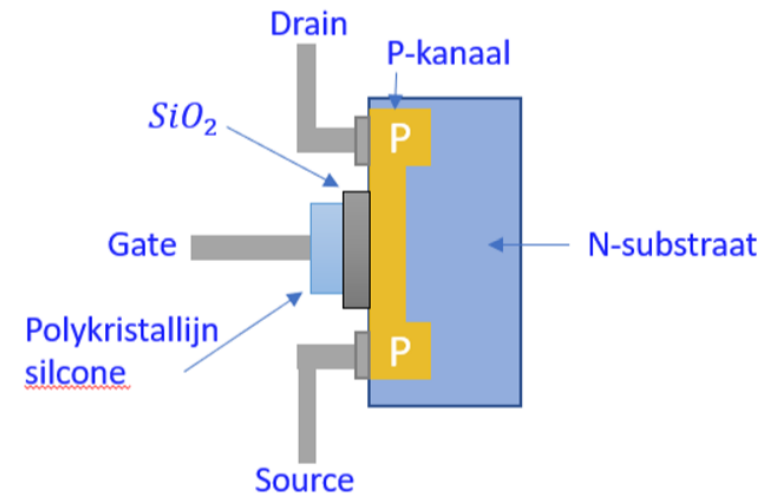
- Enhancement MOSFET (E-MOSFET of MOSFET van het verrijkingstype)
- Depletion MOSFET (D-MOSFET of MOSFET van het verarmingstype)

Depletion MOSFET (D-MOSFET)

- Gate mbv isolatiemateriaal gescheiden van het kanaal
- Twee modi:
 - Enhancement
 - Depletion
- Zowel neg als pos spanning kan aangebracht worden aan gate
- Neg U_{GS} = depletion
- Pos U_{GS} = enhancement



