

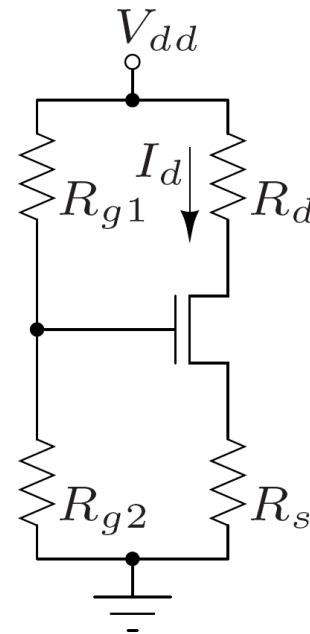
# Polarização dos MOSFETs

## Amplificador source-comum

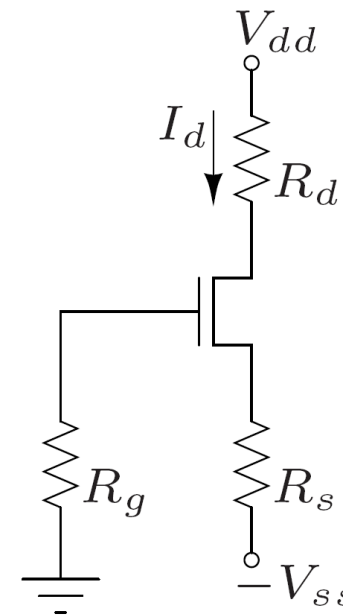
Gerardo Rocha

# Polarização dos MOSFETs

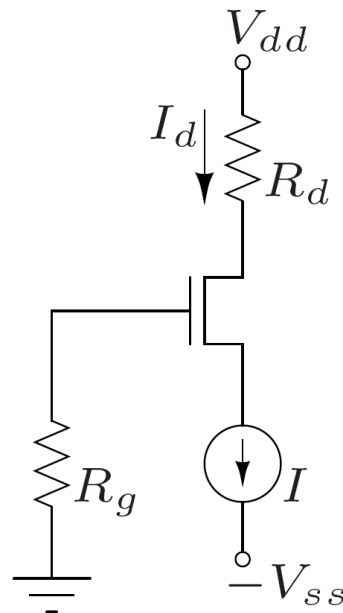
- (a) Polarização com tensão fixa na gate.
- (b) Versão simplificada do anterior quando existem duas fontes de tensão.
- (c) Com fonte de corrente na source.
- (d) Source comum com realimentação negativa.



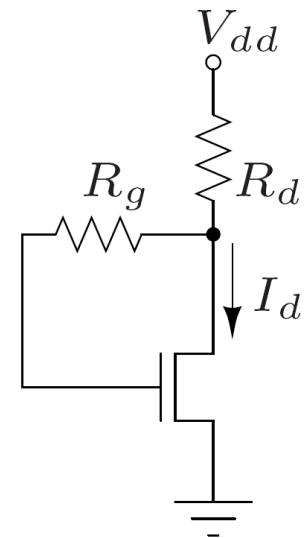
(a)



(b)



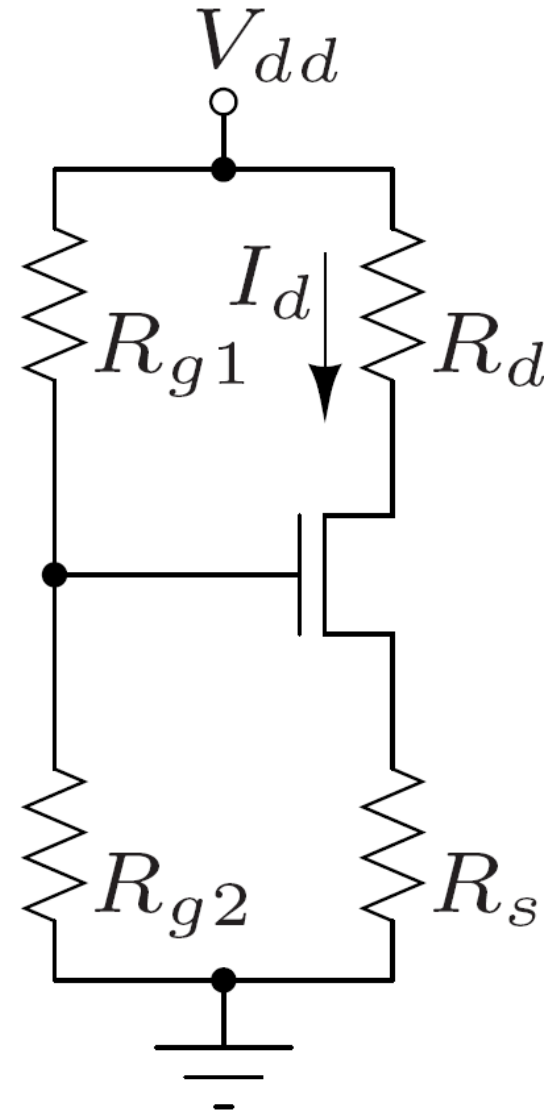
(c)



(d)

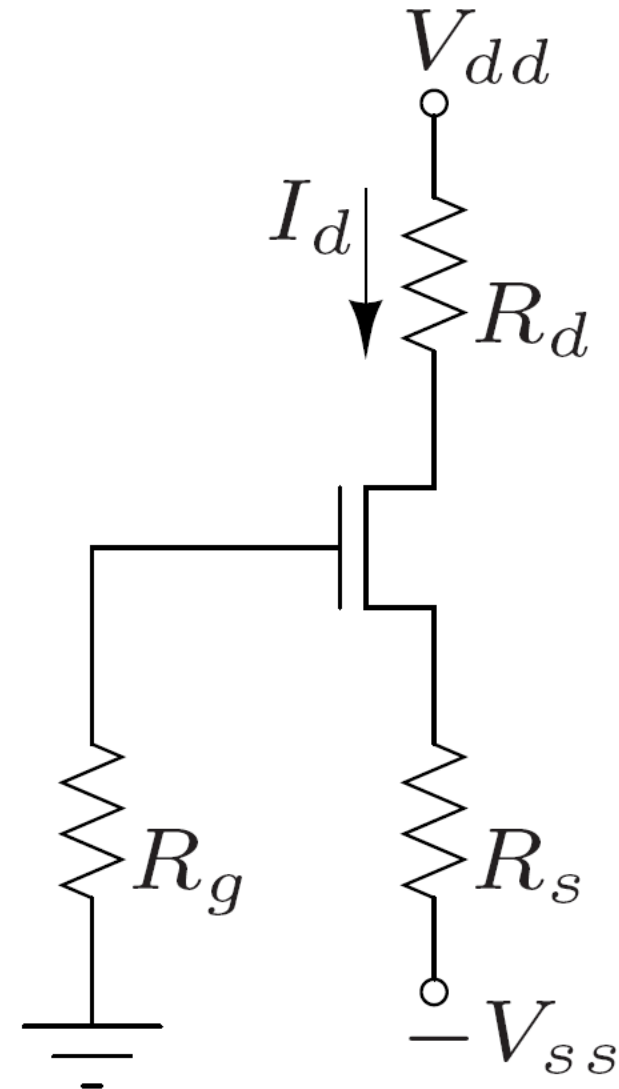
# Polarização dos MOSFETs

- O divisor de tensão  $R_{g1}$   $R_{g2}$  estabelece uma tensão fixa na gate.
- Uma resistência de auto-polarização é ligada à source.
- Como  $I_g = 0$ , as resistências  $R_{g1}$  e  $R_{g2}$  podem ser escolhidas na gama dos  $M\Omega$  permitindo uma impedância de entrada da montagem muito alta.
- Esta é uma vantagem dos amplificadores com MOSFETs em relação aos que usam transístores bipolares.
- A resistência  $R_s$  estabelece uma realimentação negativa. Ajuda na estabilização de  $I_d$ .
- $R_d$  é seleccionada de modo a que a montagem tenha um ganho elevado e permita a excursão máxima do sinal na região de saturação.



