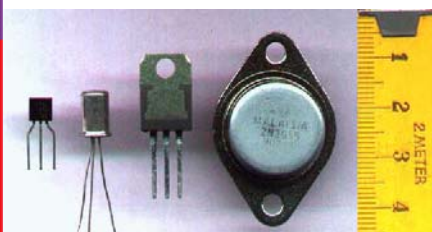


Bipolaire Transistor

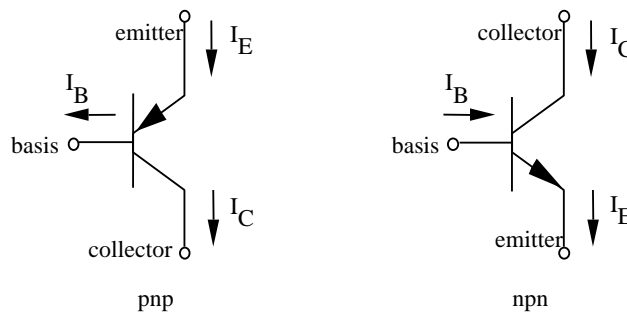
Jan Genoe
KHLim
Universitaire Campus, Gebouw B
B-3590 Diepenbeek
www.khlim.be/~jgenoe



In dit hoofdstuk bespreken we de bipolaire transistors.

(bron foto: <http://en.wikipedia.org>)

Bipolaire transistor: symbool



- De bipolaire transistor is een structuur met 3 kontakten: basis, emitter en collector
- Bestaat in de NPN en de PNP uitvoering

Jan Genoe: Bipolaire transistor

2



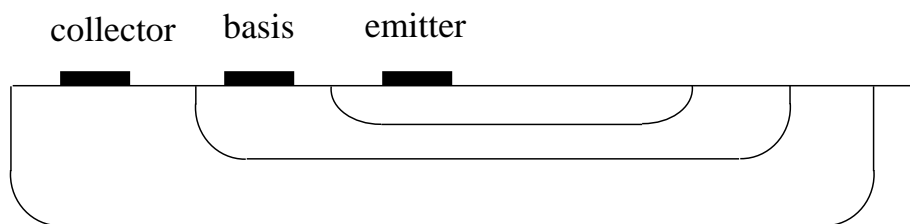
De bipolaire transistor bestaat in essentie uit drie gedopeerde lagen, namelijk een emitter, een basis en een collector. Er bestaan 2 types:

- Een npn bipolaire transistor
 - De emitter is een n-gedopeerde laag
 - De basis is een p-gedopeerde laag
 - De collector is een n-gedopeerde laag.
- Een pnp bipolaire transistor
 - De emitter is een p-gedopeerde laag
 - De basis is een n-gedopeerde laag
 - De collector is een p-gedopeerde laag.

De basis-emitter pn-junctie is de belangrijkste junctie: deze junctie draagt normaal een voorwaartse spanning. De basis-collector junctie draagt normaal een achterwaartse spanning. We zullen dan ook in het symbool van de bipolaire transistor de pijl steeds tussen de basis en de emitter plaatsen. De richting van deze pijl is zoals bij de diode, namelijk van het p-gedopeerd gebied naar het n-gedopeerd gebied. Dus bij een npn transistor wijst de pijl naar de emitter en bij de pnp transistor wijst de pijl naar de basis.

Bipolaire transistor: lagenstructuur

- Een hoog gedopeerde emitter laag
 - typisch 10^{19} cm^{-3}
- Een lager gedopeerde basis laag
 - typisch 10^{17} cm^{-3}
- Een nog lager gedopeerde collector laag
 - typisch 10^{15} cm^{-3}
- Twee PN juncties worden bekomen