N-kanaal DMOSFET



P-kanaal DMOSFET

4-4 DMOSFET-karakteristieken

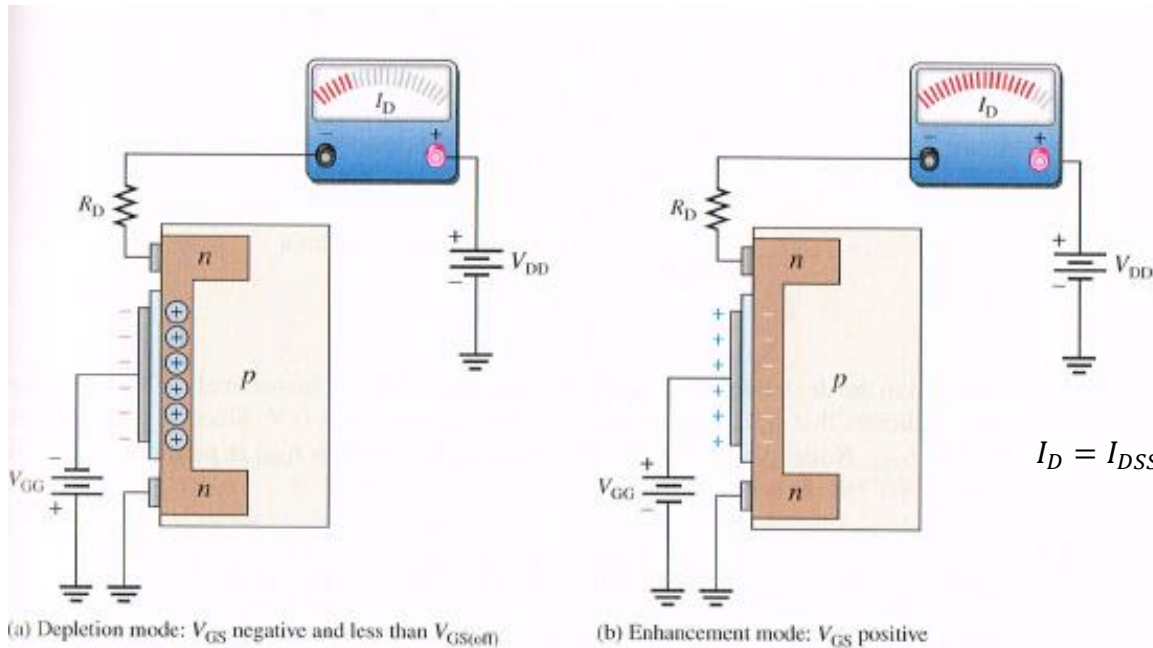
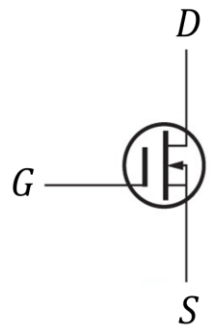
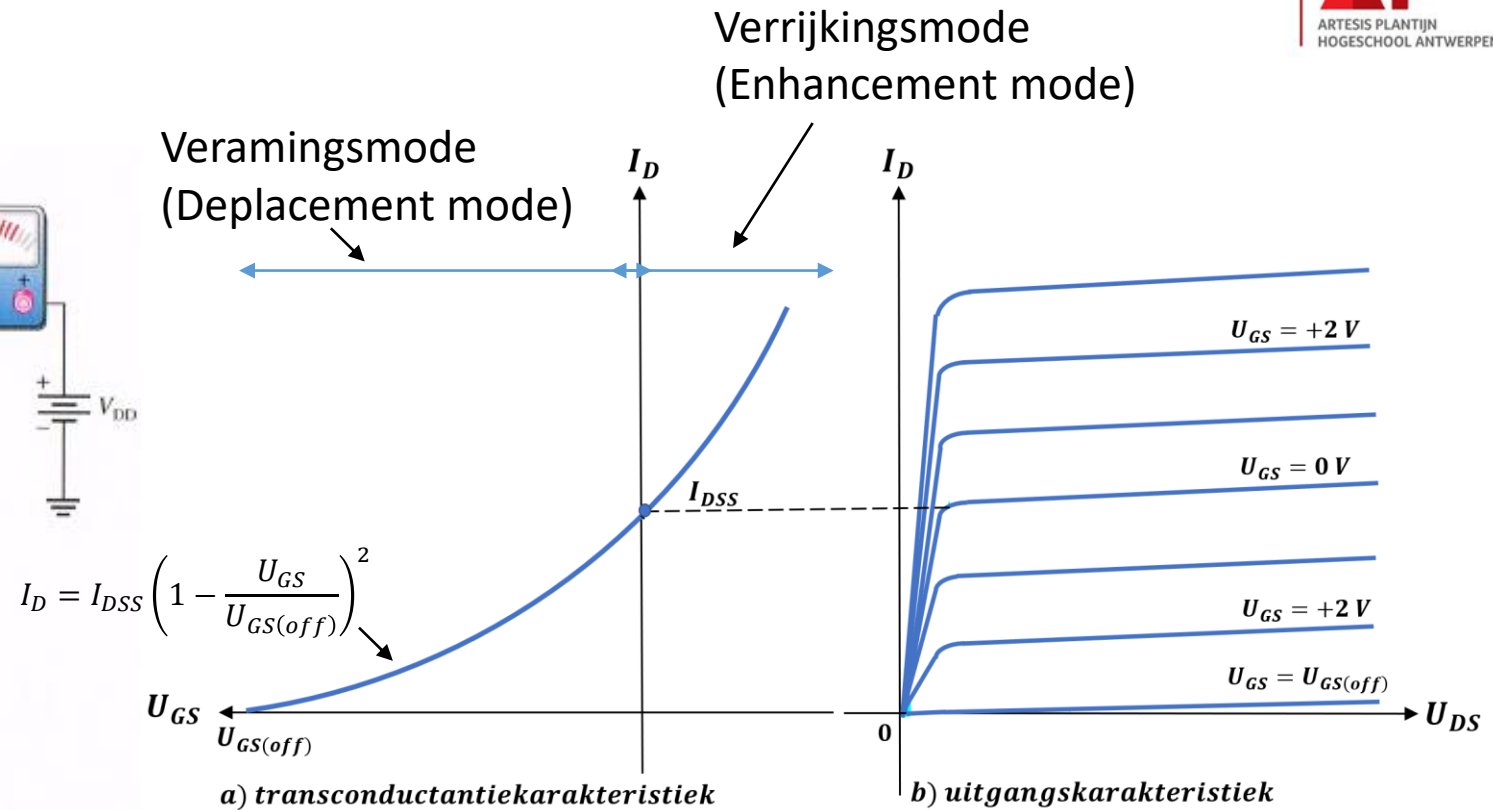
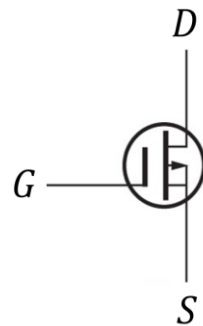


FIGURE 4-23 Operation of *n*-channel D-MOSFETs.