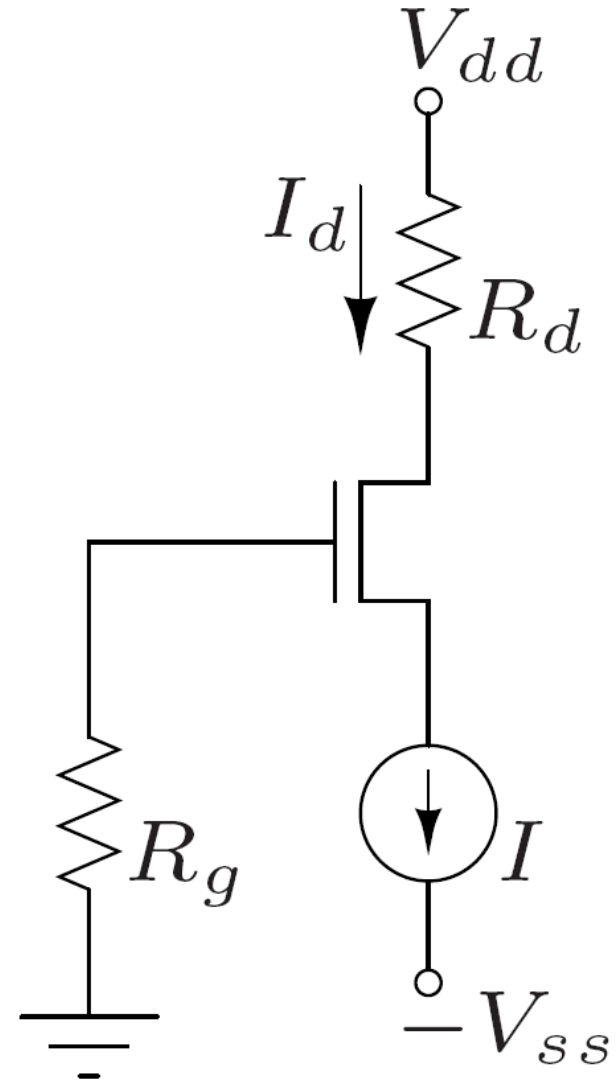
# Polarização dos MOSFETs

- Quando existe uma fonte de alimentação simétrica, pode ser utilizada a montagem da figura.
- Este circuito é baseado no anterior.
- A resistência  $R_g$  estabelece uma tensão nula na gate e ao mesmo tempo uma impedância de entrada elevada quando a fonte de sinal é ligada à gate através de um condensador.



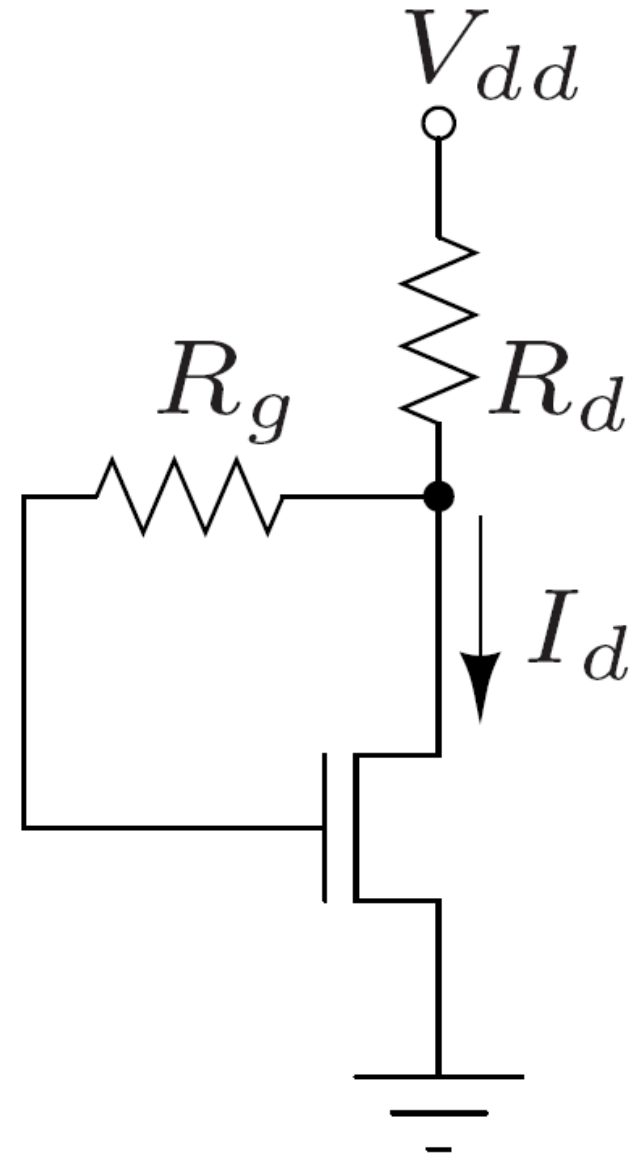
# Polarização dos MOSFETs

- Uma montagem muito simples é mostrada na figura.
- Aqui, o terminal da source é alimentado por uma fonte de corrente constante  $I$ , fazendo com que  $I_d$  seja constante e igual a  $I$ .
- As resistências  $R_g$  e  $R_d$  servem para o mesmo fim que nos dois circuitos anteriores.



# Polarização dos MOSFETs

- O circuito da figura usa uma resistência de realimentação alta que força a tensão contínua da gate a ser igual à do drain.
- O sinal de entrada pode ser ligado através dum condensador à gate e o de saída é tomado do drain, resultando numa configuração amplificadora source comum.
- Nesta montagem, a excursão negativa do sinal é limitada por  $V_t$ .
- A tensão de drain não pode descer abaixo de  $V_{gs} - V_t$ , pois isso faria com que o dispositivo deixasse a região de saturação.



# Polarização em integrados

- Os circuitos anteriores não são viáveis em circuitos integrados amplificadores.
- Isto deve-se ao facto de usarem muitas resistências.
- No projeto de circuitos integrados MOS o uso de resistências é muito desencorajado, já que uma resistência, mesmo com valor baixo requer uma área significativa do chip, o que é considerado caro em termos de preço de fabrico.
- As resistências apresentam valores de tolerâncias muito altos.
- Um MOSFET pode ser fabricado numa área muito pequena do chip e os seus parâmetros são relativamente bem controlados.