Jan Genoe: Bipolaire transistor

3



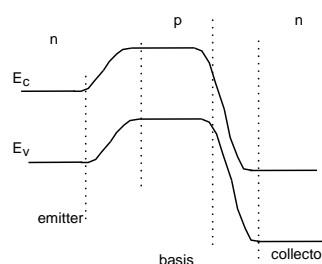
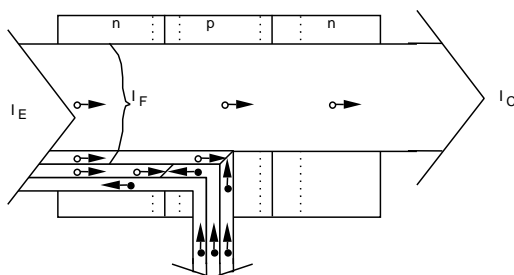
Deze npn of pnp lagenstructuur wordt, zoals bij de diode, ook hier door een aantal achtereenvolgende implantaties bekomen. Eerst wordt de collector geïmplanteerd, omdat deze het laagst gedopeerd moet worden (typisch 10^{15} donor- of acceptoratomen per cm^{-3}). Hierna wordt de basis geïmplanteerd (typisch 10^{17} donor- of acceptoratomen per cm^{-3}). En als laatste implantatie wordt de emitter gedopeerd (typisch 10^{19} donor- of acceptoratomen per cm^{-3}). Het is belangrijk dat de emitter veel hoger dan de basis gedopeerd wordt, omdat anders, zoals we verder zullen zien, de transistor geen stroomversterking kan bekomen.

De werking van de bipolaire transistor is in essentie een verticale werking, van de emitter naar de collector. Natuurlijk moeten de elektronen en gaten ook aangevoerd worden vanuit het basiscontact en het collectorcontact. Hiervoor krijgen we ook een laterale stroom.

We willen er ook nog op wijzen dat het belangrijk is dat de basis een dunne laag is, omdat anders, zoals we verder zullen zien, de transistor geen stroomversterking kan bekomen.

NPN-stromen (deel 1)

- De emitter-basis junctie ondergaat een voorwaartse spanning
 - elektronen en gaten zien een kleine barrière
- De basis collector junctie ondergaat een achterwaartse spanning
 - elektronen en gaten zien een grote barrière, maar de deeltjes die van de emitter komen zien geen barrière



Jan Genoe: Bipolaire transistor

4

Om de werking van de bipolaire transistor goed te begrijpen moeten we in eerste instantie naar de basis-emitter junctie kijken. Deze junctie zullen we normaalgezien een voorwaartse spanning geven. Zoals bij de pn junctie diode bepaalt de aangelegde spanning over deze junctie de barrière voor de elektronen aan de ene kant en voor de gaten aan de andere kant. Op zich is het zo dat de barrière voor de elektronen en de gaten altijd even hoog is, omdat deze potentiaalbarrière gevormd is door de integraal van het elektrisch veld, en dat is natuurlijk voor de elektronen en de gaten gelijk. De kans dat een elektron overgaat over de barrière is dan ook even groot als de kans dat een gat overgaat. Zoals ook bij de diode neemt deze kans exponentieel af met de hoogte van de barrière. Daarom is de stroom exponentieel afhankelijk van de hoogte van de barrière.

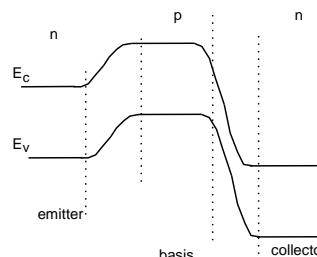
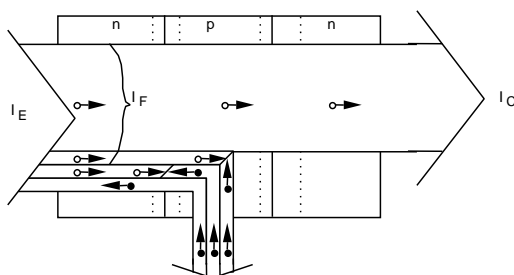
Nu is er wel een belangrijk verschil de dopering van de emitter en de dopering van de basis. Hierdoor zullen er in de emitter veel meer ladingsdragers aanwezig zijn dan in de basis en dus zal de stroom vanuit de emitter naar de basis veel groter zijn dan de stroom van de basis naar de emitter.

Een tweede belangrijke factor is de constructie van de bipolaire transistor is dat de basis zeer dun is. De ladingsdragers die (met een zeker snelheid) uit de emitter komen merken, eens ze in de basis zijn enkel maar een potentiaalval naar de collector. Deze ladingsdragers zullen dus bijna allemaal in de collector terechtkomen.

