



Departement industriële wetenschappen en technologie

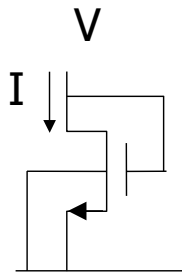
Elementaire transistor schakelingen

Jan Genoe
KHLim

In dit hoofdstuk bespreken we eerst op een systematische wijze de inbouw van transistors in analoge elektronische schakelingen. Het doel hiervan is dat je in een willekeurige schakeling de functie van een individuele transistor kan herkennen, en zo stap voor stap de werking van de schakeling kan analyseren. In principe geldt dit zowel voor bipolaire als voor MOS transistors. In dit hoofdstuk lichten we dit toe aan de hand van MOS transistors. Vervolgens gaan we dit toepassen op een verschilversterkertrap, de basis van elke OPAMP. In alle analoge schakelingen is matching heel erg belangrijk. Anders bekommen we offset en drift. Tot slot van dit hoofdstuk bespreken we dan ook een aantal trucs om een goede matching te bekommen.

Gebruik MOS transistor als diode

- **De transistor is hierdoor steeds in verzadiging**
 - oefening: bewijs dit
- **Een kwadratische stroom-spanningskarakteristiek wordt hierdoor bekomen**



$$I = K' \frac{W}{L} (V - V_T)^2$$

$$V = V_T + \sqrt{\frac{I}{K' \frac{W}{L}}}$$

Analoog ontwerpen

Jan Genoe KHLim

Een diode is een twee-terminal component. We leggen er een spanning over aan en krijgen er een stroom door, of omgekeerd. Er is geen derde contact dat een controle van de stroom toelaat.

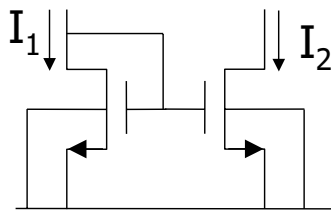
Een transistor daarentegen heeft wel dat derde contact dat toelaat de stroom te controleren.

Wanneer nu echter de gate van de transistor met de drain verbonden wordt (en de bulk met de source) hebben we slechts 2 externe contacten meer over. We bekomen hieruit een stroom-spanningskarakteristiek die kwadratisch is (dus niet logaritmisch zoals bij de diode)

Let wel op: dit is de transistor als diode geschakeld, maar daarom is het nog geen diode.

stroomspiegel

- De gate van een transistor in diode schakeling drijft verschillende andere gates aan.
- De stromen verhouden zich als de W/L van de verschillende transistors



$$\frac{I_1}{\frac{W_1}{L_1}} = \frac{I_2}{\frac{W_2}{L_2}}$$

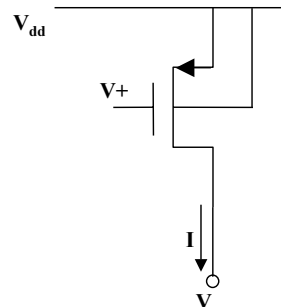
Bij een stroomspiegel is een van de twee transistors als diode geschakeld. Deze transistor vormt de ingang van de stroomspiegel. Als een gevolg van de stroom die hier binnenkomt krijgen we een gatespanning die voor beide transistors dezelfde is. Als de tweede transistor een kopie is van de eerste transistor zal deze dus ook dezelfde stroom leveren, op de correctiefactor $(1+\lambda V_{DS})$ na en zolang deze transistor in verzadiging is.

De W/L van de tweede transistor mag echter ook een andere waarde hebben. Hierdoor bekommen we aan de stroomuitgang een stroom die zich verhoudt tot de ingangsstroom als de W/L verhoudingen van beide transistors.

Op de tekening staat een stroomspiegel met nMOS transistors. Natuurlijk kunnen we een gelijkaardige schakeling realiseren met pMOS transistors.

