

Hoofdstuk 2: De veldeffecttransistor

Tot nu toe hebben we steeds aandacht besteed aan de studie van bipolaire transistoren. In dit hoofdstuk en in de volgende hoofdstukken bestuderen we unipolaire transistoren.

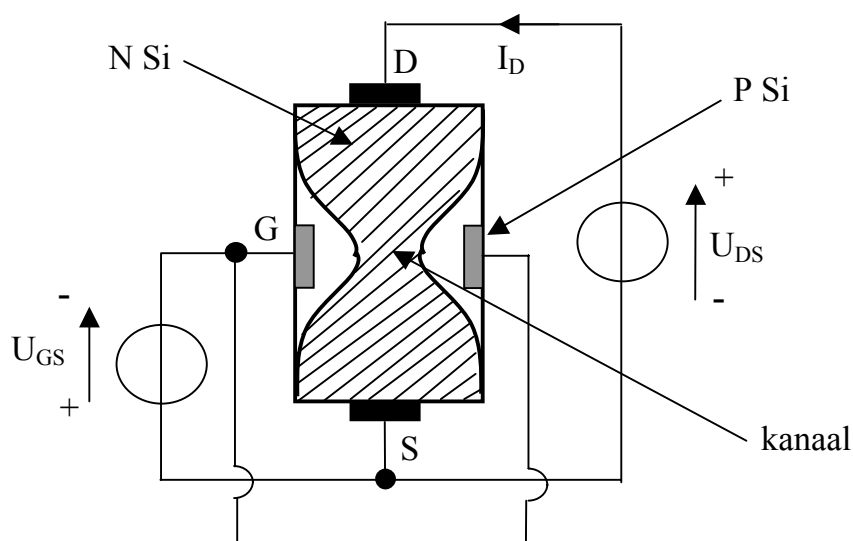
Bij de unipolaire transistoren kan een onderscheid gemaakt worden tussen de JFET en de MOSFET. In dit hoofdstuk bestuderen we de JFET zelf, in Hoofdstuk 3 bestuderen we versterkerschakelingen die gebruik maken van een JFET.

1: DE JFET

De JFET (Junction Field-Effect Transistor) bestaat in twee uitvoeringen. Zo is zowel een N-kanaal JFET (N-channel JFET) als een P-kanaal JFET (P-channel JFET) verkrijgbaar. De JFET is wat dat betreft te vergelijken met de bipolaire transistor die ook in twee uitvoeringen bestaat, namelijk de NPN en de PNP transistor.

1.1: De N-kanaal JFET

In principe is de N-kanaal JFET opgebouwd zoals weergegeven in Figuur 2.1.



Figuur 2.1: De N-kanaal JFET

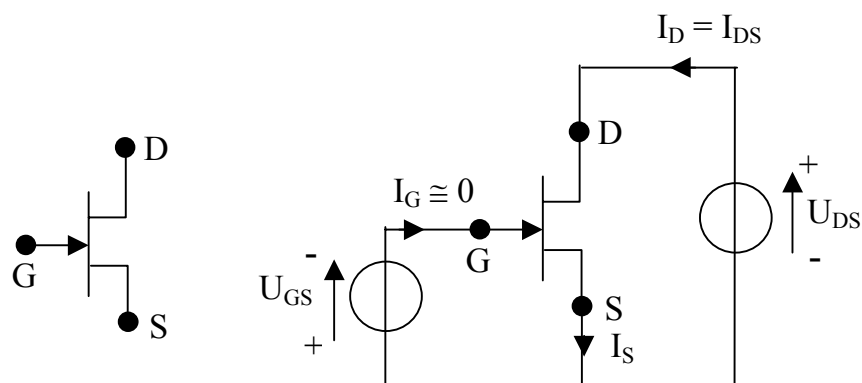
Aan beide zijden van een staafje N silicium worden geleidende zones uit P silicium aangebracht. Deze laatste zijn met elkaar verbonden en vormen de poort of gate G. De bovenzijde en onderzijde van het staafje N silicium (het N-kanaal) worden voorzien van ohmse contacten en vormen respectievelijk de afvoer of drain D en de bron of source S.

Tussen de gate en het kanaal ontstaan PN-juncties. Door de voedingsbron U_{GS} worden deze PN-juncties invers gepolariseerd zodat sperlagen (uitputtingsgebieden of depletion layers) ontstaan in het kanaal. Deze sperlagen zijn zeer arm aan beweeglijke ladingsdragers en bevatten slechts vaste positieve ionen langs de N-zijde en vaste negatieve ionen langs de P-zijde van de junctions.