Besluit: we leggen een spanning aan tussen basis en emitter en we bekommen een stroom I_B tussen basis en emitter en een stroom I_C tussen emitter en collector die een factor β groter is.

NPN-stromen (deel 2)

- De emitter-basis barrière is gelijk voor elektronen en gaten
- Toch is de stroom uit de emitter veel groter dan de stroom uit de basis, omdat de dopering veel groter is ($I_{EC} = \beta_F I_{BE}$)
 - factor 100 voor normale transistors
 - factor 10 voor vermogentransistors (basisweerstand)



Jan Genoe: Bipolaire transistor

5

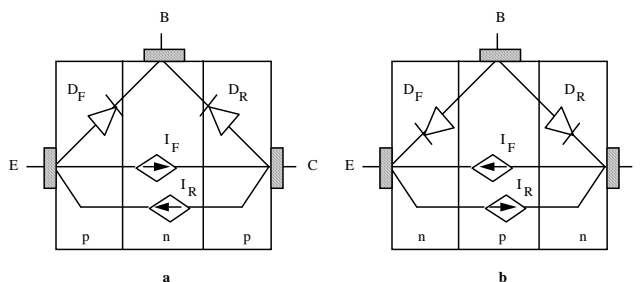


De basistroom is toch nog wel iets groter dan uit de afleiding op de vorige bladzijde zou kunnen blijken. Er zijn namelijk een aantal ladingsdragers komende van de emitter die gedurende hun transit door de basis met ladingsdragers van de basis recombineren. Deze ladingsdragers moeten natuurlijk door het basiscontact terug aangevuld worden, zodat de feitelijke basistroom groter wordt. Er kunnen eveneens elektronen en gaten recombineren gedurende hun transfer door de ruimteladingslaag. Deze twee effecten leiden tot een iets lagere β_F van de bipolaire transistor dan wat op basis van de doperingen zou mogen verwacht worden. Normaalgezien kunnen we een β_F van ongeveer 100 verwachten voor normale bipolaire transistors. Voor vermogentransistors zullen we meestal een lagere β_F hebben omdat een zeer dunne, laag gedopeerde basislaag een veel te hoge basisweerstand zou hebben, wat zou aanleiding geven tot te grote verliezen. Vandaar dat we iets of wat stroomversterking zullen opofferen om minder vermogenverliezen te bekomen. De nodige stroomversterking kunnen we steeds bekomen door meerdere versterkersstappen achter elkaar te plaatsen

Bipolaire transistor: equivalent schema



- Het equivalente schema bestaat uit
 - 2 diodes
 - 2 stroom afhankelijke stroombronnen



Jan Genoe: Bipolaire transistor



Als we een bipolaire transistor in een circuit wensen te gebruiken moeten we een model voor deze transistor hebben. Dit model bestaat logischerwijs uit de modellen van de 2 aanwezige diodes, namelijk de voorwaartse diode (D_F) en de diode met een achterwaartse spanning (D_R). Hiervoor wordt dus telkens het volledige model van de diode overgenomen, dit wil zeggen de stroom-spanningsrelatie, de diffusiecapaciteit en de junctiecapaciteit. Bovendien wordt aan elk van deze twee diodes een stroom gestuurde stroombron verbonden. Als door de voorwaartse diode een stroom I_{DF} loopt, loopt door de stroom gestuurde stroombron $I_F = \beta_F I_{DF}$. Deze β is normaalgezien groot. Wat geldt voor de voorwaartse diode geldt natuurlijk ook voor de achterwaartse diode, er wordt namelijk ook een stroom gestuurde stroombron $I_R = \beta_R I_{DR}$. Deze β is normaal echter zeer klein.



