

Hoofdstuk 4: De MOSFET

1: De bouw van een MOSFET

Bij een JFET vinden we een diode tussen de gate en het kanaal. Wanneer de aangelegde spanning de juiste polariteit heeft, dan is deze diode gesperd. Meer precies is het nodig dat U_{GS} negatief is bij een N-kanaal JFET en dat U_{GS} positief is bij een P-kanaal JFET. De gesperde diode tussen gate en kanaal zorgt er voor dat de gatestroom I_G erg klein is (bijvoorbeeld 1 nA). Die erg kleine gatestroom betekent dat de DC-ingangsweerstand zeer hoog is (bij een $|U_{GS}| = 1$ V is een ingangsweerstand van de grootte orde 1000 M Ω realistisch).

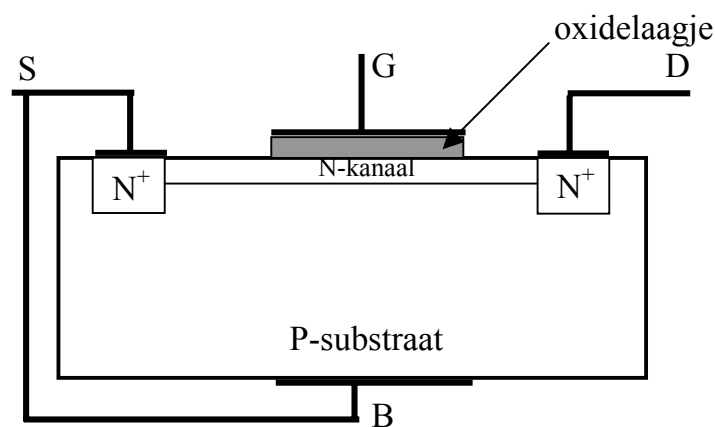
Bij een IGFET (Insulated Gate FET) brengt men een zeer dun isolatielaagje aan tussen de gate en het kanaal. Indien dit isolatielaagje bestaat uit SiO_2 , dan spreekt men van een MOSFET (= Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor).

Bij een MOSFET ontstaat de isolatie tussen gaten en kanaal dus niet langer door een polariteitsafhankelijke diodewerking. Het moedwillig aangebrachte isolatielaagje is hier dan ook zowel voor positieve als voor negatieve spanningen isolerend.

Bovendien is de DC-gatestroom van een MOSFET nog kleiner (grootte orde pA) dan bij een JFET. Dit betekent meteen dat de DC-ingangsweerstand nog hoger (bijvoorbeeld 10^{12} Ω) is dan bij een JFET, en dit zowel voor positieve als voor negatieve gatespanningen U_{GS} .

1.1: De N-kanaal verarmings MOSFET

De bouw van een N-kanaal verarmings MOSFET is weergegeven in de onderstaande Figuur 4.1.



Figuur 4.1: N-kanaal verarmings MOSFET

In Figuur 4.1 zien we eerst en vooral dat de MOSFET opgebouwd is uit een P-substraat waar twee eilandjes met sterk gedopeerd N-materiaal (N^+) aangebracht zijn.

Aan het eerste eilandje van sterk gedopeerd N-materiaal is de source-elektrode verbonden. Aan het tweede eilandje van sterk gedopeerd N-materiaal is de drain-elektrode verbonden.

Tussen de twee eilandjes van sterk gedopeerd N-materiaal is een geleidend kanaal uit N-materiaal aangebracht. Boven het N-kanaal is het eerder vermelde oxidelaagje uit SiO_2 aangebracht. Bovenop dit oxidelaagje is de gate-elektrode aangebracht.

Bemerk dat de source (en niet de drain) verbonden is met de bulk-elektrode B. Deze bulk-elektrode is, zoals Figuur 4.1 duidelijk laat zien, verbonden met het P-substraat.

1.2: De P-kanaal verarmings MOSFET

De bouw van de P-kanaal verarmings MOSFET is heel sterk analoog aan de bouw van de N-kanaal verarmings MOSFET. Het volstaat namelijk het P-substraat in Figuur 4.1 te vervangen door een N-substraat, de N^+ eilandjes te vervangen door P^+ eilandjes (sterk gedopeerd P materiaal) en het N-kanaal te vervangen door een P-kanaal.

Teken zelf (naar analogie met Figuur 4.1) de bouw van een dergelijke P-kanaal verarmings MOSFET.

1.3: De N-kanaal verrijkings MOSFET

Een N-kanaal verrijkings MOSFET is qua bouw gelijk aan de N-kanaal verarmings MOSFET van Figuur 4.1 waarbij het N-kanaal ontbreekt.

Teken zelf de bouw van een dergelijke N-kanaal verrijkings MOSFET.

1.4: De P-kanaal verrijkings MOSFET

Een P-kanaal verrijkings MOSFET is qua bouw gelijk aan de P-kanaal verarmings MOSFET uit Paragraaf 1.2 waarbij het P-kanaal ontbreekt.