Sluit men de spanningsbron U_{DS} aan, die de drain D positief maakt ten opzichte van de source S, dan vloeit er een stroom van meerderheidsladingsdragers tussen de source en de drain. In Figuur 2.1 zijn die meerderheidsladingsdragers elektronen die vanuit de source S naar de drain D stromen. Vandaar de naam bron of source, want de source is de bron van de elektronen. De drain zorgt voor de afvoer van deze elektronen.

Het is duidelijk dat bij een gegeven U_{DS} de stroom I_D tussen drain en source bepaald wordt door de totale weerstand van het N-kanaal tussen de beide aansluitingen. Deze weerstand hangt af van de effectieve breedte van het kanaal. Vergroot men de sperspanning U_{GS} tussen de poortelektroden en de bron (source), dan neemt de breedte van de sperlagen toe, waardoor de effectieve kanaalbreedte vermindert en de weerstand tussen source en drain stijgt. Door de kanaalvernauwing van het N-kanaal neemt de stroom I_D af. Dit kunt u trouwens zien aan de karakteristiek in Figuur 2.3.

Door middel van de poortspanning U_{GS} kan men de stroom tussen drain en source beïnvloeden. Bij een bepaalde poortspanning genoteerd als $U_{(P)GS}$ (bijvoorbeeld 4V voor een BFW10) wordt de effectieve kanaalbreedte nul. Als gevolg hiervan wordt de afvoerstroom I_D ook nul. De JFET is dan gesperd.

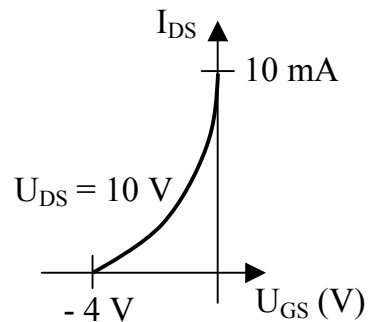


Figuur 2.2: N-kanaal JFET

De symbolische voorstelling van een N-kanaal JFET is weergegeven links in Figuur 2.2. Het aanleggen van de spanning U_{GS} en U_{DS} is weergegeven rechts in Figuur 2.2. De spanning U_{DS} is positief (bijvoorbeeld 10 V) waardoor ook de stroom $I_D = I_{DS}$ positief is. De stuurspanning U_{GS} is negatief waardoor $I_G \cong 0$.

We kunnen besluiten dat door U_{GS} te regelen (in ons voorbeeld ergens tussen -4 volt en 0 volt) de stroom I_{DS} door de JFET op een andere waarde geregeld kan worden. Eenmaal de spanning U_{DS} voldoende groot is, is haar invloed op I_{DS} erg gering. De

afhankelijkheid van I_{DS} in functie van U_{GS} is weergegeven in de onderstaande Figuur 2.3.

Figuur 2.3: I_{DS} in functie van U_{GS}

De PN-juncties tussen poort en kanaal worden steeds in sperrichting aangesloten zodat de poort nagenoeg geïsoleerd is van de source met behulp van de uitputtingsgebieden. De poort neemt dus vrijwel geen stroom op zodat de DC-ingangsweerstand van een JFET (zeker bij silicium) bijzonder hoog is.

De inverse stroom die vloeit tussen gate en source bij een inverse spanning tussen deze elektroden van bijvoorbeeld 15 V (en gemeten bij $U_{DS} = 0$ V) wordt door de constructeur vermeld in de datasheets en genoteerd als I_{GSS} . De G en de eerste S in de notatie I_{GSS} wijst er op dat de stroom vanuit de gate naar de source stroomt. De tweede letter S wijst er op dat de drain D en de source S kortgesloten zijn.

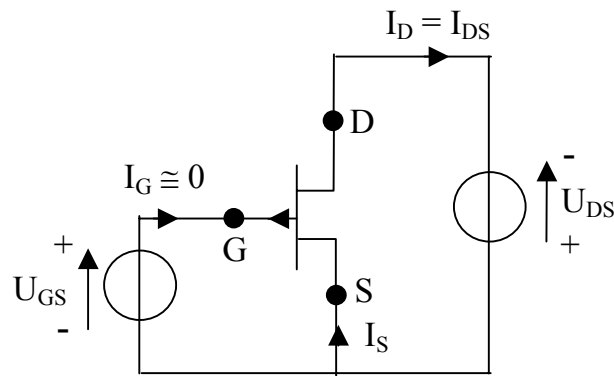
Deze stroom bedraagt bij 25 °C bijvoorbeeld – 1 nA wanneer $U_{GS} = -1$ V. Dit stemt overeen met een ingangsweerstand van 1000 MΩ. Dus kan met een erg goede benadering kan inderdaad gesteld worden dat $I_G \cong 0$.