Actieve belasting

- Een vaste spanning aan de gate (V_+)
- source verbonden met een vaste spanning
- komt overeen met een (niet lineaire) weerstand



Een weerstand op IC neemt behoorlijk wat plaats in. Wanneer we deze weerstand vervangen door een transistor met een vaste gate spanning kunnen we behoorlijk wat plaats uitsparen. Hierdoor lijkt het dat we gebruik maken van een heel grote weerstand en van een veel grotere voedingsspanning. Dit geldt echter alleen maar zolang dat deze transistor in verzadiging blijft.

Ook hier gebruiken we dus maar 2 van de 3 contacten van de transistor. De gate staat op een vaste spanning ten opzicht van de source.

In dit voorbeeld wordt een actieve belasting uitgewerkt met een pMOS transistor. Je kan natuurlijk ook een actieve belasting met een nMOS transistor uitwerken.

Gebruik als transistor

- **We catalogeren de transistors waarvan de 3 terminalen gebruikt worden in 3 groepen, bepaald door welk contact aan een vaste spanning ligt**
 - **gemeenschappelijke source**
 - » de ingang is dan verbonden met de gate (=spanningsbron)
 - » de uitgang is dan verbonden met de drain
 - » deze transistor werkt als een spanningsversterker (amplifier)
 - **gemeenschappelijke drain**
 - » de ingang is dan verbonden met de gate (=spanningsbron)
 - » de uitgang is dan verbonden met de source
 - » de spanning aan de source volgt de spanning aan de ingang (source follower)
 - **gemeenschappelijke basis**
 - » de ingang is dan verbonden met de source (=stroombron)
 - » de uitgang is dan verbonden met de drain
 - » de spanning aan de drain wordt bepaald door de stroom aan de drain (Cascode trap)

Analoog ontwerpen

Jan Genoe KHLim

De twee voorgaande schema's gebruikten de MOS transistor als een twee terminal component.

Wanneer de MOS transistor als een drie terminal component gebruikt wordt, kunnen we de gebruiksgebieden opdelen in drie groepen. Het is namelijk zo dat telkens een van de drie spanningen een vaste spanning moet zijn. Het is deze vaste spanning die we zullen gebruiken om de transistorschakelingen op te delen in drie types:

- gemeenschappelijke source (common source)
- gemeenschappelijke drain (common drain)
- gemeenschappelijke basis (common base)

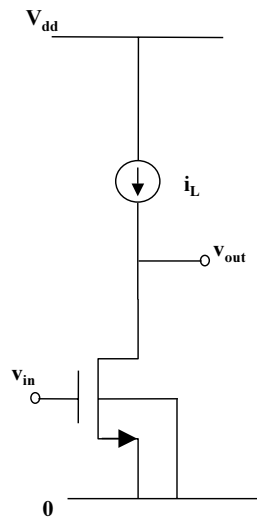
Dezelfde opdeling kunnen we maken voor de bipolaire transistors. In dit geval spreken we van een

- Common emitter
- common collector
- common base

schakeling.

Gemeenschappelijke source

- De ingang is dan verbonden met de gate (=spanningsbron)
- De uitgang is dan verbonden met de drain
- Deze transistor werkt als een spanningsversterker (amplifier)

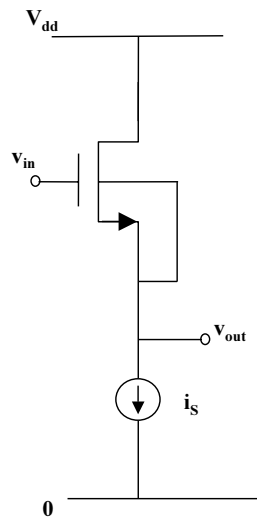


Een gemeenschappelijke source schakeling (MOS transistor) werkt als spannings-versterker: we leggen een ingangsspanning aan en we bekommen een uitgangsspanning.

Het bipolaire equivalent, een gemeenschappelijke emitter schakeling zet meestal een ingangsstroom om in een uitgangsspanning.