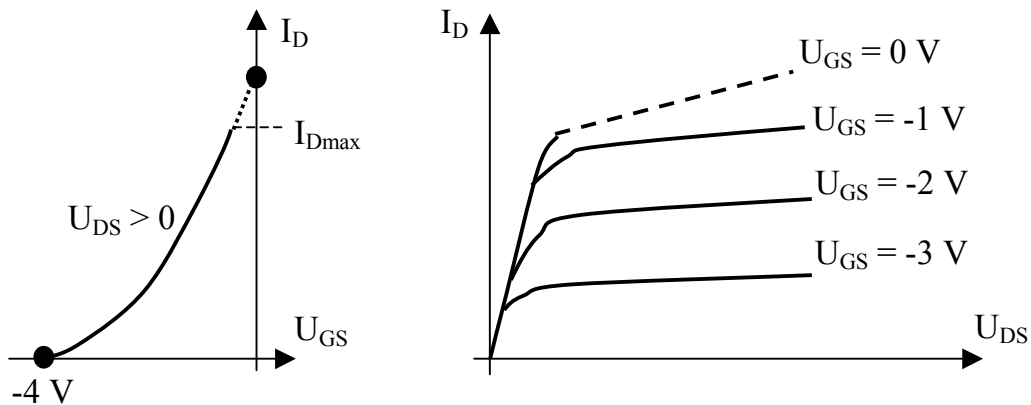
Teken zelf de bouw van een dergelijke P-kanaal verrijkings MOSFET.

2: De werking van een MOSFET

2.1: De werking van een verarmings MOSFET

Een verarmings MOSFET moet gestuurd worden zoals een JFET. Om de drainstroom van nul naar de maximum toegelaten waarde $I_{D\text{max}}$ te sturen, is het nodig om een gatespanning U_{GS} (die steeds de tegengestelde polariteit heeft van U_{DS}) te laten variëren.

Beschouwen we bijvoorbeeld zoals in de onderstaande Figuur 4.2 een N-kanaal verarmings MOSFET. De spanning U_{DS} is positief en U_{GS} is negatief. Bij een $U_{GS} = 0$, is het kanaal geleidend zodat er een drainstroom I_D vloeit. Naarmate U_{GS} negatiever wordt, daalt de drainstroom I_D . Inderdaad, de negatief geladen drain stoot negatieve ladingen af waardoor de geleidbaarheid in het N-kanaal afneemt en bijgevolg I_D effectief daalt.

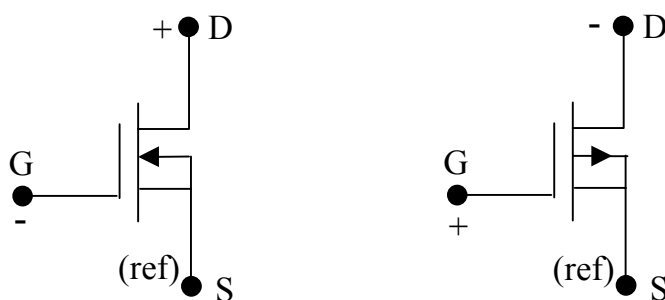


Figuur 4.2: Karakteristieken N-kanaal verarmings MOSFET

Teken zelf de karakteristieken die eigen zijn aan een P-kanaal verarmings MOSFET en let hierbij vooral op de polariteiten van de spanningen en de stromen.

Van een MOSFET welke in de verarmings-mode of depletion-mode werkt, zijn de karakteristieken weergegeven in Figuur 4.2. Het is duidelijk dat het een normally-on FET is wat betekent dat er een drainstroom I_D is bij $U_{GS} = 0$.

Het symbool van een MOSFET van het verarmings-type wordt weergegeven in Figuur 4.3. Links ziet u een N-kanaal verarmings MOSFET en rechts een P-kanaal verarmings MOSFET.



Figuur 4.3: N-kanaal en P-kanaal verarmings MOSFET

Bij een N-kanaal verarmings MOSFET zijn bij een normale werking de spanningen U_{DS} positief en U_{GS} negatief. Bij een P-kanaal verarmings MOSFET zijn bij een normale werking de spanningen U_{DS} negatief en U_{GS} positief.

2.2: De werking van een verrijgings MOSFET

Een verrijgings MOSFET is niet geleidend ($I_D = 0$) bij een $U_{GS} = 0$. Er is namelijk geen geleidend kanaal aanwezig tussen de eilandjes verbonden met de drain en de source.

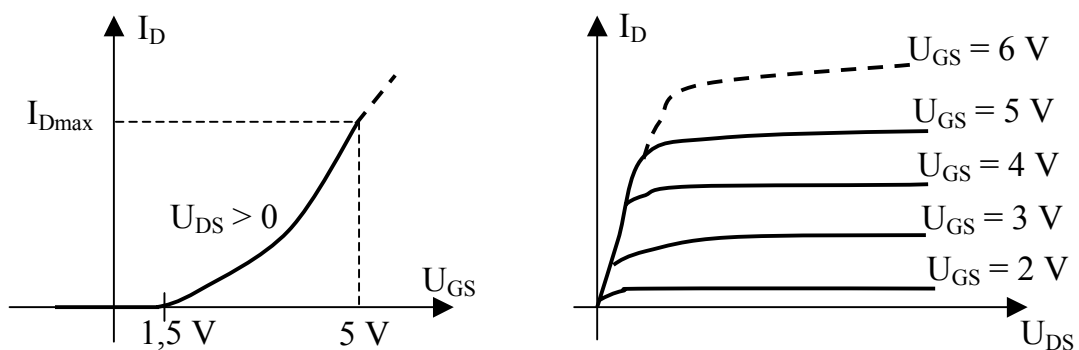
Opdat er wel een stroom I_D zou kunnen vloeien, moet er een kanaal gevormd worden. Bij een N-kanaal MOSFET eist dit een positief geladen gate die negatief geladen deeltjes aantrekt die zo een N-kanaal vormen. Er vloeit nu effectief een stroom I_D wanneer U_{DS} en U_{GS} allebei positief zijn.