De voorgaande alinea bekeek de ingangsimpedantie van de JFET op gelijkspanningsgebied. Op wisselspanningsgebied zal de ingangsimpedantie van een JFET hoofdzakelijk bepaald worden door de capaciteit van de uitputtingslaag (wat een capacitieve ingangsimpedantie impliceert).

1.2: De P-kanaal JFET

Een gelijkaardige situatie vinden we terug bij de P-kanaal JFET in Figuur 2.4. Bemerkt dat dit keer U_{DS} negatief is (bijvoorbeeld – 10V). Ook de stroom $I_D = I_{DS}$ is negatief. De spanning U_{GS} is daarentegen positief doch opnieuw is $I_G \cong 0$.

Ga zelf na hoe een P-kanaal JFET (= P-channel JFET) gebouwd is. Zoek de verschillen en de gelijkenissen tussen het gedrag van een N-kanaal JFET en een P-kanaal JFET.



Figuur 2.3: P-kanaal JFET

1.3: Opgaven en geleide oefeningen

Teken de “diode” die ontstaat tussen gate en kanaal (zowel bij de N-kanaal JFET als de P-kanaal JFET). De JFET heeft een “capacitieve ingangsimpedantie”. Verklaar het ontstaan van de capaciteit C_{GS} , die soms genoteerd wordt als C_i (bij open drain).

Een andere belangrijke JFET capaciteit is C_{DG} , die vaak als C_f of C_{fs} genoteerd wordt. Ziet u ook waarom? Ga uit van een versterker in GSS (zie Hoofdstuk 3). Welk meestal zeer ongewenst effect heeft C_{DG} daar?

Geef de grootte orden van C_{GS} en C_{DG} bij een kleinsignaal JFET. Ga hiervoor op zoek naar de datasheets van enkele JFET's en zoek de waarden van C_{GS} en C_{DG} op.

Vergelijk de bipolaire transistor met de JFET. Teken het symbool (plus de typische polariteiten) van een NPN bipolaire transistor naast dat van een N-kanaal JFET. Hoe zal men in de praktijk de hoofdstromen I_C en I_D sturen (dus tussen nul en een maximum toegelaten waarde)?

Wat weet u over de stuurspanning en de stuurstroom bij de bipolaire transistor en bij de JFET? Welke zeer interessante eigenschappen vertoont de JFET hier ten opzichte van de stuurbron? Teken zowel bij de bipolaire transistor als bij de JFET alle significante stromen. Waarom zal de gate van een N-kanaal JFET bijna nooit positief gemaakt worden ten opzichte van de source?

Vergelijk op dezelfde manier de bipolaire PNP transistor met de P-kanaal JFET. Bemerk dat bij deze laatste de gate bijna nooit negatief gemaakt zal worden ten opzichte van de source.

2: De karakteristieken van de JFET

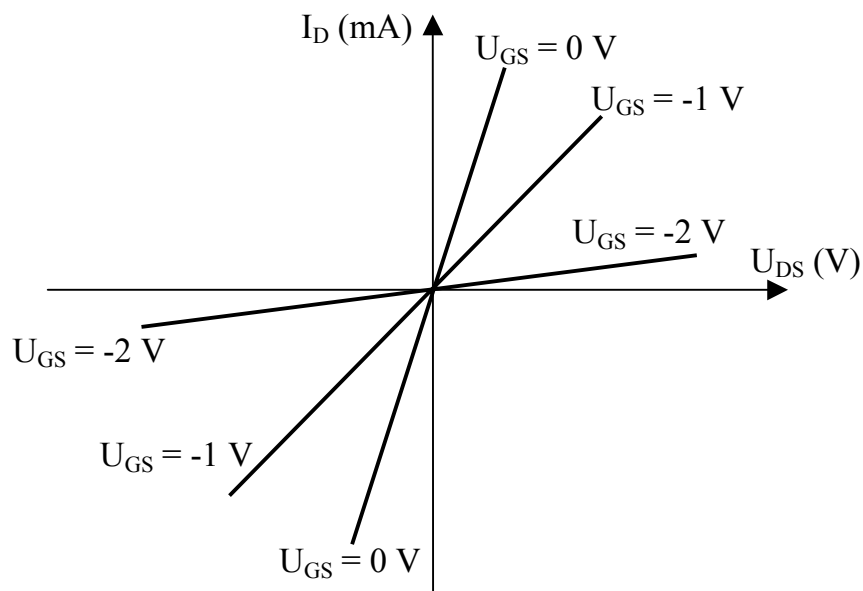
2.1: De uitgangskarakteristiek

De uitgangskarakteristiek geeft het verloop weer van I_{DS} in functie van U_{DS} bij een constante U_{GS} .