N-kanaal D-MOSFET



P-kanaal D-MOSFET

4-4 EMOSFET-karakteristieken

Enhancement MOSFET (E-MOSFET)

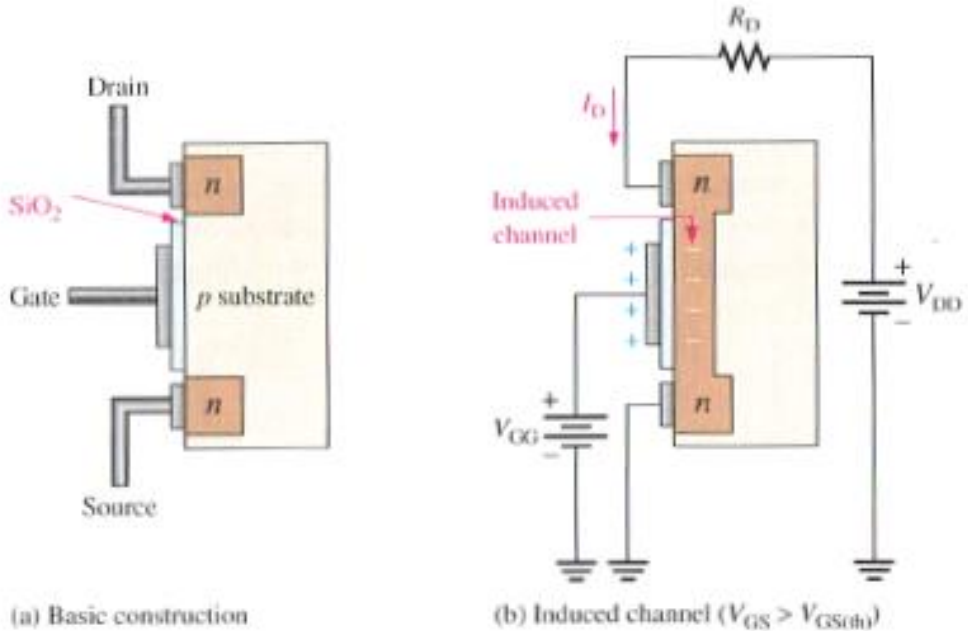


FIGURE 4-26 E-MOSFET construction and operation (n-channel).

- N materiaal p materiaal
- Geen kanaal
- Wanneer positieve spanning wordt aangebracht aan gate, groter dan bepaalde treshhold, worden elektronen aangetrokken en ontstaat er een dun kanaal.

Elke spanning onder de treshhold U_{Gsth} , valt kanaal weg en kan er geen drain stroom vloeien.

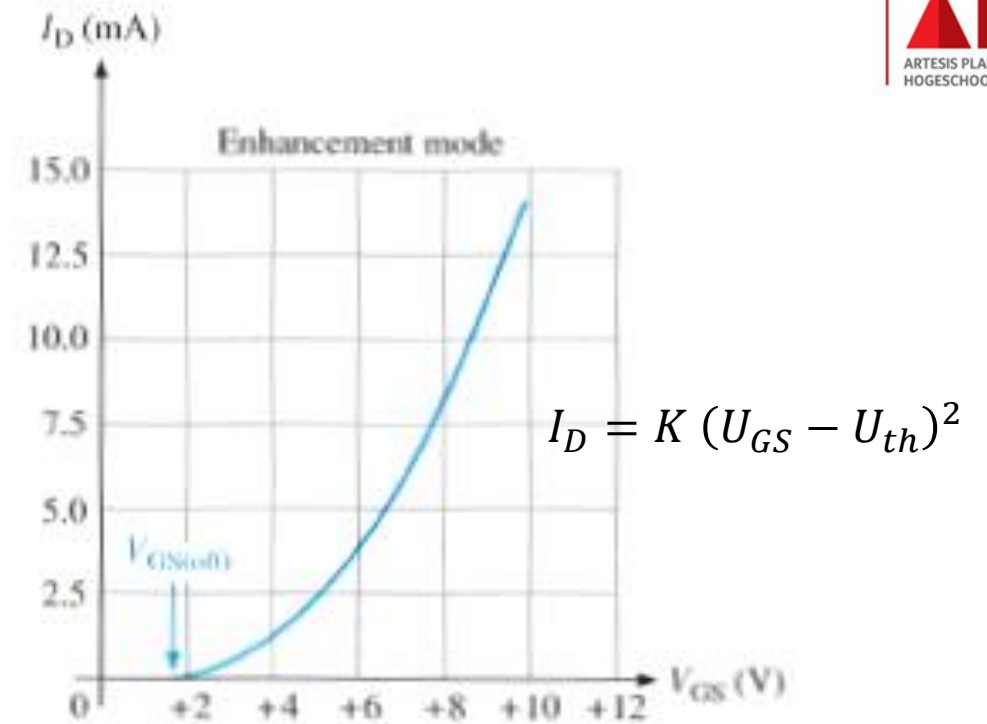
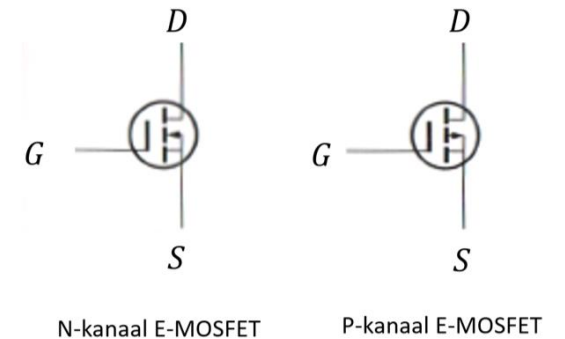