Ebers-Moll model: werkingsgebieden



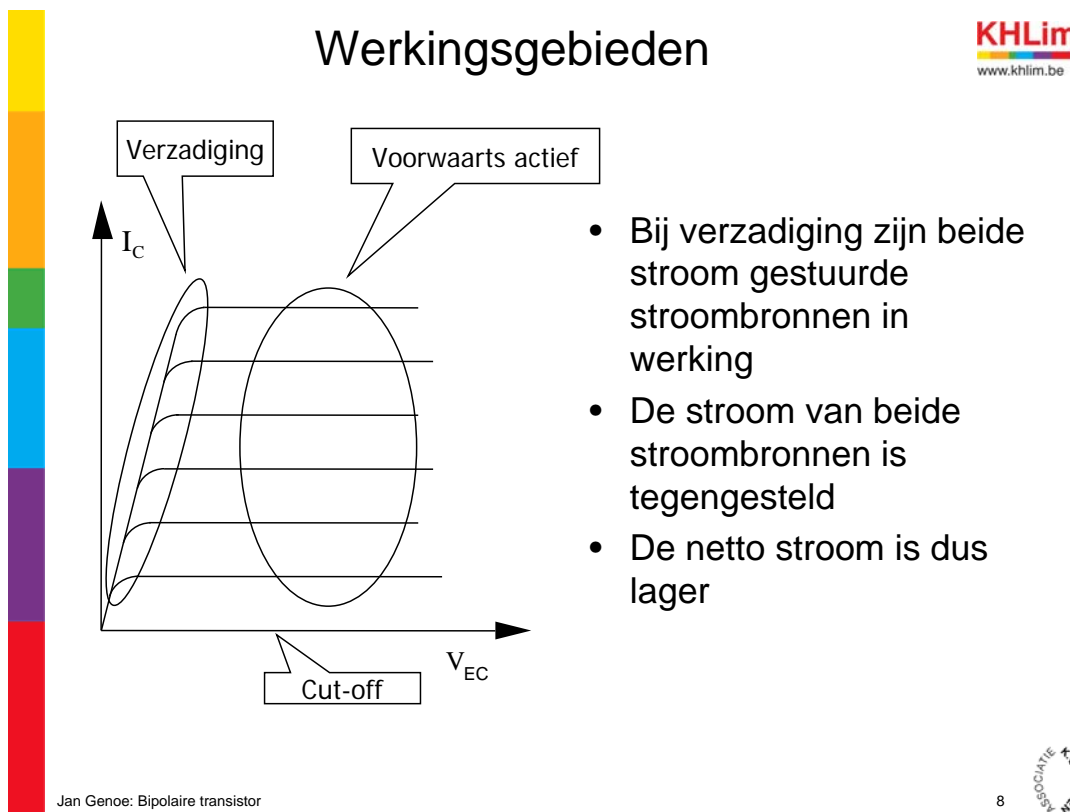
- Normaal ($V_F > 0, V_R < 0$) gebruiken we de bipolaire transistor in het voorwaarts actief gebied (of in cut-off).
- Als $V_{EC} (= V_F - V_R)$ klein wordt, kan de transistor in verzadiging komen

	$V_F < \pm 0.6 V$	$V_F > \pm 0.6 V$
$V_R < \pm 0.6 V$	Cut-off	Voorwaarts actief
$V_R > \pm 0.6 V$	Invers actief	Verzadiging