Als we, bij een zekere constante U_{GS} , de spanning U_{DS} vanaf nul langzaam opdrijven, dan stijgt de stroom I_{DS} eerst nagenoeg evenredig mee met U_{DS} .

Voor kleine U_{DS} -waarden gedraagt het FET-kanaal (tussen D en S) zich dus als gewone weerstand. Verklaar dit! We bevinden ons in het “weerstandsggebied” (of “ohmic region”).

De $I_{DS} = f(U_{DS})$ grafiek is nagenoeg een rechte door de oorsprong die in werkelijkheid doorloopt in het derde kwadrant (bij negatieve U_{DS} en negatieve I_{DS}). De FET zal bruikbaar zijn als een regelbare weerstand. Hoe regelt u die R_{DS} ?



Figuur 2.5: Het weerstandsggebied in de uitgangskarakteristiek van een N-kanaal JFET

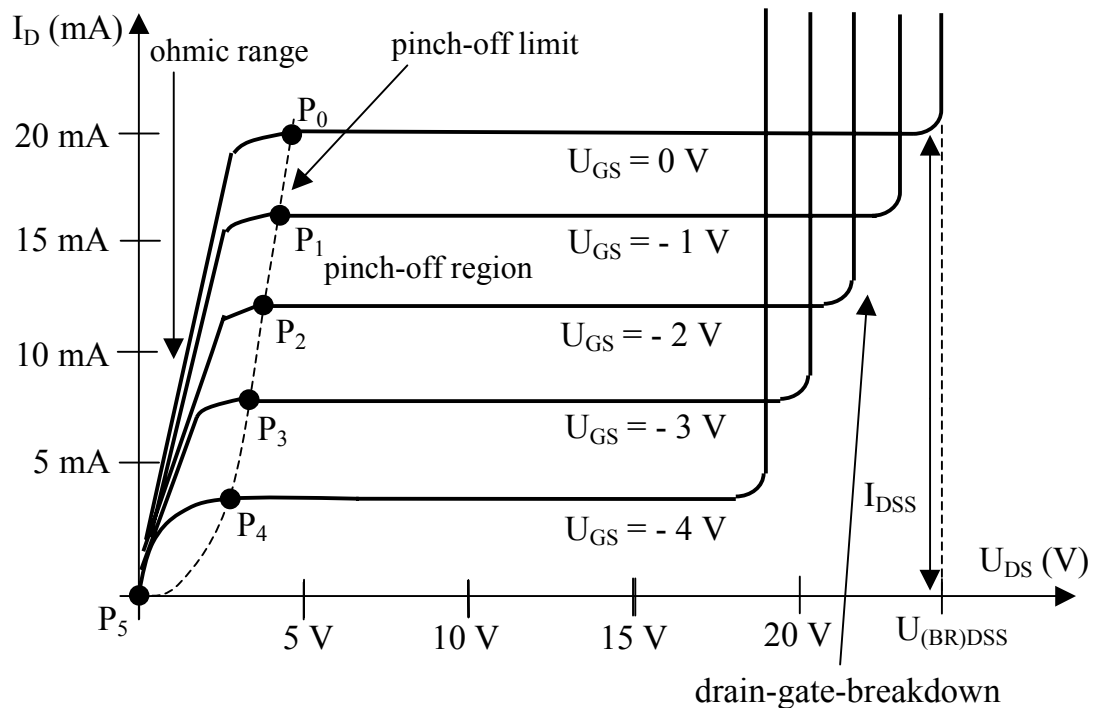
De uitgangskarakteristiek bestaat uit meer dan enkel het weerstandsggebied. Inderdaad, bij grote U_{DS} -variates is er niet langer een lineair verband tussen U_{DS} en $I_{DS} = I_D$. De volledige uitgangskarakteristiek is weergegeven in Figuur 2.6.