FIGURE 4-28 Transfer characteristic for a typical E-MOSFET.



Stippelijn duidt op het ontbreken van een kanaal

4-4 MOSFET-karakteristieken

Dual-Gate MOSFET (blz. 197)

- Bestaat zowel in D-MOSFET als in E-MOSFET
- Verschil met gewone MOSFET is dat de dual-gate MOSFET twee gates heeft.
- Een nadeel van een FET is zijn hoge ingangscapaciteit waardoor bij hogere frequenties de werking van de FET minder goed wordt. Door gebruik te maken van een dual-gate FET kan men deze ingangscapaciteit verlagen waardoor de FET beter bruikbaar wordt bij hoogfrequent (RF) versterkertoepassingen.
- Een voordeel van dual-gate is dat het een ingang voorziet voor automatische versterkingscontrole (automatic gain control of AGC) bij RF-versterkers.
- Dual-gate FET's kunnen ook gebruikt worden om de transconductantiekarakteristiek aan te passen.
 - Fig. 4-30 geeft weer de transconductantiecurve afhankelijk is van de spanning op de tweede gate (V_{G2S})

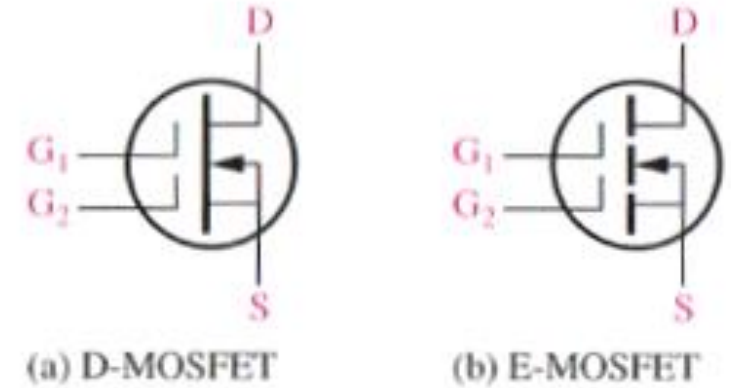
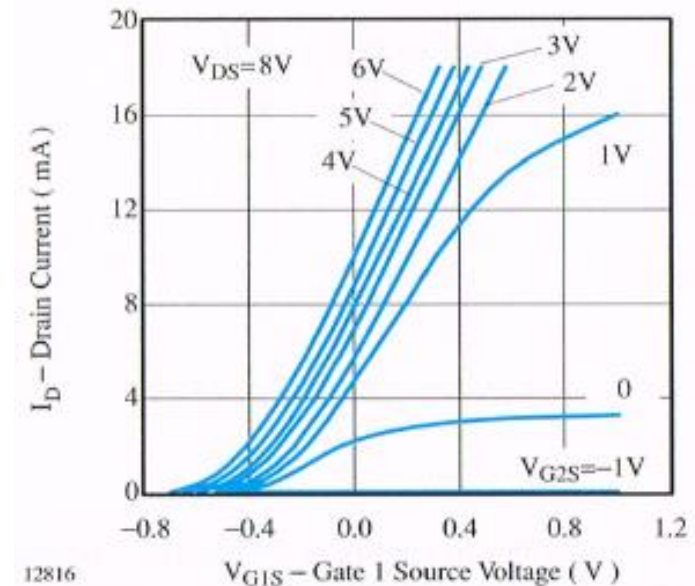


FIGURE 4-29 Dual-gate n -channel MOSFET symbols.



Section 4-4 CHECKUP

1. Noem 2 typen MOSFET's en beschrijf het grote verschil in constructie.
2. Als bij een D-MOSFET $U_{GS} = 0V$, vloeit er dan een stroom tussen drain en source?
3. Als bij een E-MOSFET $U_{GS} = 0V$, vloeit er dan een stroom tussen drain en source?
4. Kan een D-MOSFET een hogere stroomwaarde hebben dan I_{DSS} en toch binnen de gespecificeerde drainstroom blijven?