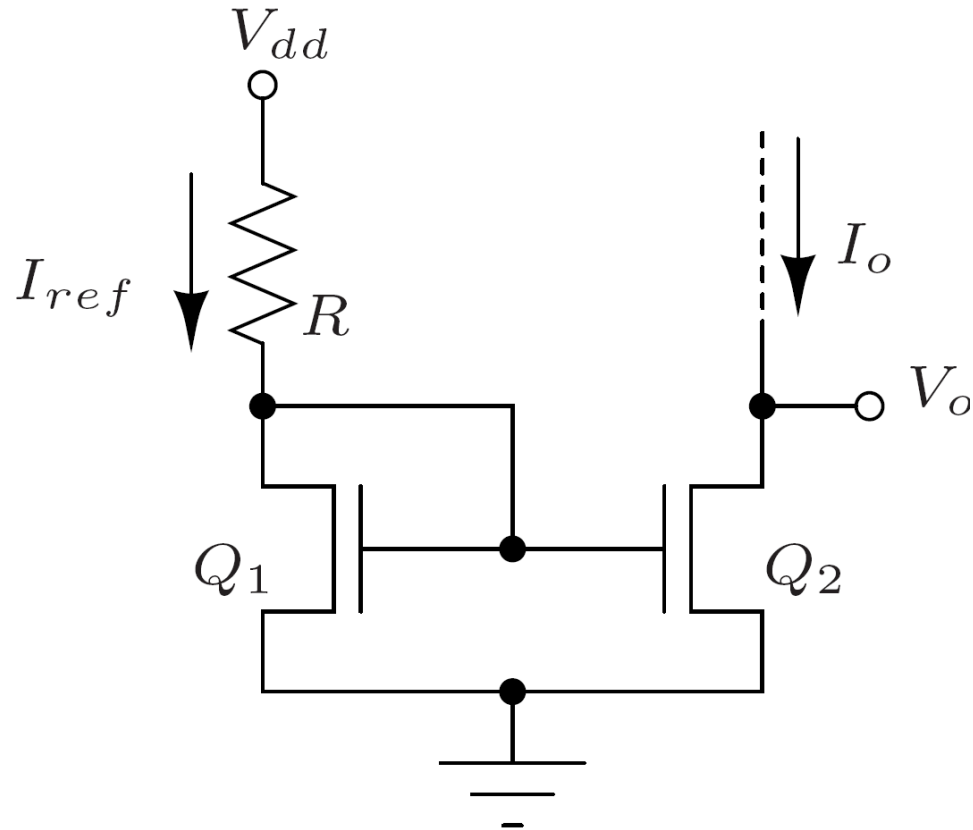
# Polarização em integrados

- A filosofia num projeto de circuito integrado é minimizar o número e o valor das resistências e sempre que possível, substituí-las por transístores.
- Outra razão pela qual as montagens anteriores não são viáveis na construção de circuitos integrados é o facto de os sinais de entrada e de saída serem acoplados capacitivamente.
- Também são necessários condensadores de derivação.
- Apesar de ser possível fabricar condensadores num circuito integrado, devido ao facto de existirem limitações em termos de espaço, o valor destes não ultrapassa os picofarads.
- Isto limita muito o uso de condensadores de acoplamento e de derivação.



# Fontes de corrente com MOSFETs

- Normalmente, a polarização de amplificadores MOS utiliza fontes de corrente constantes.
- Normalmente é criada uma fonte de corrente que depois é replicada ao longo do circuito, através de espelhos de corrente, fornecendo a polarização a todos os estágios do amplificador.



# Fontes de corrente com MOSFETs

- O funcionamento do circuito baseia-se no transistor Q1 cujo drain é curto-circuitado com a gate, o que faz com que ele funcione na região de saturação:

$$I_{d1} = \frac{1}{2} k'_n \frac{W_1}{L_1} (V_{gs} - V_t)^2$$

foi desprezada a modulação do comprimento do canal ( $\lambda = 0$ ).

- A corrente de drain de Q1 é fornecida por Vdd através de R (que em alguns casos é colocado fora do chip).
- Como as correntes de gate são nulas:

$$I_{d1} = I_{ref} = \frac{V_{dd} - V_{gs}}{R}$$

em que a corrente através de R é considerada a corrente de referência e é denotada de Iref .

- Dados os parâmetros de Q1 e o valor da corrente Iref desejada, as equações do MOSFET na região de saturação podem ser usadas para determinar o valor de R.

# Fontes de corrente com MOSFETs

- Considere-se agora o transístor Q2.
- Tem a mesma tensão  $V_{gs}$  que Q1, o que, se for assumido que está na saturação, a sua corrente de drain, que é igual à corrente de saída  $I_o$ , é dada por

$$I_o = I_{d2} = \frac{1}{2} k'_n \frac{W_2}{L_2} (V_{gs} - V_t)^2$$

Despreza-se o efeito da modulação do comprimento do canal.

- A partir das equações de  $I_d \times V_{gs}$  se os dois transístores tiverem os mesmos parâmetros de fabrico (por fazerem parte do mesmo chip, por exemplo) pode relacionar-se a corrente de saída com a de entrada do seguinte modo:

$$\frac{I_o}{I_{ref}} = \frac{(W_2/L_2)}{(W_1/L_1)}$$

- Depois de tantas equações complicadas, aqui está uma simples e atrativa!

# Fontes de corrente com MOSFETs

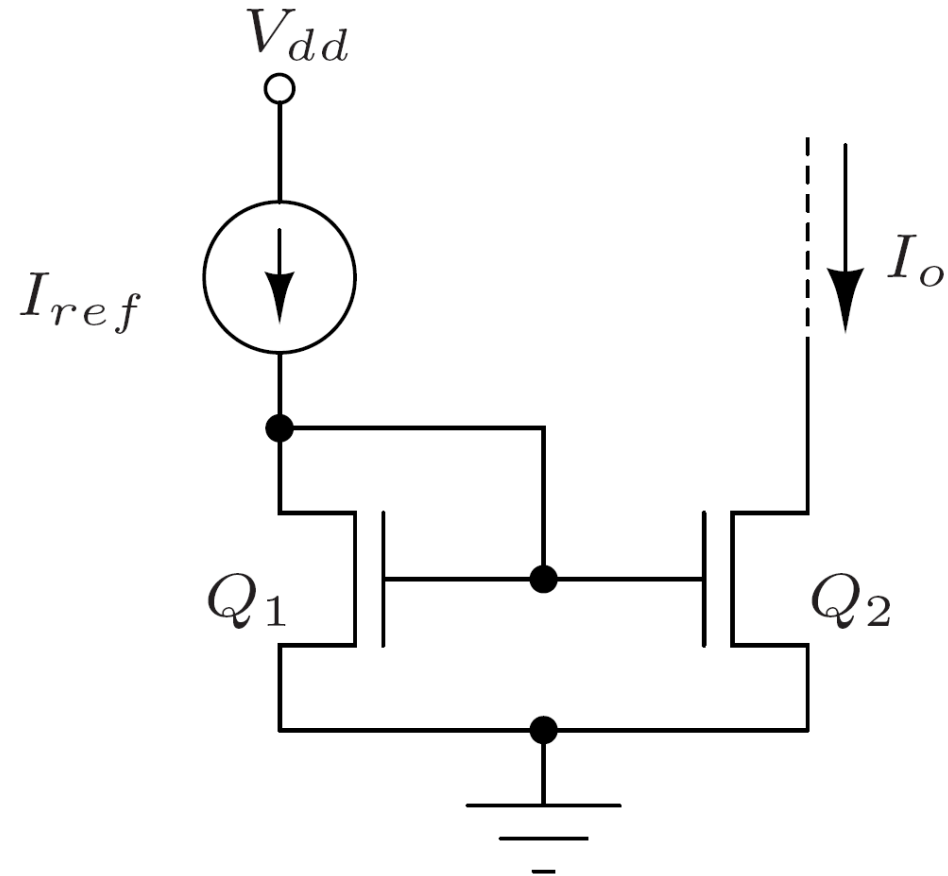
- A corrente de saída  $I_o$  está relacionada com a corrente de referência  $I_{ref}$  pela razão entre os comprimentos e as larguras dos canais dos transístores, ou seja, a relação entre  $I_o$  e  $I_{ref}$  é determinada apenas pela geometria dos transístores, que se forem iguais,  $I_o = I_{ref}$  e o circuito apenas replica o valor de  $I_{ref}$ , ou seja, funciona como um espelho de corrente.
- O nome de espelho de corrente também é usado no caso mais geral de os transístores terem dimensões diferentes.