De streepjeslijn ($P_0 \dots P_5$, de pinch-off limit) is duidelijk de grenslijn tussen twee verschillende gebieden in de uitgangskarakteristiek. Het eerste gebied is het eerder bestudeerde weerstandsggebied (ohmic region) en het tweede gebied is de zogenaamde pinch-off region.

Het tweede gebied is, zoals reeds gesteld, de pinch-off region. Dit gebied begint vanaf een zekere U_{DS} -waarde die men de “drain to source pinch-off-spanning” noemt. Binnen deze pinch-off region volgt de FET-stroom niet langer de stijgende U_{DS} , maar

blijft I_{DS} nagenoeg constant. Vergelijk dit met de uitgangskarakteristiek van de bipolaire transistor.

In dit zeer ruime pinch-off gebied (welke veel gebruikt wordt) gedraagt het FET-kanaal zich nagenoeg als een constante stroombron. We zitten in het “constante stroom-gebied”.



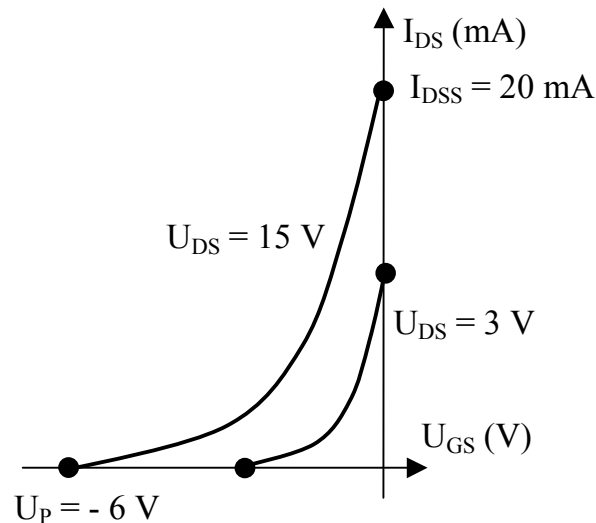
Figuur 2.6: De uitgangskarakteristiek van een JFET

Het derde gebied in de uitgangskarakteristiek is het doorslaggebied (of breakdown-gebied). Blijven we U_{DS} opdrijven, dan zal de stroom I_{DS} uiteindelijk niet langer constant blijven. De stroom I_{DS} zal sterk beginnen stijgen wat betekent dat de FET doorslaat (vergelijk dit opnieuw met de bipolaire transistor).

2.2: De transferkarakteristiek

De transferkarakteristiek geeft het verloop weer van I_{DS} in functie van U_{GS} bij een constante U_{DS} . In principe is er voor elke U_{DS} -waarde een andere transferlijn. Aangezien I_{DS} nagenoeg onafhankelijk is van U_{DS} in de pinch off region van de uitgangskarakteristiek, zullen voor alle U_{DS} -waarden van (bijvoorbeeld) 6 V tot 30 V heel dicht bij elkaar liggen. We kunnen dan ook de 15V-lijn toepassen voor alle U_{DS} -spanningen tussen 6 V en 30 V.

Op Figuur 2.7 zien we de transferkarakteristiek van een N-kanaal JFET. Voor alle U_{DS} -waarden tussen 6 V en 30 V valt de karakteristiek samen met de karakteristiek bij een $U_{DS} = 15$ V. Dit laatste is echter niet het geval indien bijvoorbeeld $U_{DS} = 3$ V. Bij een lage U_{DS} ligt de karakteristiek lager.



Figuur 2.7: De transferkarakteristiek

$U_P = U_{(P)GS}$ noemt men de “gate to source pinch-off-spanning (= afknijpspanning). U_P is de nodige U_{GS} om I_{DS} te doen dalen tot bijvoorbeeld $20 \mu A$ ($I_{DS} \cong 0$).

Per definitie is I_{DSS} de bij $U_{GS} = 0$ optredende I_{DS} . Voor normale U_{DS} -waarden (pinch off gebied) is I_{DSS} ongeveer constant.

In plaats van I_{DS} noteert men vaak kortweg I_D (de drainstroom). Bij de JFET uit ons voorbeeld is de drainstroom I_D dus te regelen tussen 0 en 20 mA. Dit door U_{GS} te laten variëren tussen $-6 V$ en $0 V$. Dit weliswaar in de veronderstelling dat U_{DS} voldoende groot is om in het pinch-off gebied te werken ($6 V < U_{DS} < 30 V$).