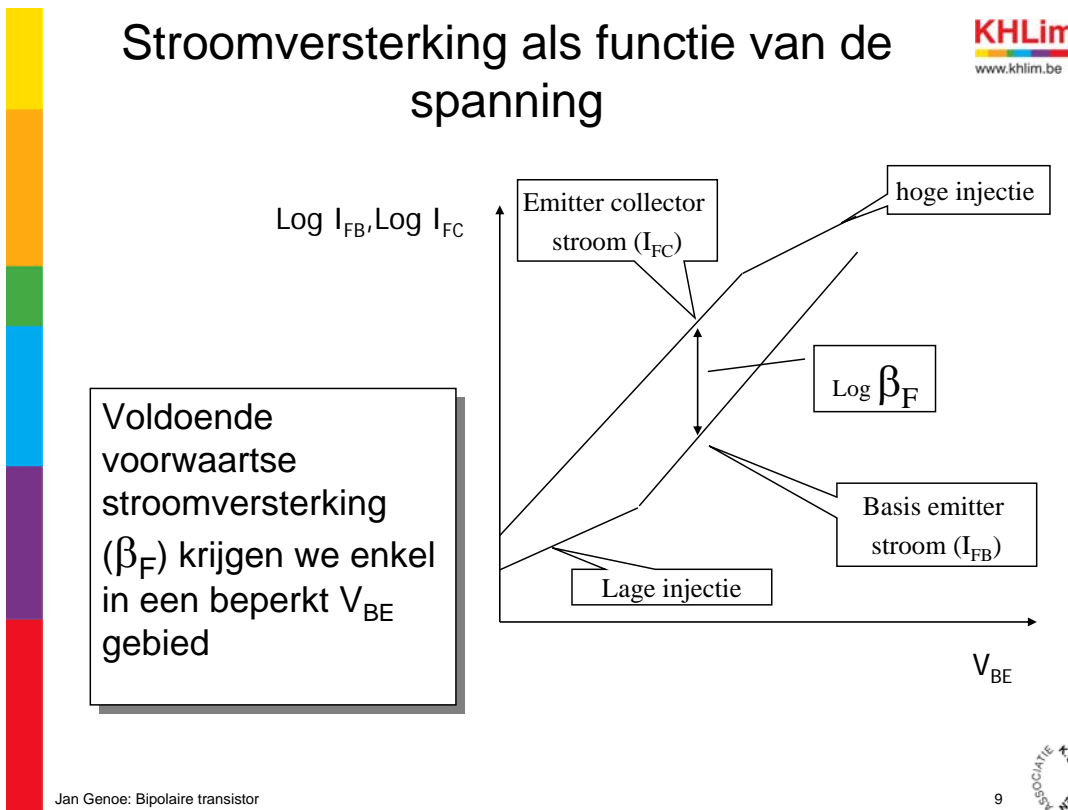
Jan Genoe: Bipolaire transistor



We kunnen 4 werkingsgebieden van de bipolaire transistor herkennen. Normaal is de voorwaartse diode in geleiding en de achterwaartse diode in sper. Dit noemen we het voorwaarts actief gebied. Nu kan het zijn dat onder bepaalde werkingsomstandigheden de achterwaartse diode ook in geleiding komt. Dit werkingsgebied noemen de verzadiging. We hebben ook nog het werkingsgebied waar beide diodes uit geleiding zijn. Er loopt dan helemaal geen stroom door de transistor. Dit is het cut-off werkingsgebied. Tenslotte hebben we ook het werkingsgebied waar enkel de achterwaartse junctie in geleiding is. Dit is het invers actieve werkingsgebied. Normaal is het helemaal niet de bedoeling dat we in dit werkingsgebied terechtkomen.



Wanneer we kijken naar de collectorstroom in functie van de emitter-collector spanning, zou die daar in principe steeds onafhankelijk van moeten zijn. Dat is ook (in eerste benadering) het geval in het voorwaarts actieve werkingsgebied. Maar wanneer de emitter-collector spanning te klein wordt, zal ook de achterwaartse junctie in geleiding gaan. Want $V_{BC} = V_{BE} - V_{EC}$. We komen dus in verzadiging. Er loopt een tegengestelde stroom door de achterwaartse diode. Uiteindelijk zal de stroom nul worden wanneer de emitter-collector spanning nul wordt.

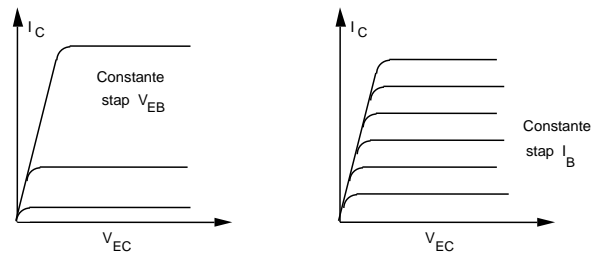


In de vorige grafiek hebben we de collectorstroom uitgezet in functie van de emitter-collector spanning, en we bekwamen een vlakke karakteristiek, behalve in het verzadigingsgebied.

In deze grafiek zetten we het logaritme de voorwaartse collector- en de voorwaartse basisstroom uit in functie van de basis-emitter spanning. Hier bekomen we twee zeer sterk stijgende curven, die in het normale werkingsgebied een afstand β_F van elkaar gescheiden zijn.