# Espelho de corrente

- O ganho em corrente do espelho é dado pela equação:

$$\frac{I_o}{I_{ref}} = \frac{(W_2/L_2)}{(W_1/L_1)}$$

- Os espelhos de corrente são os blocos mais básicos que constituem um amplificador integrado.



# Efeito de $V_o$ em $I_o$

- Na descrição da fonte de corrente anterior, assume-se que Q2 está na região de saturação.
- Isto é obviamente essencial já que se pretende uma corrente constante.
- Para garantir que Q2 está saturado, o circuito onde ele estiver ligado deve estabelecer uma tensão de drain que satisfaça a relação:

$$V_o \geq V_{gs} - V_t$$

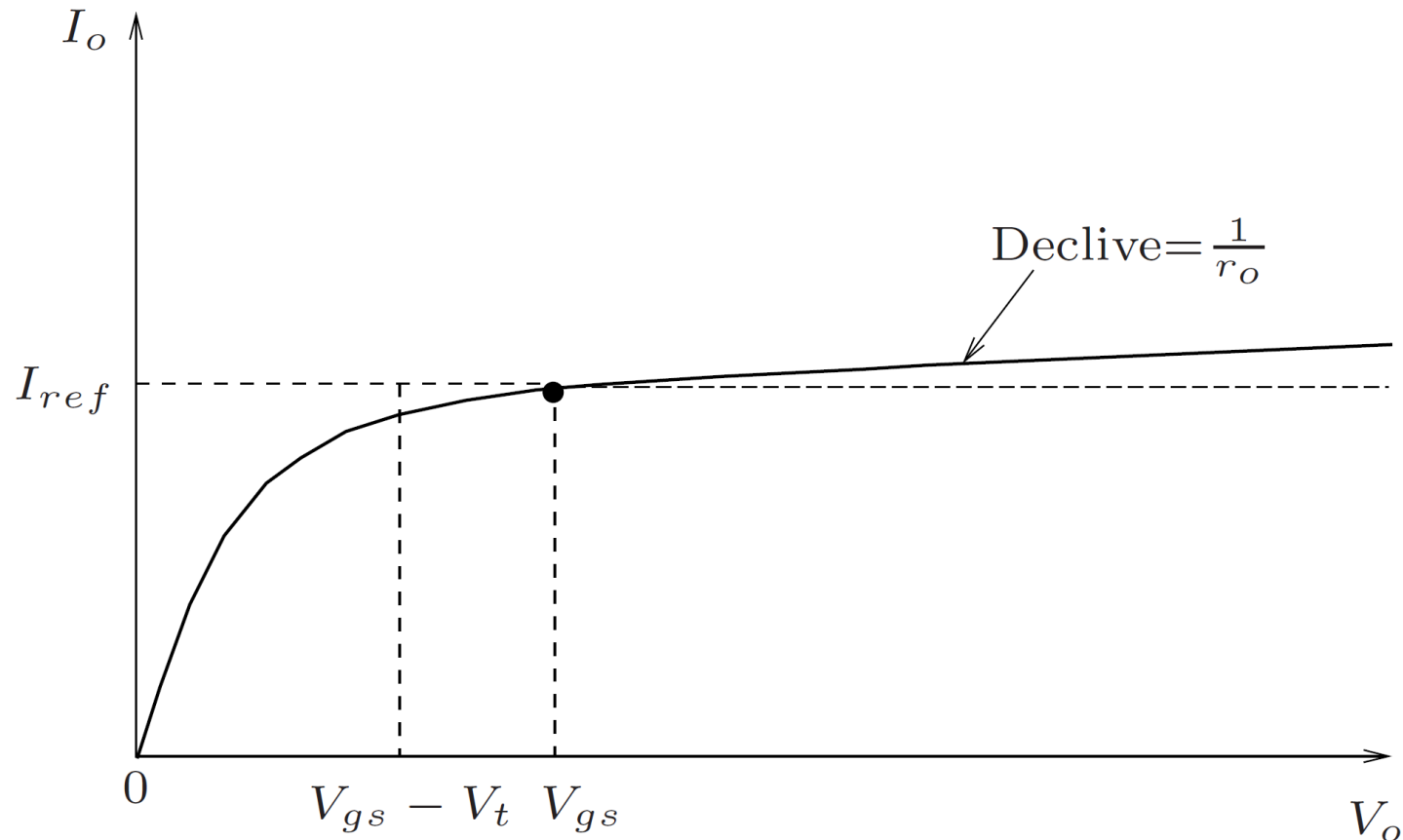
- Por outras palavras, a fonte de corrente só funcionará corretamente para tensões de saída  $V_o$  que não desçam  $V_t$  volts abaixo de  $V_{gs}$ .

# Efeito de $V_o$ em $I_o$

- Apesar de ter sido desprezada, a modulação do comprimento do canal pode ter um efeito significativo na operação da fonte de corrente.
- Considere-se por simplicidade o caso de Q1 e Q2 serem dispositivos idênticos.
- A corrente de drain de Q2,  $I_o$ , será igual à corrente de Q1,  $I_{ref}$ , somente no caso em que  $V_o$  é igual à tensão  $V_{ds}$  do primeiro transistor, ou seja,  $V_o = V_{gs}$ .
- Se  $V_o$  aumentar,  $I_o$  também aumenta devido à resistência de saída  $r_o$  de Q2.

# Efeito de $V_o$ em $I_o$

- A figura, que mostra o valor de  $I_o$  em função de  $V_o$ .
- Uma vez que Q2 está a funcionar com um  $V_{gs}$  constante, a curva da figura é simplesmente uma das curvas características  $I_d \times V_{ds}$  do transístor, para este  $v_{gs}$  em particular.