2.3: De drainstroom

Men kan bewijzen dat in het pinch-off gebied de formule

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

het verloop weergeeft van de stroom I_D in functie van U_{GS} .

Waarom is bij een JFET de stroom I_D bijna altijd kleiner dan I_{DSS} ?

In het pinch-off gebied (en voor U_{GS} waarden tussen U_P en $0 V$), is er dus een parabolisch verband tussen de drainstroom I_D en de stuurspanning U_{GS} .

2.4: Opmerkingen en opgaven

Het weerstandsgebied noemt men soms ook het triodegebied. Het pinch-off gebied wordt soms ook verzadigingsgebied, saturatiegebied, afknijpgebied of penthodegebied genoemd. De triode en de penthode waren vroeger vaak gebruikte radiobuizen.

De drain to source pinch-off spanning, geldend bij $U_{GS} = 0$, is even groot (doch tegengesteld van teken) als de gate to source pinch off spanning U_p .

De uitgangskarakteristieken van Figuur 2.6 zijn lichtjes geïdealiseerd getekend. In het pinch off gebied lopen de lijnen in werkelijkheid niet perfect horizontaal. De stroom I_D neemt lichtjes toe bij stijgende U_{DS} . De JFET gedraagt zich dus niet als een volmaakte stroombron (vergelijk met het Early effect bij de bipolaire transistor).

Zoek zelf de datasheets op van een aantal JFET's (bijvoorbeeld de 2N2386, de BFW10, de BF245A). Zoek in deze datasheets de uitgangskarakteristiek en ga effectief na dat I_D lichtjes stijgt bij toenemende U_{DS} (in het pinch-off gebied).

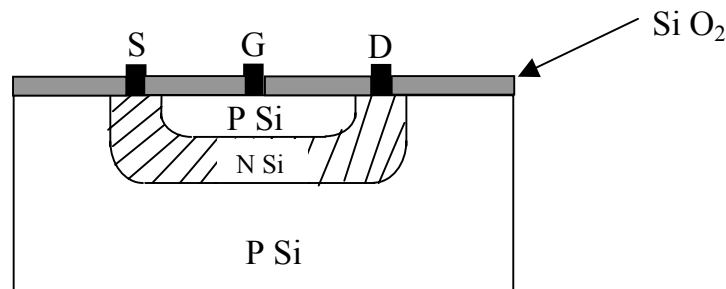
De karakteristieken in Figuur 2.5, Figuur 2.6 en Figuur 2.7 horen bij een N-kanaal JFET. Hoe zien de uitgangskarakteristieken en de transferkarakteristieken er uit bij een P-kanaal JFET? Let vooral op de tekens van de voorkomende spanningen en stromen.

3: De unipolaire JFET versus de bipolaire transistor

Aangezien de stroom doorheen een veldeffecttransistor alleen te wijten is aan de meerderheidsladingsdragers noemt men de JFET ook wel unipolaire transistor. De gewone transistor wordt bipolair genoemd omdat zowel de meerderheidsladingsdragers als de minderheidsladingsdragers een rol spelen in het gedrag van het element.

Vergelijk de karakteristieken van de JFET met de karakteristieken van een bipolaire transistor. Waarom zijn er bij de JFET vier karakteristieken en bij de JFET slechts twee?