Gemeenschappelijke drain

- De ingang is dan verbonden met de gate (=spanningsbron)
- De uitgang is dan verbonden met de source
- De spanning aan de source volgt de spanning aan de ingang (source follower)

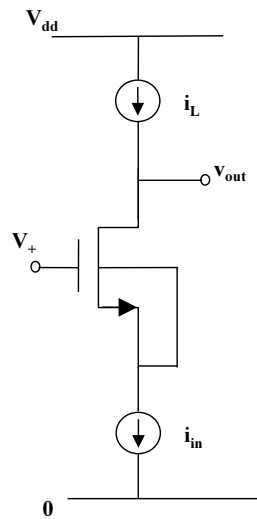


Deze schakeling (uitgevoerd met een MOS transistor) levert geen spanningsversterking op. De uitgang volgt, met een vaste offset, de ingangsspanning. Maar aan de uitgang kan wel een behoorlijke stroom geleverd worden, zonder dat de ingang belast wordt. De ingang moet in principe enkel maar de gate capaciteit opladen.

Het bipolaire equivalent van deze schakeling, de common collector schakeling, werkt volledig analoog. Ook hier volgt de uitgangsspanning de ingangsspanning, op een vast spanningsverschil na. Ook hier kan aan de uitgang een veel grotere stroom bekomen worden dan de stroom die moet geleverd worden aan de ingang. De stroomwinst is de factor β .

Gemeenschappelijke basis

- De ingang is dan verbonden met de source (=stroombron)
- De uitgang is dan verbonden met de drain
- De spanning aan de drain wordt bepaald door de stroom aan de drain (Cascode trap)



Het grote voordeel van de cascode trap is dat de ingangsstroom ook als stroom aan de uitgang wordt waargenomen, maar aan de uitgang zorgt die stroom wel voor een belangrijke spanningsverandering van de uitgang. Als de cascode transistor hier niet tussen zou gestaan hebben zou de spanning over de ingangsstroombron ook in belangrijke mate veranderen. Omdat in de meeste gevallen geen enkele stroombron spanningsonafhankelijk is, zou dus de ingangsstroom veranderen door de verandering van de uitgangsspanning. De cascode transistor zorgt er dus voor dat de spanning aan de uitgang mag veranderen. De karakteristieken van de ingangsstroombron worden hierdoor niet veranderd.

verschilversterker trap

Beide MOS transistors zijn in verzadiging

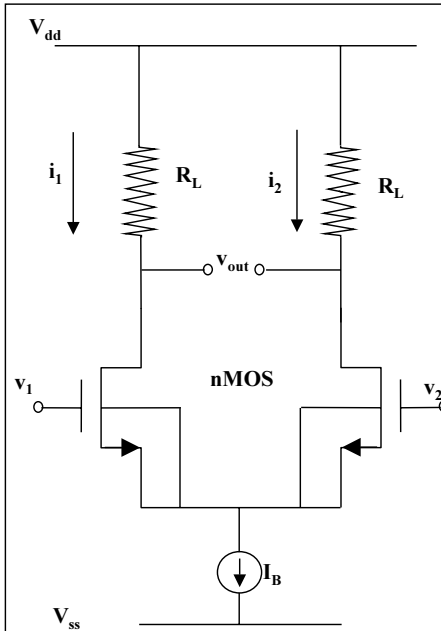
$$i_1 = K' \frac{W}{L} (V_{GS_1} - V_T)^2$$

$$i_2 = K' \frac{W}{L} (V_{GS_2} - V_T)^2$$

$$I_B = i_1 + i_2$$

$$V_{in} = V_{GS_1} - V_{GS_2}$$

$$V_{out} = R_L (i_1 - i_2)$$



Verschil trap: uitwerking

$$V_{out} = R_L(i_1 - i_2) = R_L \Delta i$$

$$i_1 = \frac{I_B + \Delta i}{2} = \frac{I_B}{2} \left(1 + \frac{\Delta i}{I_B} \right) = \frac{I_B}{2} (1 + y)$$

$$i_2 = \frac{I_B - \Delta i}{2} = \frac{I_B}{2} \left(1 - \frac{\Delta i}{I_B} \right) = \frac{I_B}{2} (1 - y)$$

$$V_{GS1} = V_T + \sqrt{\frac{i_1}{K' \frac{W}{L}}} = V_T + \sqrt{\frac{I_B}{2K' \frac{W}{L}}} \sqrt{1 + y}$$