# Efeito de $V_o$ em $I_o$

- Como conclusão, pode dizer-se que a fonte de corrente e o espelho da figura têm uma resistência de saída  $R_o$  finita, que é dada por:

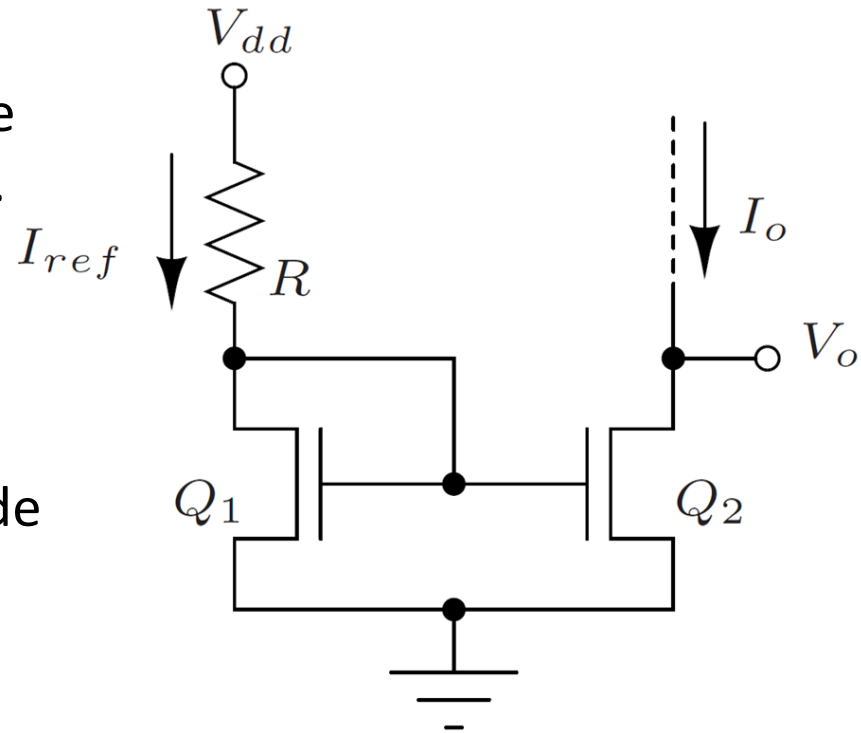
$$R_o = \frac{\Delta V_o}{\Delta I_o} = r_{o2} = \frac{V_{A2}}{I_o}$$

em que  $V_{A2}$  é a tensão de Early de Q2.

- Convém lembrar que  $V_A$  é proporcional ao comprimento do canal do transistor, portanto, para se obterem valores de resistências de saída altos, as fontes de corrente são normalmente projetadas com transístores com canais compridos.

# Efeito de $V_o$ em $I_o$

Exemplo: Para  $V_{dd} = 5\text{ V}$  e  $I_{ref} = 100\text{ }\mu\text{A}$ , pretende projetar-se uma fonte de corrente como a da figura, para obter uma corrente de saída de  $100\text{ }\mu\text{A}$ . Os transístores têm  $10\text{ }\mu\text{m}$  de comprimento e  $100\text{ }\mu\text{m}$  de largura,  $V_t = 1\text{ V}$  e  $k_n' = 20\text{ }\mu\text{A/V}$ . Qual é o menor valor possível para  $V_o$ ? Se a tensão de Early for de  $100\text{ V}$ , qual é a resistência de saída da fonte de corrente? Qual é a variação provocada na corrente de saída por um aumento de  $1\text{ V}$  em  $V_o$ ?



# Efeito de $V_o$ em $I_o$

$$I_{d1} = I_{ref} = \frac{1}{2} \times 20\mu \times \frac{100\mu}{10\mu} (V_{gs} - 1)^2 = 100\mu \Leftrightarrow$$

$$V_{gs} = 2 V$$

$$R = \frac{5 - 2}{100\mu} = 30 k\Omega$$

$$V_{o_{min}} = V_{gs} - V_t = 1 V$$

$$r_o = \frac{V_A}{I_d} = \frac{100}{100\mu} = 1 M\Omega$$

A corrente de saída será de  $100 \mu A$  para  $V_o = V_{gs} = 2 V$ . Se  $V_o$  aumentar  $1 V$ , o valor de  $I_o$  será de:

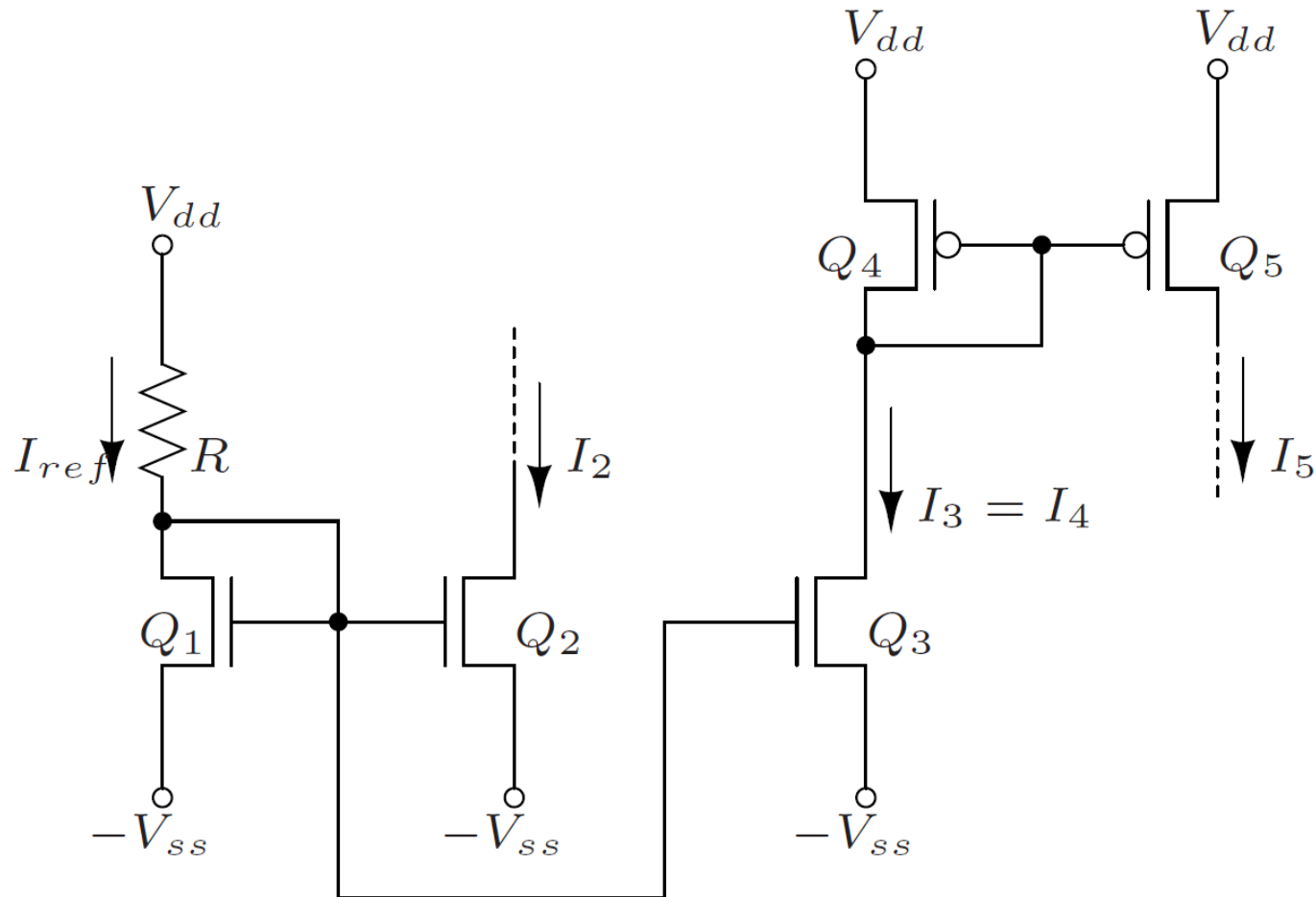
$$\Delta I_o = \frac{\Delta V_o}{r_o} = \frac{1}{1M} = 1 \mu A$$

# Circuitos de replicação de corrente

- Como foi mencionado anteriormente, uma fonte de corrente pode ser replicada para fornecer a corrente contínua de polarização necessária aos vários estágios de um amplificador.
- Obviamente que esta replicação é feita à base de espelhos de corrente.