4: De symmetrische JFET-structuur

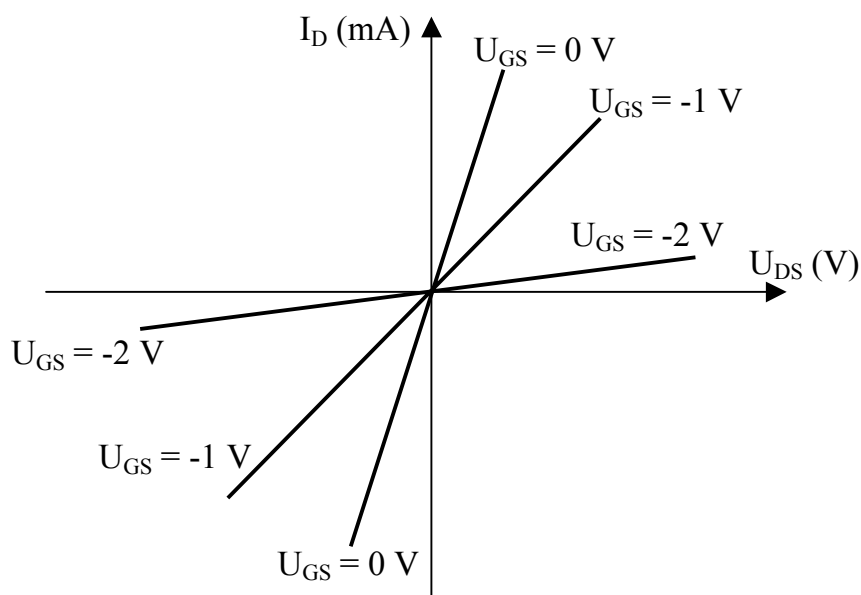


Figuur 2.8: N-kanaal JFET

De principiële bouw van een N-kanaal JFET is weergegeven in Figuur 2.1. Een praktische uitvoering ziet er veeleer uit zoals weergegeven in Figuur 2.8. Omdat de N silicium laag korter is dan de P-zones, vormen de P-zones één geheel.

Zoals Figuur 2.8 laat vermoeden, zijn vele JFET's symmetrisch wat hun opbouw betreft. Men kan dan ook ongestraft de afvoer en de bron verwisselen zonder veel te wijzigen aan de karakteristieken. Deze symmetrie komt ook tot uiting in het schemasymbool (zie Figuur 2.2).

Als gevolg van deze symmetrie verlopen de I_D - U_{DS} -karakteristieken voor lage waarden van de drain-source-spanning symmetrisch. Deze eigenschap laat toe een JFET niet enkel te gebruiken als een regelbare weerstand voor DC signalen, maar ook als een regelbare weerstand voor AC signalen.



Figuur 2.9: N-kanaal JFET

De mogelijkheid om de drain en de source om te wisselen betekent (zie Figuur 2.9) dat de $I_D = f(U_{DS})$ grafieken rechten zijn die door de oorsprong lopen. Deze rechten doorlopen bijgevolg zowel het eerste als het derde kwadrant.

De grafieken in Figuur 12.9 hebben een lineair verloop. Dit lineair gedrag wordt echter enkel bekomen in de ohmic region, dus voldoende dicht bij de oorsprong. De lineariteit van de uitgangskarakteristieken van de JFET kan verbeterd (lineair in een groter gebied) worden, door tegenkoppeling toe te passen op de JFET (zie Hoofdstuk 3).

4.1: Opgave:

Teken een volumeregeling voor een tuner-uitgang (audio). Gebruik een JFET met regelbare U_{GS} . Waarom werkt de schakeling niet voor grote signalen? Kunt u hier even goed een bipolaire transistor gebruiken? Verklaar!

5: Grenswaarden en karakteristieke grootheden

5.1: De grenswaarden

Zoals elk halfgeleiderelement heeft ook een JFET zijn beperkingen wat betreft de toegelaten stromen en spanningen. Ook zijn er beperkingen betreffende het vermogen dat gedissipeerd kan worden.

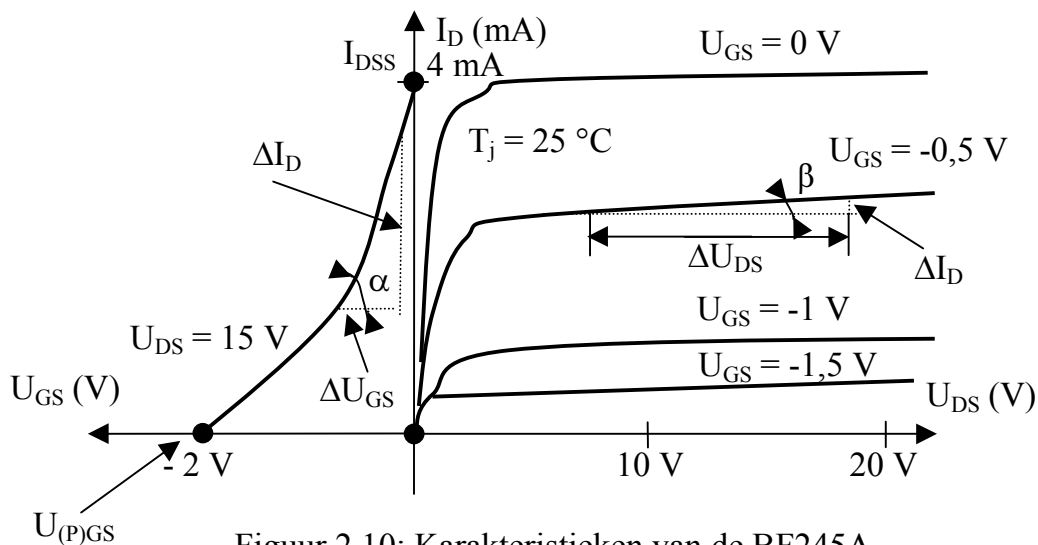
De door de fabrikant opgegeven grenswaarden zijn onder meer

- de maximale drainstroom I_{Dmax} .
- de maximale drain-source-spanning U_{Dsmax} .
- de maximale gate-source-spanning met open drain U_{GS0max} .
- de maximaal toegelaten dissipatie $P_{tot,max}$. Hierbij is $P_{tot} \cong U_{DS}I_D$.