Bij een P-kanaal MOSFET eist de vorming van een kanaal een negatief geladen gate. Deze gate trekt dan positief geladen deeltjes aan die zo een P-kanaal vormen. Er vloeit nu effectief een stroom I_D wanneer U_{DS} en U_{GS} allebei negatief zijn.

Bemerk dus dat om een verrijgings MOSFET te doen geleiden de spanningen U_{DS} en U_{GS} een zelfde polariteit moeten hebben terwijl deze bij een verarmings MOSFET een verschillend teken hebben.

Indien bij een verrijgings MOSFET $U_{GS} = 0$, dan is $I_D = 0$. De drempelspanning of threshold-spanning is de U_{GS} -spanning vanaf dewelke er een drainstroom begint te vloeien.

Van een verrijgings MOSFET zijn in Figuur 4.4 de karakteristieken weergegeven.



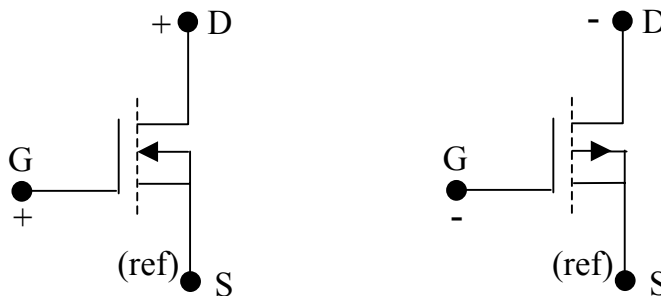
Figuur 4.4: De karakteristieken van een N-kanaal verrijgings MOSFET

In het voorbeeld van Figuur 4.4 is er een drempelspanning van ongeveer 1,5 V. Naarmate U_{GS} stijgt, wordt er een breder N-kanaal gevormd en stijgt I_D . Deze I_D mag uiteraard niet boven een bepaalde maximum waarde I_{Dmax} stijgen.

Teken zelf de karakteristieken die eigen zijn aan een P-kanaal verrijgings MOSFET en let hierbij vooral op de polariteiten van de spanningen en de stromen.

Een dergelijke verrijgings MOSFET is een normally-off FET wat betekent dat er geen drainstroom I_D is bij $U_{GS} = 0$.

De symbolische voorstelling van een dergelijke verrijgings MOSFET is weergegeven in Figuur 4.5. Links ziet u een N-kanaal MOSFET en rechts een P-kanaal MOSFET. Vergelijk deze symbolische voorstellingen met de symbolische voorstellingen van een verarmings MOSFET in Figuur 4.3.

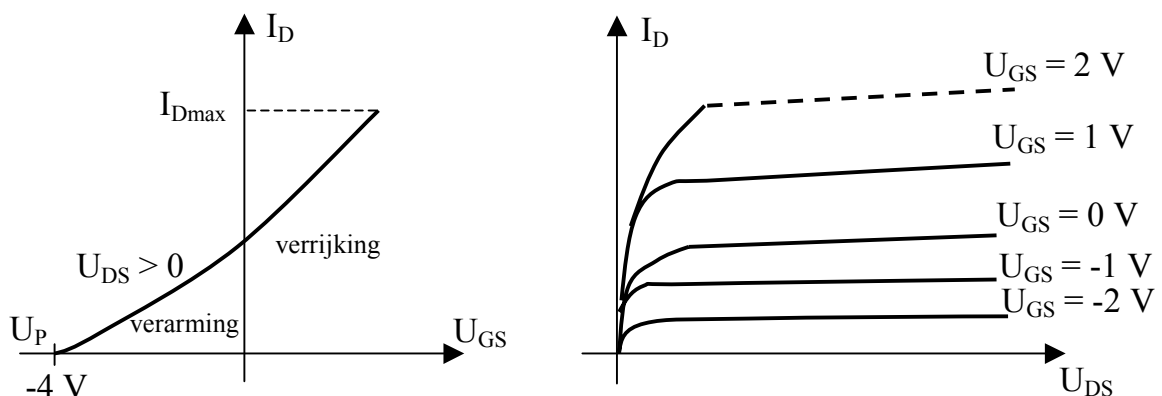


Figuur 4.5: N-kanaal en P-kanaal verrijgings MOSFET

2.3: Combineren verarmings- en verrijgingsprincipe

In Paragraaf 2.1 bestudeerden we MOSFET's van het verarmingstype en in Paragraaf 2.2 bestudeerden we MOSFET's van het verrijkingstype. Het type MOSFET welke we hier bestuderen laat toe om zowel het verarmingsprincipe als het verrijgingsprincipe te combineren.

Teneinde de drainstroom I_D van nul tot het toegelaten maximum te sturen is het nodig dat U_{GS} verschillende polariteiten aanneemt. Voor $I_D = 0$ en voor kleine I_D -waarden moet U_{GS} de tegengestelde polariteit hebben van U_{DS} (verarmings-mode). Voor grote I_D -waarden (tot I_{Dmax}) moeten U_{GS} en U_{DS} dezelfde polariteit hebben (verrijgings-mode). Ga dit na aan de hand van de karakteristieken in Figuur 4.6.