# Circuitos de replicação de corrente

- A figura mostra um circuito replicador simples.



# Circuitos de replicação de corrente

- O transistor Q1 e a resistência R determinam a corrente de referência  $I_{ref}$ .
  - Os transistores Q2 e Q3 funcionam como espelhos de corrente, fazendo com que:
- $$I_2 = I_{ref} \frac{(W_2/L_2)}{(W_1/L_1)}$$
- $$I_3 = I_{ref} \frac{(W_3/L_3)}{(W_1/L_1)}$$

- As tensões dos drains de Q2 e Q3 estão limitadas por:

$$V_{d2} > -V_{ss} + V_{gs1} - V_{tn}$$

$$V_{d3} > -V_{ss} + V_{gs1} - V_{tn}$$

onde  $V_{tn}$  é a tensão de threshold dos dispositivos de canal n.

- Estes valores limite normalmente significam que as tensões  $V_{d2}$  e  $V_{d3}$  devem estar cerca de um ou dois volts acima de  $-V_{ss}$ .

# Circuitos de replicação de corrente

- A corrente  $I_3$  alimenta a entrada de outro espelho de corrente formado pelos dispositivos de canal p, Q4 e Q5. Este espelho fornece:

$$I_5 = I_4 \frac{(W_5/L_5)}{(W_4/L_4)}$$

onde  $I_4 = I_3$ .

- Para manter Q5 na saturação, a sua tensão de drain está limitada por:

$$V_{d5} < V_{dd} - V_{sg5} + V_{tp}$$

em que  $V_{tp}$  é a tensão de threshold dos dispositivos de canal p.

- Finalmente, um ponto importante a salientar é que enquanto Q2 “puxa” a corrente da sua saída da carga, Q5 “empurra” a sua corrente para a carga.
- Portanto Q5 funciona como fonte fornecedora de corrente, enquanto Q2 funciona como fonte absorvedora de corrente.

# Circuitos de replicação de corrente

- **Conclusão:**

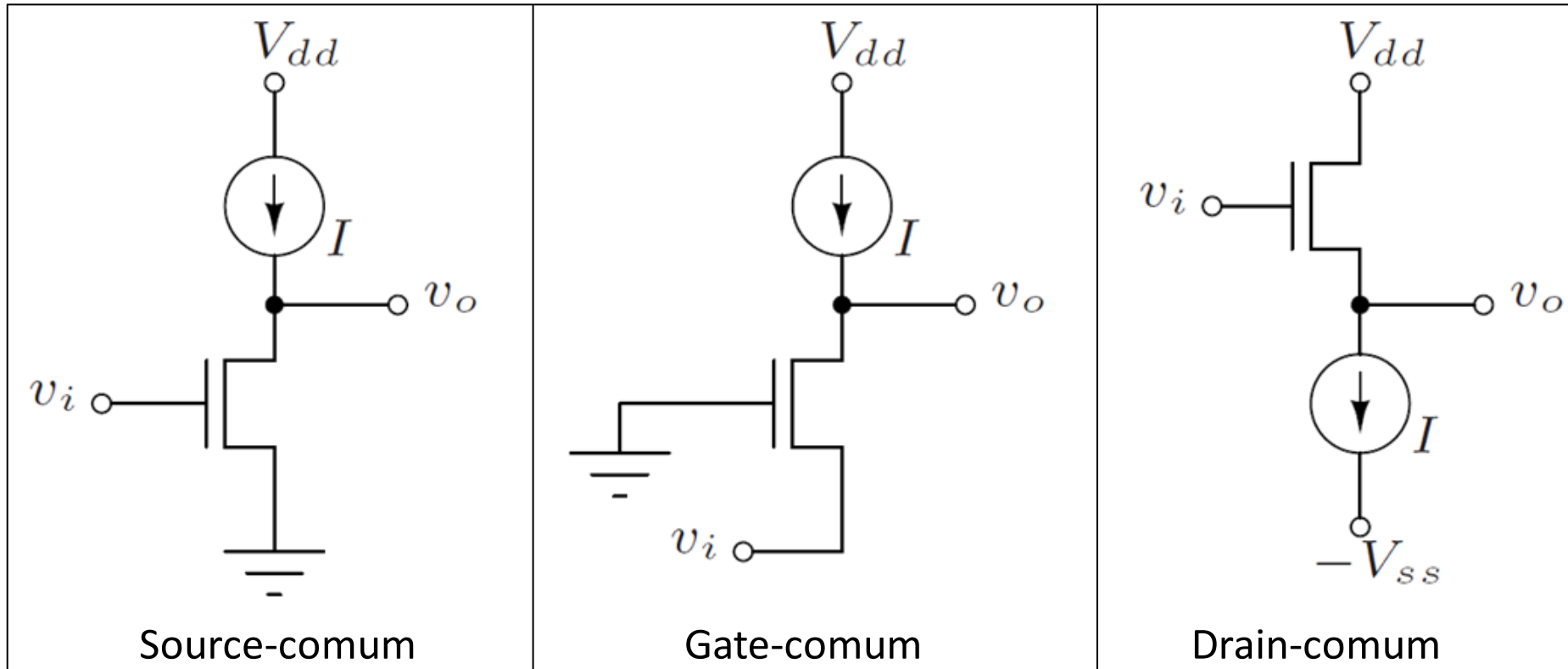
Num circuito integrado, tanto as fontes fornecedoras como as absorvedoras de corrente são necessárias, logo há uma necessidade de ter lado a lado transístores NMOS com PMOS, o que faz com que a tecnologia mais conveniente para este tipo de projetos seja a CMOS.



# Configurações amplificadoras básicas

- Os circuitos considerados aqui seguem a filosofia de projeto de circuitos integrados discutida na secção anterior, nomeadamente, a utilização de componentes ativos na implementação de praticamente todos os elementos do circuito.
- Anteriormente eram usadas fontes de corrente para polarizar o MOSFET.
- Aqui irá avançar-se mais um passo e empregar fontes de corrente em vez das resistências de carga.
- Os amplificadores resultantes são chamados de carga ativa, em contraste direto com as cargas passivas implementadas com resistências.