Maar de fenomenen van hoge en lage injectie, die we bij de diode reeds gezien hebben, zullen ook bij de bipolaire transistor optreden. Hoge injectie treedt op omwille van een zeer grote stroom, en dat zullen we natuurlijk eerst in de collectorstroom merken. Het lage injectie fenomeen treedt op als de stroom zo klein wordt dat generatie en recombinatie-effecten in de ruimteladingslaag ook al een rol zullen spelen. Dit fenomeen zullen we dus in de eerste plaats in de basisstroom merken. Beide effecten verlagen de uiteindelijk β_F van de bipolaire transistor.

Stroomsturing versus spanningssturing



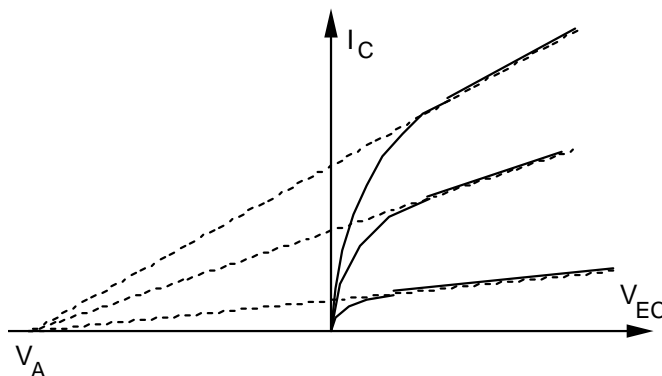
- We bekommen een lineair gedrag bij stroomsturing
- We bekommen een exponentieel gedrag bij spanningssturing
 - bovendien is dit gedrag erg temperatuursafhankelijk
 - zie diode ...

Een meting van de collectorstroom van een bipolaire transistor kunnen we doen onder twee omstandigheden:

- We kunnen de basisspanning met constante stappen laten variëren. De basisstroom en ook de collectorstroom zullen exponentieel toenemen. De juiste positie van een curve is ook fel afhankelijk van de temperatuur. Derhalve zullen we in databoeken meestal geen curven opgenomen onder spanningssturing terugvinden.
- We kunnen de basisstroom met constante stappen laten toenemen. De collectorstroom zal dan een factor β_F groter zijn. De bekomen curven liggen mooi equidistant, behalve in het verzadigingsgebied. Meestal zullen we in databoeken dus de curven met stroomsturing terugvinden.

Early Spanning

- Reële transistorkarakteristieken zijn niet perfect vlak, maar vertonen een helling
- Deze lijnen komen samen in een punt
- Deze spanning noemt men de Early spanning



Jan Genoe: Bipolaire transistor

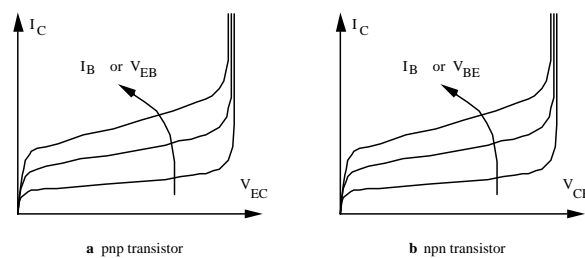
11



In werkelijkheid is de collectorstroom in functie van de emitter-collector spanning ook in het voorwaarts actieve gebied niet helemaal vlak. Er is een zeker toename van de stroom met de toename van de emitter-collector spanning. Wanneer we deze lijnen (in gedachte) extrapoleren komen deze allemaal uit in hetzelfde punt. Dit punt noemen we de Early-spanning, omdat meneer Early dit ontdekt heeft.

Maximale spanning

- De maximale spanning van een transistor wordt bepaald door de doorslag van de junctie die een achterwaartse spanning draagt.
- Omwille van de lage dopering van de collector zal dit lawinedoorslag zijn.