Figuur 4.6: Karakteristieken N-kanaal MOSFET

De karakteristieken van Figuur 4.6 tonen de karakteristieken voor een N-kanaal MOSFET. Teken zelf de karakteristieken die geldig zijn bij een P-kanaal MOSFET. Let hierbij vooral op de polariteiten van de spanningen en de stromen.

De MOSFET's welke we hier in Paragraaf 2.3 bespreken zijn duidelijk van het normally-on type want bij een $U_{GS} = 0$ vloeit er wel degelijk een drainstroom I_D . Het schemasymbool is dan ook hetzelfde als de symbolen welke weergegeven zijn in Figuur 4.3.

3: Belangrijke opmerkingen

3.1: Ruime toepasbaarheid

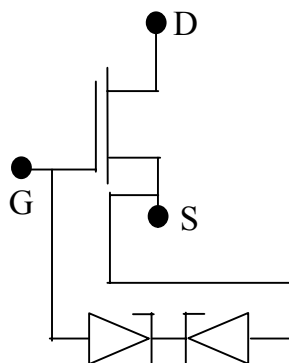
MOSFET's zijn veel gebruikte halfgeleider-elementen. Men vindt dan ook talloze reeksen IC's (integrated circuits, de zogenaamde 'chips') welke uit MOSFET's opgebouwd zijn.

Hierbij zijn onder meer de digitale IC's zeer belangrijk. In een dergelijk IC worden bijvoorbeeld logische poorten (AND, OR, NAND, NOR, ...) opgebouwd door (verrikkings) N-kanaal MOSFET's te combineren met P-kanaal (verrikkings) MOSFET's. Dit geeft de zogenaamde CMOS familie.

3.2: Het beveiligen van een MOSFET

Het isolerende laagje (SiO_2) tussen gate en kanaal is zeer hoogohmig en zeer dun. Wordt $|U_{GS}|$ te hoog (bijvoorbeeld meer dan 15 V), dan zal dit laagje doorslaan waardoor de MOSFET definitief defect raakt. Het louter aanraken van de MOSFET-gate (met de vinger, een meetprobe, een soldeerbout ...) kan al een voldoende spanningspiek induceren om de MOSFET blijvend te beschadigen. Ook een verpakking in zeer goed isolerende stoffen kan de MOSFET beschadigen (op goede isolatoren kunnen gemakkelijk grote elektrostatische spanningen ontstaan).

Om de praktische handelbaarheid groter te maken, worden de huidige MOSFET's vaak van inwendige zenerdiodes (tussen gate en source) voorzien (beveiligingszeners).



Figuur 4.7: Met zenerdiodes beveiligde MOSFET

Figuur 4.7 toont hoe een MOSFET beveiligd kan worden door tussen de gate en de source twee zenerdiodes te plaatsen die in anti-serie geschakeld zijn. Als deze twee diodes zeneren bij een spanning van 10 V, dan betekent dit dat de spanning U_{GS} slechts tussen $-10,7$ V en $+10,7$ V kan variëren.

Bij U_{GS} -spanningen tussen -10 V en $+10$ V blijven de zenerdiodes gesperd en werkt de MOSFET nagenoeg alsof de zenerdiodes niet aanwezig zijn (wel zal de aanwezigheid van de zenerdiodes de capaciteit C_{GS} met enkele pF verhogen en zal de DC-gatestroom een klein beetje stijgen).

De eerder vermelde aanrakingen en verpakkingen zullen de MOSFET niet meer beschadigen. Verklaar dit! Het is echter wel duidelijk dat de mini-zenerdiodes slechts een beperkte stroom (bijvoorbeeld maximum $100 \mu\text{A}$) verdragen. Hierdoor is het duidelijk dat men geen laagohmige spanningsbron van meer dan 10 V tussen de gate en de source mag aansluiten.

3.3: Power MOSFET's

Naast de klein-sigitaal MOSFET's (met bijvoorbeeld een $I_{D\text{max}} = 25$ mA, $U_{D\text{smax}} = 30$ V, $P_{\text{tot}} = P_D = U_{DS}I_D = 0,2$ W) bestaan er ook medium-power MOSFET's en power MOSFET's. Een dergelijke power MOSFET heeft bijvoorbeeld een $I_{D\text{max}} = 20$ A, een $U_{D\text{smax}} = 800$ V, een $P_{D\text{max}} = 100$ W (mits voldoende koeling).

In wezen kunnen deze power MOSFET's aanzien worden als een parallelschakeling van vele kleine MOSFET's of 'FET-zones'. Naargelang de interne opbouw en ruimtelijke schikking van de 'FET-zones', worden deze power MOSFET's soms ook V-MOSFET's, HEX-MOSFET's of D-MOSFET's genoemd. De diverse fabrikanten gebruiken verschillende inwendige structuren om tot een praktische power-MOSFET te komen, maar voor de gebruiker is de interne opbouw en dus ook de bijhorende V-, HEX- of D-benaming van geen belang.

Bij MOSFET's worden dezelfde grenswaarden en karakteristieke grootheden ($I_{D\text{max}}$, $U_{D\text{smax}}$, $U_{G\text{smax}}$, P_{tot} of $P_{D\text{max}}$, y_{fs} , y_{os} , C_{GS} , C_{DG} , ...) gedefinieerd en toegepast als bij de eerder bestudeerde JFET.