# Configurações amplificadoras básicas

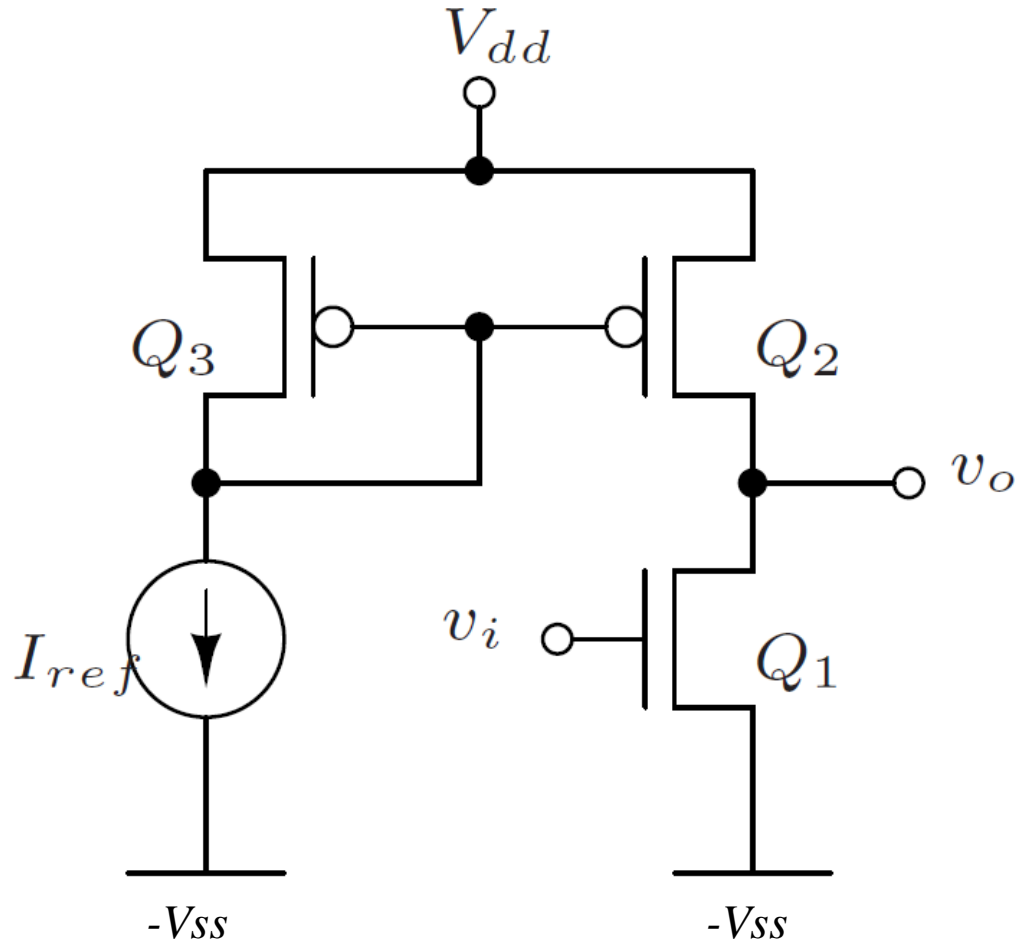


- As fontes de corrente são implementadas com os circuitos descritos anteriormente.
- Para as montagens source-comum e gate-comum é necessária uma versão PMOS da fonte de corrente, enquanto que para a drain-comum é usada uma fonte com transístores NMOS.

# Configurações amplificadoras básicas

- Daqui se conclui que na implementação dos circuitos amplificadores básicos são necessários tanto os MOSFETs de canal n como os de canal p, ou seja, é necessária a tecnologia CMOS.
- Atualmente a tecnologia CMOS é a mais popular tanto em projetos de eletrônica analógica como digital.

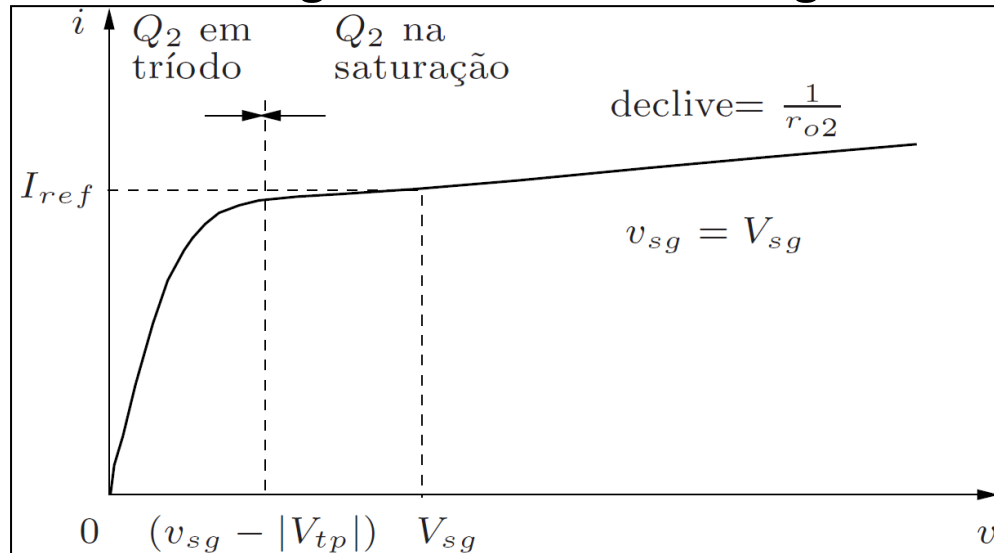
# O amplificador source-comum



Este circuito tem uma fonte de corrente que forma a carga implementada com o transístor  $Q_2$  que é o transístor de saída do espelho de corrente formado por  $Q_2$  e  $Q_3$ , alimentado por  $I_{ref}$ .

# O amplificador source-comum

- Aqui assume-se que os transístores Q2 e Q3 são iguais e a característica  $I \times V$  do dispositivo de carga é a mostrada na figura.



- Esta é simplesmente a característica  $i_d \times v_{sd}$  do MOSFET de canal p para uma tensão source-gate constante.
- O valor de  $V_{sg}$  é obtido fazendo-se passar a corrente de referência  $I_{ref}$  através de Q3.
- Pode observar-se que Q2 comporta-se como uma fonte de corrente quando funciona na região de saturação, que é obtida quando  $v = v_{sd}$  é maior do que  $(V_{sg} - |V_{tp}|)$ .