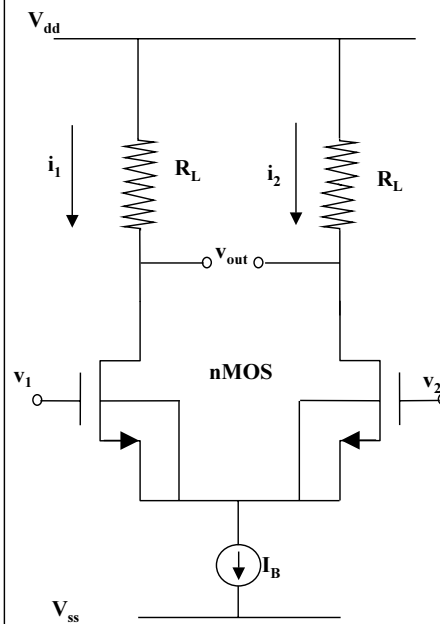
$$V_{GS2} = V_T + \sqrt{\frac{i_2}{K' \frac{W}{L}}} = V_T + \sqrt{\frac{I_B}{2K' \frac{W}{L}}} \sqrt{1 - y}$$

$$V_{in} = V_{GS1} - V_{GS2} = \sqrt{\frac{I_B}{2K' \frac{W}{L}}} (\sqrt{1 + y} - \sqrt{1 - y})$$

$$x = \sqrt{1 + y} - \sqrt{1 - y}$$

$$y = x \sqrt{1 - \frac{x^2}{4}}$$

$$x = \sqrt{\frac{2K' \frac{W}{L}}{I_B}} V_{in}$$



Voor kleine ingangsspanningen

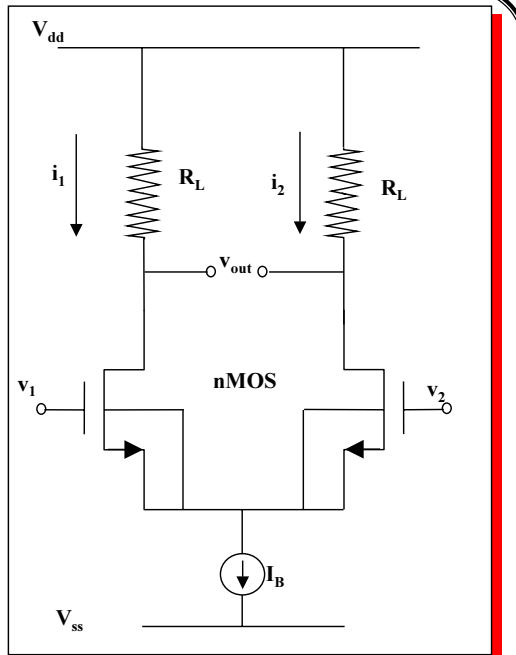
$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = -R_L \sqrt{2K' \frac{W}{L} I_B}$$

Versterking neemt toe met:

- belastingsweerstand
- transistorgrootte
- stroom

Gevolg grote versterking

- opwarming

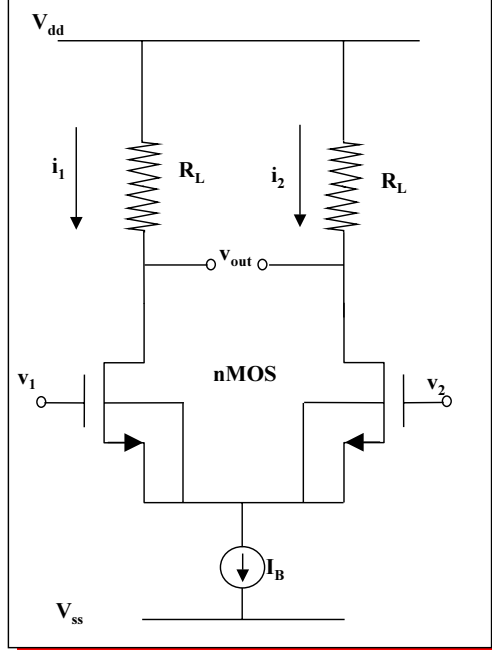
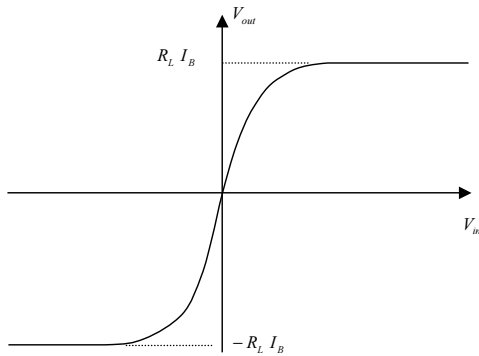


Voor grotere ingangsspanningen

$$V_{out} = R_L I_B x \sqrt{1 - \frac{x^2}{4}}$$

$$x = \sqrt{\frac{2K' \frac{W}{L}}{I_B}} V_{in}$$

Versterking is beperkt tot het moment dat alle stroom door één transistor loopt



Oefening

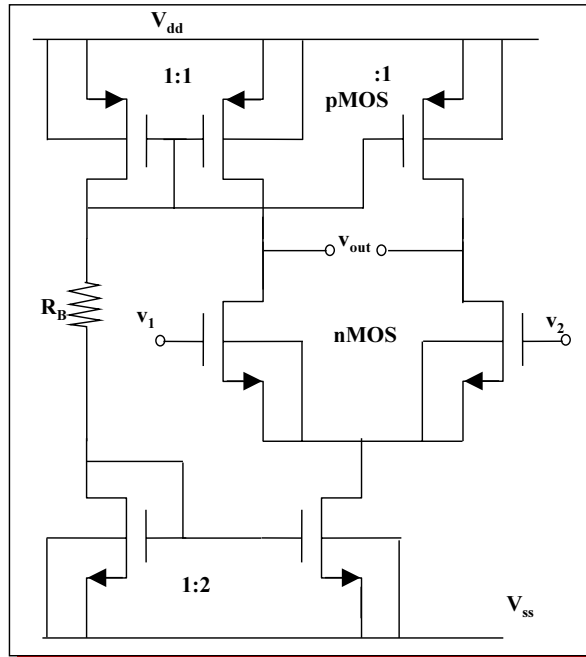
Ontwerp een verschilversterker met de volgende technologische parameters

- » $V_T = 1 \text{ V}$
- » $K' = 40 \mu\text{A/V}^2$
- » minimale dimensie $0.5 \mu\text{m}$
- » $V_{dd} = 5 \text{ V}; V_{ss} = -5 \text{ V}$

Haal een versterking van 1000.

Verschilversterker met actieve belasting

- De actieve belasting vereist dat deze transistors zo aangedreven worden dat ze ook de stroom $I_B/2$ leveren
- R_B laat toe de stroom I_B te bepalen

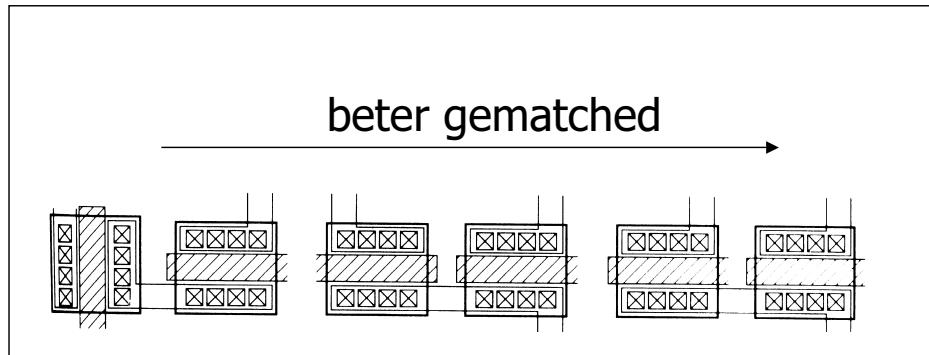


Ontwerp voor lage offset en drift: basisregels (1)