Bij klein-sigitaal MOSFET's zijn de steilheid y_{fs} en de capaciteiten C_{GS} en C_{DG} het kleinst. Zo zijn bijvoorbeeld waarden $y_{fs} = 10$ mA/V, $C_{GS} = 5$ pF en $C_{DG} = 0,5$ pF realistisch. Hoe 'zwaarder' de MOSFET, hoe groter deze waarden worden. Bij zware power-MOSFET's kan de steilheid y_{fs} oplopen tot meerdere A/V (althans bij grote instelstromen). Bij deze zware power MOSFET's kan C_{GS} oplopen tot enkele nF en kan C_{DG} oplopen tot 100 pF en meer. Verklaar deze opmerking indien u beseft dat een power-MOSFET opgebouwd is uit een parallelschakeling van meerdere kleine MOSFET's.

3.4: Dual gate MOSFET's

Er bestaan ook MOSFET's met twee gates (zie bijvoorbeeld de BF991 van Philips). Dit zijn de zogenaamde dual gate MOSFET's die bijna uitsluitend bij hoge frequenties (radiofrequenties) gebruikt worden. Daar kunnen ze schakelingen met een erg geringe inwendige feedback en een lage kruismodulatie en intermodulatie opleveren. Ook is het met behulp van deze dual gate MOSFET's mogelijk een regelbare versterking (AGC) te bekomen.

4: MOSFET-versterkerschakelingen

Net zoals een bipolaire transistor en een JFET, heeft ook een MOSFET een gepaste DC-instelling nodig vooraleer deze kan functioneren als AC-versterker. We zullen eerst de mogelijke DC-instelschakelingen bespreken waarna de AC-versterkerschakelingen zelf aan bod komen.

4.1: De DC-instelling van een MOSFET-schakeling

Bij MOSFET's onderscheiden we twee gevallen.

Vooreerst is er het geval waarbij we een U_{GS} -spanning nodig hebben met een ander teken dan U_{DS} . Dus om een instelstroom I_D te bekomen, is er bij een N-kanaal MOSFET een negatieve U_{GS} en een positieve U_{DS} nodig. Bij een P-kanaal MOSFET is er een positieve U_{GS} en een negatieve U_{DS} nodig.

In het bovenstaande geval verkeren we in identiek dezelfde situatie als bij de instelling van een JFET. Dit betekent dat de JFET-instelschakelingen van Figuur 3.2, Figuur 3.3 en Figuur 3.4 direct toepasbaar zijn. Het is in deze instelschakelingen dus voldoende de JFET te vervangen door een MOSFET.

Ga zelf na welk voordeel de schakeling van Figuur 3.3 biedt ten opzichte van de schakelingen in Figuur 3.2 en Figuur 3.3.

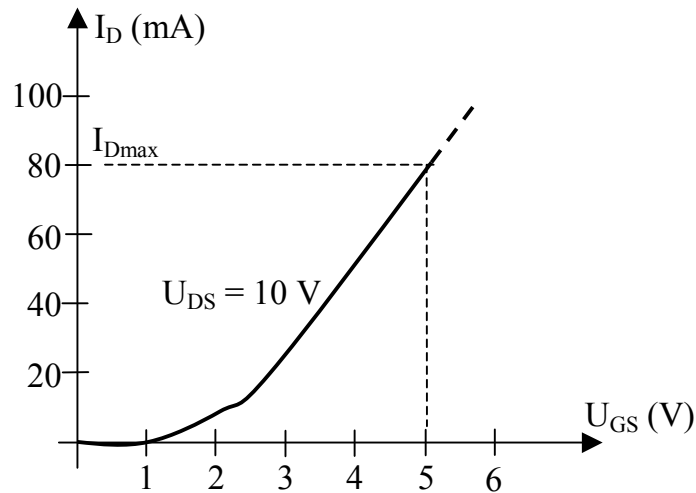
Ofwel is er het geval waarbij U_{GS} dezelfde polariteit moet hebben als U_{DS} . Bij een N-kanaal MOSFET betekent dit dat zowel U_{GS} als U_{DS} positieve waarden moeten hebben. Bij een P-kanaal MOSFET betekent dit dat zowel U_{GS} als U_{DS} negatieve waarden moeten hebben. Met een normally-off MOSFET verkeren we in dat geval.

Het is duidelijk dat we in het laatste geval de nodige U_{GS} direct met behulp van een spanningsdeler (R_1 en R_2) kunnen afleiden uit U_{DD} . Dit zonder dat een source-weerstand R_S toegepast wordt.

Soms kan het echter ook bij een normally-off MOSFET nuttig zijn een sourceweerstand R_S te plaatsen. Verklaar! Op die manier kan dan toch terug hetzelfde schema als in Figuur 3.4 bekomen worden.

4.2: De DC-instelling van een MOSFET-schakeling: oefening

Gegeven is een MOSFET waarvan de transfertkarakteristiek weergegeven is in Figuur 4.8.



Figuur 4.8: Transfertkarakteristiek MOSFET

Stel deze MOSFET in bij $I_D = 40$ mA en $U_{DS} = 12$ V. Gebruik hierbij een $U_{DD} = 20$ V.

Maak hierbij onderscheid tussen het geval waarbij

- er geen sourceweerstand R_S gebruikt wordt.
- er wel een sourceweerstand R_S gebruikt wordt.

Geef de volledige schema's en maak ook alle berekeningen.

Wanneer er een sourceweerstand R_S aanwezig is, kies dan U_{RS} gelijk aan 60 % van de bij I_{Dmax} horende U_{GS} .