# O amplificador source-comum

- Quando  $Q_2$  está na saturação apresenta uma resistência  $r_{o2}$  que é dada por:

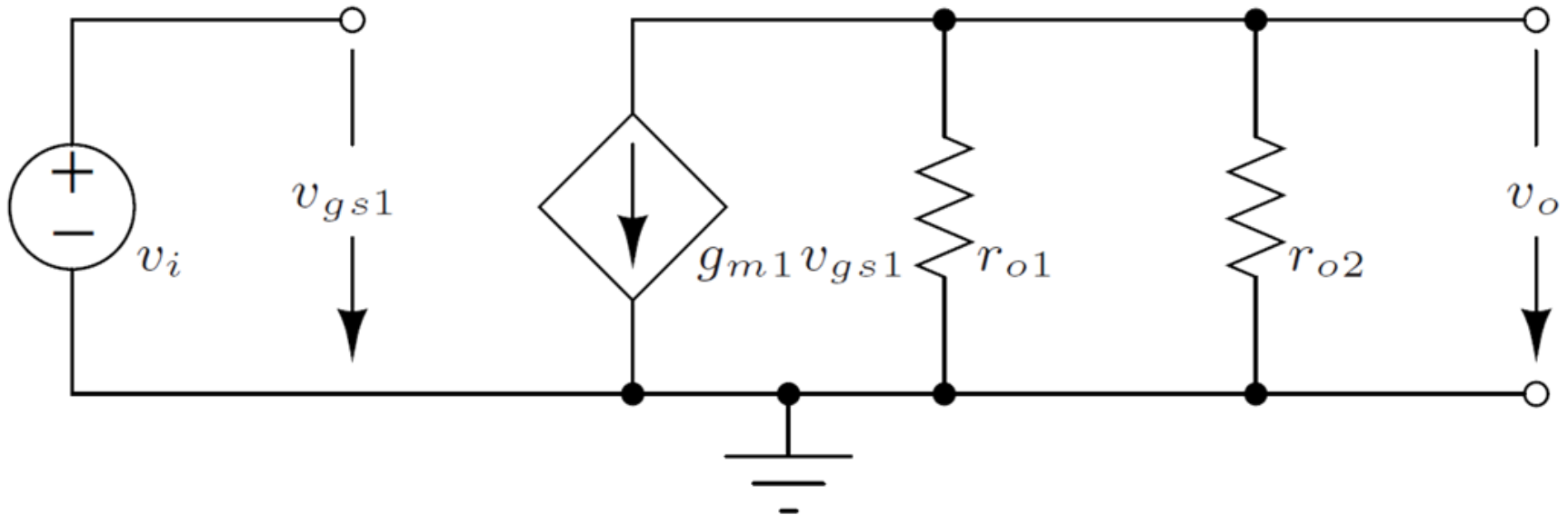
$$r_{o2} = \frac{|V_{A2}|}{I_{ref}}$$

em que  $V_{A2} = 1/\lambda_2$  é a tensão de Early do transistor  $Q_2$ .

- Por outras palavras, a fonte de corrente não é ideal, mas apresenta uma resistência de saída finita e igual a  $r_{o2}$ .

# O amplificador source-comum

- Modelo equivalente para pequenos sinais do amplificador source-comum CMOS.



- A partir do circuito equivalente obtém-se o seguinte ganho em tensão:

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = -g_{m1}(r_{o1} || r_{o2})$$

# O amplificador source-comum

- A alta resistência de carga efetiva torna as montagens com carga ativa bastante atrativas: permitem um alto ganho sem a necessidade de resistências altas no drain, que necessitariam de uma área significativa de silício num chip.
- O amplificador source-comum CMOS pode ser projetado para fornecer ganhos que normalmente variam de 20 a 100.
- Apresenta uma muito alta impedância de entrada, no entanto a sua impedância de saída também é alta.



# O amplificador source-comum

- Além disso, o amplificador source-comum apresenta mais duas propriedades interessantes:
  - O circuito não é afetado pelo efeito de corpo, uma vez que o terminal da source de Q1 está ligado ao potencial mais negativo do circuito e os terminais de source de Q2 e Q3 estão ligados ao potencial mais positivo do circuito. Por outras palavras, a tensão  $V_{sb}$  é nula em todos os transístores
  - O circuito normalmente faz parte de um amplificador com vários andares. Nesse caso, normalmente é utilizada realimentação negativa para garantir que o circuito opera sempre com os transístores na saturação.

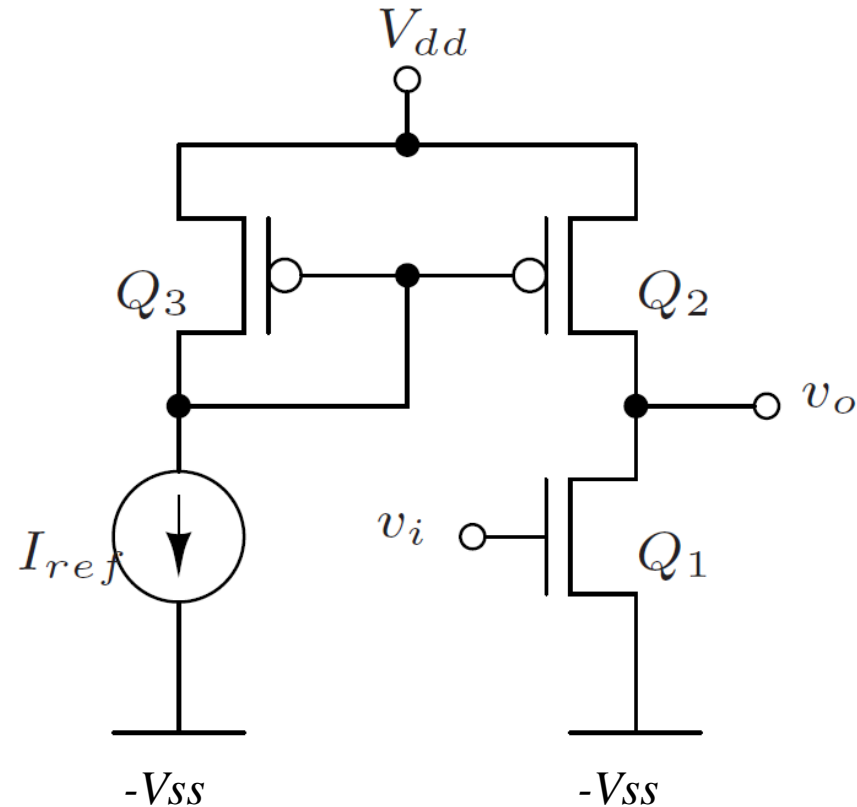
# O amplificador source-comum

- Exemplo:**

Considere o amplificador da figura em que  $V_{dd} = V_{ss} = 10\text{ V}$ ,  $V_{tn} = -V_{tp} = 1\text{ V}$ ,  $k_n' = 20\text{ }\mu\text{A/V}$ ,  $k_p' = 10\text{ }\mu\text{A/V}$ ,  $W = 100\text{ }\mu\text{m}$ ,  $L = 10\text{ }\mu\text{m}$ ,  $\lambda = 10\text{ mV}^{-1}$  para todos os transístores e  $I_{ref} = 100\text{ }\mu\text{A}$ .

Calcule o ganho da montagem para pequenos sinais.

Calcule a impedância de saída.



# O amplificador source-comum

$$\begin{aligned} g_{m1} &= \sqrt{2k'_n \frac{W_1}{L_1} I_{ref}} = \\ &= \sqrt{2 \times 20\mu \times \frac{100\mu}{10\mu} \times 100\mu} = \\ &= 200 \mu A/V. \end{aligned}$$

$$r_{o1} = r_{o2} = \frac{V_A}{I_{ref}} = \frac{1}{\lambda I_{ref}} = \frac{1}{10m \times 100\mu} = 1M\Omega$$

$$A_v = -g_{m1} (r_{o1} \parallel r_{o2})$$

$$= -0,2m \times 500k = 100$$

$$z_o = r_{o1} \parallel r_{o2} = 500k\Omega$$