5.2: De steilheid of transferadmittantie

In deze paragraaf besteden we aandacht aan de steilheid g_m welke ook de transferadmittantie y_{fs} genoemd wordt.

Vertrek van de transferkarakteristiek van Figuur 2.10.



Figuur 2.10: Karakteristieken van de BF245A

Per definitie is

$$y_{fs} = g_m = (\Delta I_D / \Delta U_{GS})$$

waarbij U_{DS} constant gehouden is. De zo bekomen $y_{fs} = g_m$ stemt overeen met $\tan \alpha$ in de I_D - U_{GS} -karakteristiek. Zoals in Figuur 2.9 te zien is, stijgt y_{fs} indien I_D groter wordt.

De steilheid g_m (of y_{fs}) is de afgeleide van de drainstroom I_D naar U_{GS} . Steunende op de relatie

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

bekomen we dat $y_{fs} = g_m = - (2 I_{DSS}/U_P)(1 - U_{GS}/U_P)$. De steilheid is bijgevolg maximaal bij $U_{GS} = 0$ en bedraagt $-(2 I_{DSS}/U_P)$.

Bij kleinsignaal JFET's ligt $y_{fs} = g_m$ tussen 2 mA/V en 20 mA/V. Bij vermogen JFET's en hoge instelstromen (bijvoorbeeld $I_D = 1$ A) kan dit oplopen tot vele honderden mA per volt.

5.3: De uitgangsadmittantie

Per definitie is de uitgangsadmittantie

$$y_{os} = (\Delta I_D / \Delta U_{DS})$$

waarbij U_{GS} constant is. De parameter y_{os} (die een erg kleine parameter is) komt overeen met $\tan \beta$ in de I_D - U_{DS} -karakteristiek (zie de uitgangskarakteristiek in Figuur 2.10).

Soms spreekt men ook over de uitgangsweerstand R_u van de JFET. Die uitgangsweerstand $R_u = 1/y_{os}$.

5.4: Opmerkingen

In de voorgaande paragrafen bestudeerden we de admittanties y_{fs} en y_{os} . De indexen hebben de volgende betekenis. De f komt van forward (voorwaarts), de s komt van gemeenschappelijke sourceschakeling en de o komt van output.

De y-parameters y_{fs} en y_{os} gelden alleen bij een bepaalde DC-instelling en voor kleine AC-signalen. Verklaar dit! Verder vertonen de JFET eigenschappen een sterke spreiding.

We besluiten deze paragraaf met een opsomming van enkele grenswaarden en enkele karakteristieke grootheden die geldig zijn voor de N-kanaal JFET's BF 245 A, B en C.

Grenswaarden:

- | | |
|-----------------------------------------------|------------------------|
| - maximum drain-source-spanning | $U_{D_{smax}} = 30$ V |
| - maximum gate-source-spanning met open drain | $U_{GSOmax} = -30$ V |
| - maximum dissipatie | $P_{tot,max} = 300$ mW |

Bij een $U_{DS} = 15$ V en een $U_{GS} = 0$ V geldt voor I_{DSS} dat

- BF245A: $2 \text{ mA} < I_{DSS} < 6,5 \text{ mA}$
- BF245B: $6 \text{ mA} < I_{DSS} < 15 \text{ mA}$
- BF245C: $12 \text{ mA} < I_{DSS} < 25 \text{ mA}$

Bij een $I_D = 10 \text{ nA}$ en een $U_{DS} = 15 \text{ V}$, geldt dat $-8 \text{ V} < U_{(p)GS} < -0,5 \text{ V}$.

Bij een $U_{DS} = 15 \text{ V}$ en een $U_{GS} = 0 \text{ V}$, geldt dat $3 \text{ mA/V} < y_{fs} < 6,5 \text{ mA/V}$ en dat y_{os} een typische waarde heeft van $25 \text{ }\mu\text{A/V}$.