Extra vraagjes:

- Welk voordeel en welk nadeel heeft de aanwezigheid van de sourceweerstand R_S ?
- Welk type MOSFET wordt er hier gebruikt?
- Welke treshold spanning heeft deze MOSFET?
- Is de gegeven grafiek wel degelijk bruikbaar?

4.3: Laagfrequente MOSFET-versterkers

Net zoals bij een JFET, kan ook hier een onderscheid gemaakt worden tussen een GSS, een GGS en een GDS. Alle MOSFET schakelingen zijn dan ook volkomen analoog als bij de overeenkomstige JFET schakelingen.

Hou wel in gedachten dat bij power MOSFET's de transfertadmittantie y_{fs} een hogere waarde heeft (toch bij voldoende hoge drainstroom) dan bij klein signaal MOSFET's en JFET's. Ook hebben deze power MOSFET's een flink grotere C_{GS} en C_{DG} .

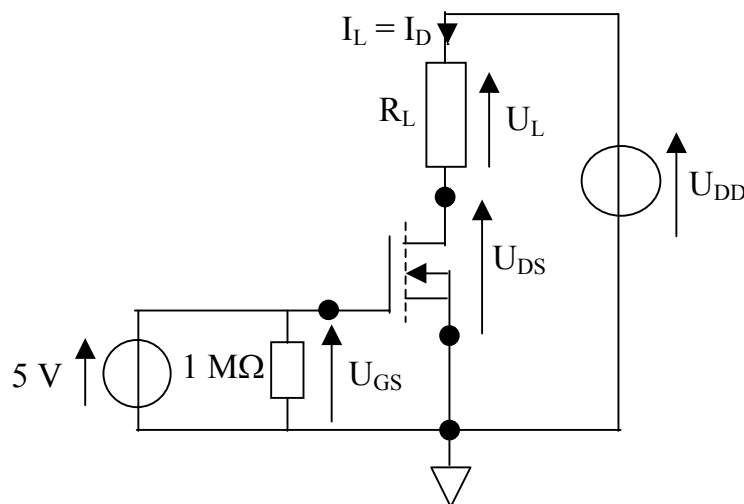
Alhoewel de toe te passen formules volkomen identiek zijn, kunnen de praktische resultaten bij power MOSFET's dus sterk afwijken van de resultaten bekomen in Hoofdstuk 3.

5: De MOSFET als schakelaar

5.1: Principe

Net zoals bipolaire transistoren als schakelaar gebruikt kunnen worden, kunnen ook normally-off MOSFET's ($I_D = 0$ als $U_{GS} = 0$) als elektronische schakelaar gebruikt worden.

Zoals in Figuur 4.9 te zien is, wordt de belasting R_L via een N-kanaal verrijgings MOSFET aangeschakeld of afgeschakeld. De belastingsweerstand R_L is bijvoorbeeld een lamp, een verwarmingselement, een contactorspoel, een vloeistofklep, een DC-motor ...



Figuur 4.9: De MOSFET als schakelaar

We kunnen steeds stellen dat

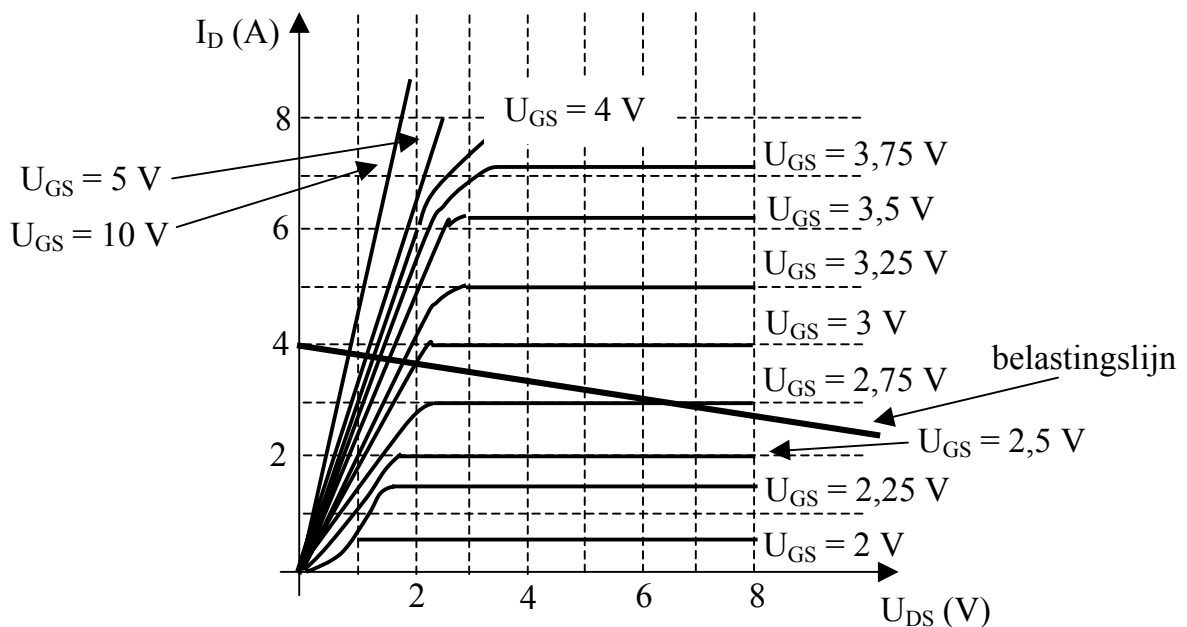
$$U_{DS} + R_L I_D = U_{DD}.$$

Hieruit volgt de belastingslijn $U_{DS} = U_{DD} - R_L I_D$. Indien R_L een 25V/4A-weerstand is, dan is $R_L = 6,25 \Omega$ en geldt dat $U_{DS} = 25 - 6,25 I_D$.