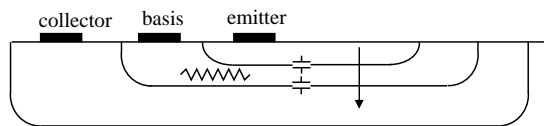
Jan Genoe: Bipolaire transistor

12



De basis-collector junctie is een junctie die een achterwaartse spanning draagt. En zoals we bij de diode gezien hebben zal deze junctie doorslagen op het moment dat de spanning te groot wordt. Omdat de collector steeds een laag gedopeerde laag zal zijn, zullen we lawinedoorslag bekomen. De eigenlijke doorslagspanning hangt af van het ontwerp van de lagenstructuur van de diode. Vermogentransistors kunnen zeer hoge doorslagspanningen hebben. Meestal zal de doorslag niet zichtbaar zijn op de karakteristieken van de fabrikant, maar zal hij deze spanning wel steeds in zijn datasheets weergeven als de maximale spanning die over de transistor mag staan. Het is belangrijk hiermee rekening te houden.

Basisweerstand



- De basis moet een dunne laag zijn om de ladingsdragers van de emitter vlot in de collector te doen terechtkomen
- De dopering van de basis moet beduidend lager zijn dan de emitter om voldoende versterking te bekomen
- Hieruit volgt dat de basisweerstand niet onbeperkt klein kan genomen worden
- De basisweerstand vormt samen met de capaciteiten van de diodes een belangrijke RC constante die de maximale frequentie van de transistor bepaalt.

Jan Genoe: Bipolaire transistor

13



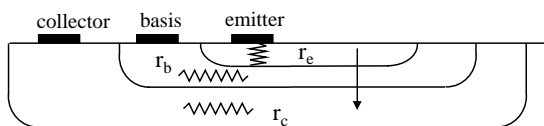
De versterking van de transistor wordt bepaald door de verhouding van de emitterdopering tegenover de basisdopering. Dit houdt in dat we de basisdopering niet al te hoog kunnen nemen willen we voldoende versterking kunnen bekomen.

Van de andere kant kunnen we de basis ook niet te dik nemen, want dan zullen de ladingsdragers die uit de emitter vertrekken niet in de collector terechtkomen.

Daarom kunnen we de weerstand van de basislaag niet erg klein kiezen, en dit is een probleem.

- Bij vermogentransistors levert deze basisweerstand aanleiding tot een belangrijke opwarming. Meestal zullen we voor vermogentransistors toch iets hoger doperen. We bekomen minder opwarming en een kleinere stroomversterking.
- Wanneer we werken met een hoogfrequent basissignaal moet dit signaal via de weerstand de capaciteiten van de basis-emitter en van de basis-collector junctie opladen. Dit geeft een belangrijke RC vertraging en zal de maximale frequentie van de transistor bepalen. Hoogfrequent transistors passen dit aan door hun lagenstructuur zo te kiezen dat de capaciteit kleiner wordt.

Emitter- en collectorweerstand



- Deze weerstand wordt ook bepaald door de dopering
- Typische waarden zijn (voor een npn transistor)
 - r_e : 0.2 tot 2 Ω
 - r_b : 30 tot 300 Ω
 - r_c : 40 tot 200 Ω

Ook de emitter en de collectorweerstand van de bipolaire transistor zijn belangrijk, vooral omdat de stromen die hierdoor lopen veel groter zijn dan de stromen door de basis. De emitterweerstand kan kleiner gemaakt worden door deze laag dunner te maken en de collectorweerstand door de laag dikker te maken. Soms wordt er om een kleinere collectorweerstand te bekomen nog een zeer hoog gedopeerde laag voorzien helemaal onderaan de structuur.

De weerstandswaarden die hierboven opgegeven zijn gelden voor een npn transistor. Omwille van de slechtere geleidbaarheid van een p-type laag zullen we hogere r_e en r_c waardes bekomen voor een pnp transistor.

NPN versus PNP



- N-type laag heeft bij gelijke dopering een beduidend lagere weerstand dan een P-type laag
- Een pnp transistor heeft dus veel grotere emitter en collector weerstanden in vergelijking met een npn transistor
- Voor vermogencomponenten kunnen deze weerstanden en de opwarming die erbij hoort een probleem vormen



Jan Genoe: Bipolaire transistor

15