- **“match” enkel maar devices van gelijke natuur**
- **Plaats devices die moeten gematched worden op gelijke temperatuur**
 - Bepaal de isothermen (lijnen van gelijke temperatuur) op basis van de power devices op de IC
- **Devices met een iets grotere size kunnen beter gematched worden**
- **Plaats de structuren op minimale afstand van elkaar**

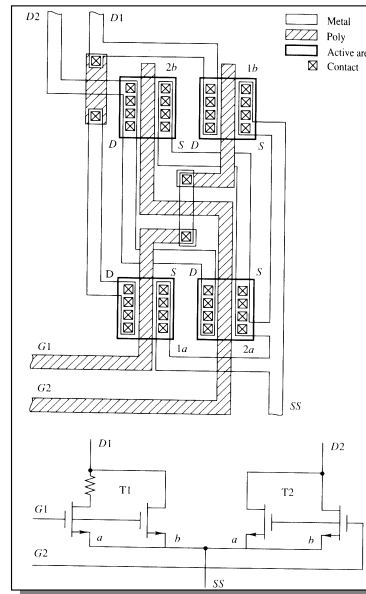
Ontwerp voor lage offset en drift: basisregels (2)

- Plaats de transistors in dezelfde richting ten opzichte van het silicium kristal
 - De mobiliteit is lichtjes afhankelijk van de richting in Silicium



Ontwerpen voor lage offset en drift: basisregels (3)

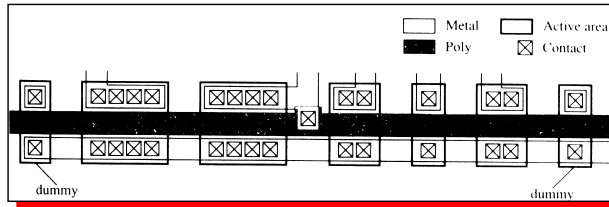
- **De structuren moeten eenzelfde omtrek tot oppervlakte ratio hebben**
- **Ronde devices matchen beter dan rechthoekige**
 - Vooral belangrijk voor laterale pnp transistors
 - Ronde devices zijn niet vaak toegelaten door ontwerp tools
- **Gebruik de centroid layout om structuren te matchen**
 - zwaartepunt van het geheel stemt overeen



Ontwerpen voor lage offset en drift: basisregels (4)

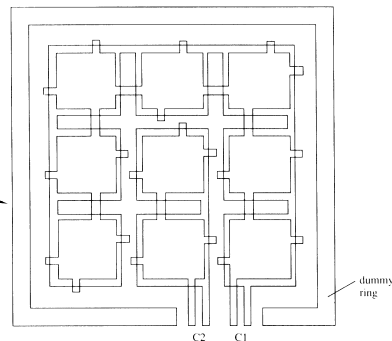
• **Voeg dummy devices toe aan een serie**

– serie transistors van een stroomspiegel 4:4:2:1:2 met dummies



– ring rond een weerstand of capaciteits bank

2 capaciteiten in een verhouding 7:2 met dezelfde omtrek met dezelfde zwaartepunt met een ring er rond



Ontwerpen voor lage offset en drift: basisregels (5)

- **Bipolaire transistors matchen beter dan MOS transistors**
- **soms is trimming nodig**
 - trimming gebeurt altijd individueel en is dus duur
 - » laser trimming van een belastingsweerstand
 - » zappen van diodes in parallel met een belastingsweerstand
 - » opblazen van Aluminium zekeringen

Ontwerpen voor lage offset en drift: opmerkingen

- **Vele van deze regels kunnen niet gebruikt worden met discrete componenten. Een ontwerp op IC kan tot een veel lagere offset komen dan een ontwerp met discrete componenten**