Indien $U_{GS} = 0$ (geen gatesturing), dan is $I_D \cong 0$. Er vloeit geen stroom door R_L zodat $I_L = 0$ en ook de spanning $U_L = 0$. De belasting is met andere woorden uitgeschakeld. De MOSFET gedraagt zich als een open schakelaar tussen D en S waarbij $U_{DS} = U_{DD}$.

De MOSFET gedraagt zich als een gesloten schakelaar tussen D en S indien $U_{DS} \cong 0$. Inderdaad, dan geldt er dat $U_L \cong U_{DD}$. De belasting R_L ontvangt de volledige voedingsspanning waardoor $I_L = I_D = U_{DD}/R_L$. Bemerkt dat de stroom I_L enkel bepaald is door U_{DD} en R_L en dus niet door de schakelaar.

De MOSFET gedraagt zich als een open schakelaar indien $U_{GS} = 0$, maar wanneer gedraagt de MOSFET zich als een gesloten schakelaar? Om op deze vraag te antwoorden, gaan we er van uit dat de in Figuur 4.9 gebruikte MOSFET karakteristieken heeft zoals weergegeven in Figuur 4.10.



Figuur 4.10: Karakteristieken MOSFET

Op Figuur 4.10 zijn niet enkel de karakteristieken van de MOSFET te zien. Ook de belastingslijn $U_{DS} = U_{DD} - R_L I_D$ is er weergegeven. De aangelegde U_{GS} bepaalt welke MOSFET-karakteristiek geldig is. Het snijpunt van die MOSFET-karakteristiek en de belastingslijn is het werkpunt.

De schakelaar is gesloten indien U_{DS} (die hoort bij het werkpunt) een flink stuk kleiner is dan U_{DD} (in het huidige rekenvoorbeeld vloeit er dan een $I_L = I_D \cong 4$ A). Op Figuur 4.10 is duidelijk zichtbaar dat hiervoor een U_{GS} van minstens 3 V aangelegd moet worden.

Met een $U_{GS} < 3$ V blijft men namelijk ver van de vereiste $U_{DS} \cong 0$ V en $I_D \cong 4$ A. Controleer dit voor een $U_{GS} = 2,75$ V.

Bij $U_{GS} = 3 \text{ V}$ (grenszone) is U_{DS} nog 2 V zodat $U_L = 23 \text{ V}$ en $I_L = 3,7 \text{ mA}$. In de praktijk gaan we dan ook altijd een U_{GS} toepassen die een stuk boven de grenswaarde (in ons voorbeeld 3 V) uitsteekt.

Wanneer respectievelijk een U_{GS} van $3,5 \text{ V}$, 4 V en 5 V genomen wordt, dan daalt U_{DS} tot respectievelijk $1,5 \text{ V}$, $1,2 \text{ V}$ en $1,1 \text{ V}$. Dus naarmate U_{GS} stijgt daalt U_{DS} en stijgt U_L zodat het ideale geval waarbij $U_{DS} = 0$ en $U_L = U_{DD}$ beter benaderd wordt.

Een nog hogere U_{GS} (zoals bijvoorbeeld 10 V) heeft praktisch geen zin meer. De karakteristieken tonen dat U_{DS} bijna niets meer daalt. Vanaf $U_{GS} = 5 \text{ V}$ kunnen we dan ook stellen dat het kanaal tussen D en S maximaal geleidend is. De weerstand die het MOSFET-kanaal in deze toestand vertoont, noemt men R_{DSon} (Ω). Hoe lager R_{DSon} , hoe beter de MOSFET de ideale gesloten schakelaar benadert.

Bepaal voor de MOSFET in ons voorbeeld de waarde van R_{DSon} .

5.2: Besluiten

Met $U_{GS} = 0$ zijn I_D , I_L en U_L allen ongeveer nul. De belasting is uitgeschakeld, de MOSFET gedraagt zich als een open schakelaar.

Met $U_{GS} = 5 \text{ V}$, is $U_{DS} \cong 0$ (ongeveer 1 V in ons voorbeeld) zodat $U_L \cong U_{DD}$ (in ons voorbeeld is $U_L = 24 \text{ V}$ en is $U_{DD} = 25 \text{ V}$). De belasting is dus ingeschakeld, de MOSFET gedraagt zich als een gesloten schakelaar (op een kleine weerstand R_{DSon} na).

Het is dus mogelijk de belasting R_L (bijvoorbeeld een lamp) in of uit te schakelen door 5 V of 0 V aan de gate te leggen.

5.3: Opmerkingen

Elke normally-off MOSFET is open bij $U_{GS} = 0$ (geen gatesturing). Bijna alle MOSFET's zijn gesloten (maximaal geleidend kanaal) bij $U_{GS} = 10 \text{ V}$. Bij vele MOSFET's volstaat een $U_{GS} = 5 \text{ V}$, slechts in uitzonderlijke gevallen is een U_{GS} van 15 V of 20 V vereist. Wel moet er altijd goed voor gezorgd worden dat de toegestane U_{GSmax} niet overschreden wordt.

Er bestaan power MOSFET's die vele tientallen ampères kunnen schakelen (bijvoorbeeld $I_{Dmax} = 30 \text{ A}$) en een R_{DSon} van enkele honderdsten van een ohm vertonen. Sommige MOSFET's hebben een U_{DSmax} van wel 1000 V en kunnen zodoende spanningen van wel 1000 V inschakelen of uitschakelen.

Zowel in open ($U_{GS} = 0$) als in gesloten toestand ($U_{GS} = 5 \text{ V}$ in ons voorbeeld) dissipeert de MOSFET slechts een beperkt vermogen omdat ofwel I_D ofwel U_{DS} laag

is. Dit betekent dat de MOSFET slechts weinig vermogenverlies veroorzaakt en dat deze dan ook slechts weinig opwarmt.

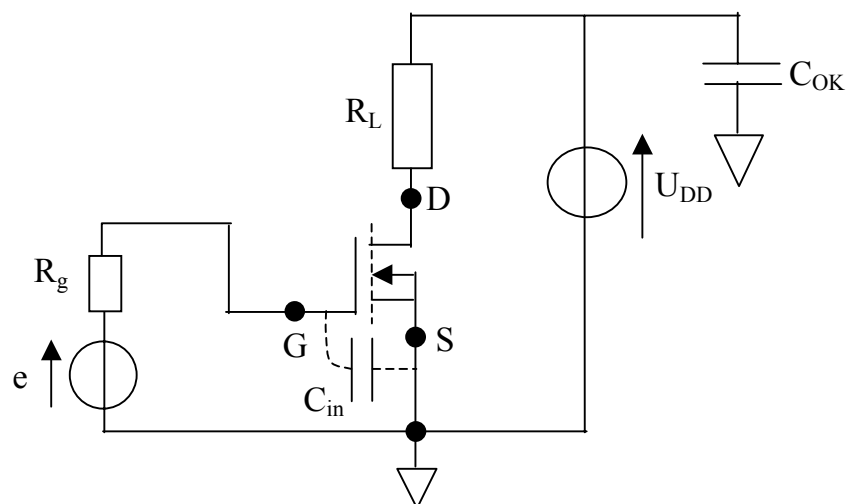
Bij tussenwaarden van U_{GS} kan de vermogendissipatie in de MOSFET echter zo hoog worden dat de MOSFET vernietigd wordt. Toon dit aan met een rekenvoorbeeld steunende op Figuur 4.10 waarbij $U_{GS} = 2,5$ V. Ga er van uit dat de MOSFET slechts 12,5 W kan dissiperen.

Aangezien de tussenwaarden van U_{GS} zoveel mogelijk vermeden moeten worden, moet U_{GS} steeds zo snel mogelijk omgeschakeld worden van 0 V naar (bijvoorbeeld) 5 V of omgekeerd. Men moet met andere woorden de schakelaar snel omschakelen. Het te lang in de ‘tussenzone’ verblijven kan de MOSFET beschadigen. Een te langdurige en forse opwarming zorgt er namelijk voor dat de maximale junctietemperatuur overschreden wordt.

5.4: Aansturen gate met behulp van een blokgolf

Om de MOSFET blijvend gesperd ($U_{GS} = 0$) of geleidend te houden ($U_{GS} = 5$ V in ons voorbeeld) hoeft de stuurbron bijna geen stroom en vermogen te leveren. De gatestroom I_G is namelijk ongeveer nul voor elke constante U_{GS} -waarde onder U_{GSmax} . Vergelijk deze situatie met de eerder bekomen resultaten bij de bipolaire transistor.

In vele gevallen zal een MOSFET echter voortdurend en met hoge frequentie in- en uitgeschakeld worden. Men stuurt de gate dan met een blokgolf (niveau's van 0 V en 5 V) van bijvoorbeeld 30 kHz. De gatestroom zal nu niet langer nul blijven. Bij elke inschakeling of uitschakeling zal een (liefst korte) stroompuls optreden.



Figuur 4.11: De MOSFET als schakelaar

Op Figuur 4.11 is zichtbaar hoe een blokgolfgenerator een blokgolf (e) genereert en hiermee de gate van de MOSFET aanstuurt. In realiteit zal die blokgolfgenerator een inwendige weerstand R_g hebben.

Telkens wanneer de MOSFET ingeschakeld moet worden (bij elke overgang van 0 V naar 5 V van de blokgolf e), moet de ingangscapaciteit C_{in} opgeladen worden van 0 V tot 5 V.

Telkens wanneer de MOSFET uitgeschakeld moet worden (bij elke overgang van 5 V naar 0 V van de blokgolf e), moet de ingangscapaciteit C_{in} ontladen worden van 5 V tot 0 V.

De stuurbron (blokgolfgenerator) moet nu instaan voor de opeenvolgende laadstromen en ontlaadstromen bij de opeenvolgende in- en uitschakelogenblikken. Teken het gewenste verloop van de gatestroom!

Daar de MOSFET snel ingeschakeld en uitgeschakeld moet worden, moet de capaciteit C_{in} snel opgeladen en snel ontladen worden (in bijvoorbeeld 1 μ s). Vanzelfsprekend vereist dit voldoende korte en dus grote stroompulsen. Dit eist een voldoende kleine tijdsconstante $R_g C_{in}$. Er is dan ook een stuurbron vereist met een voldoende lage inwendige weerstand R_g . Bepaal in ons voorbeeld wat de maximaal toegelaten R_g is.