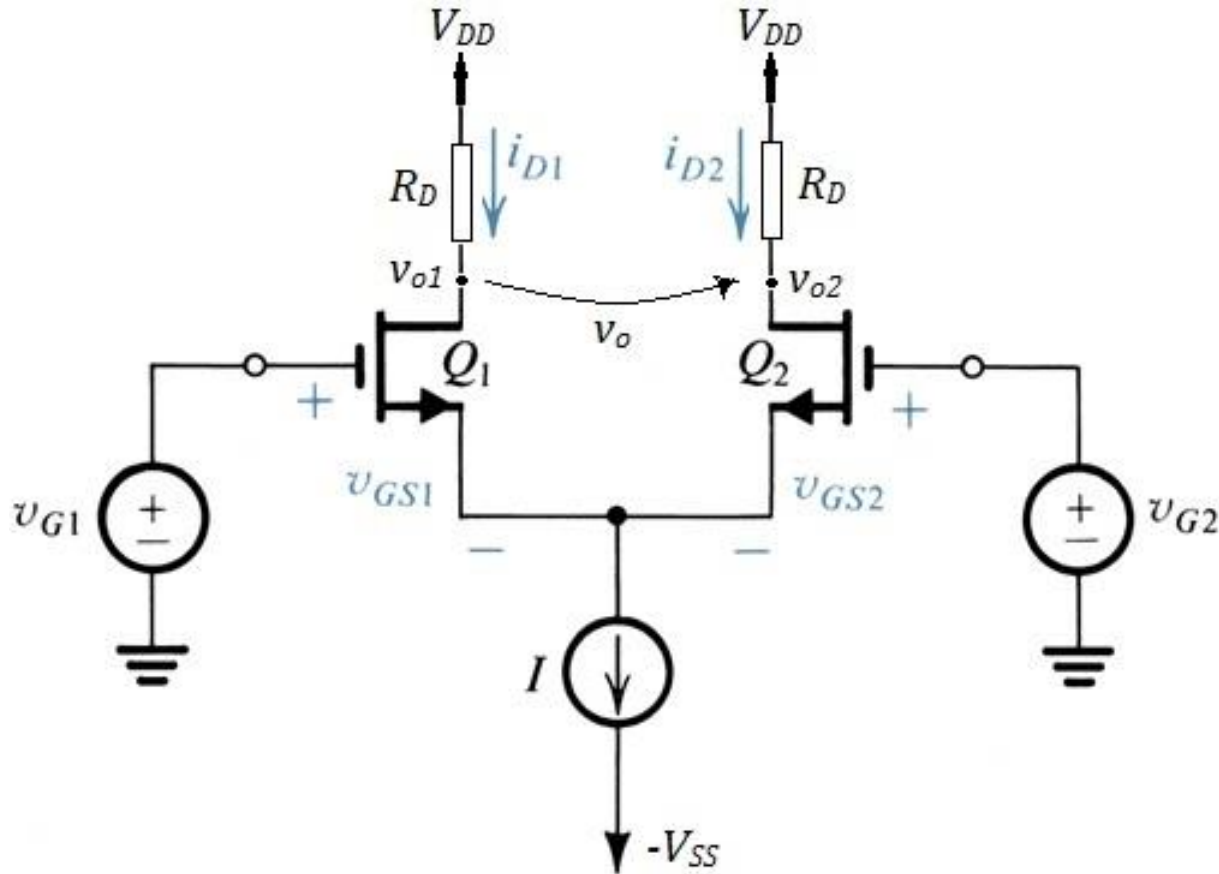


**AULA 17**



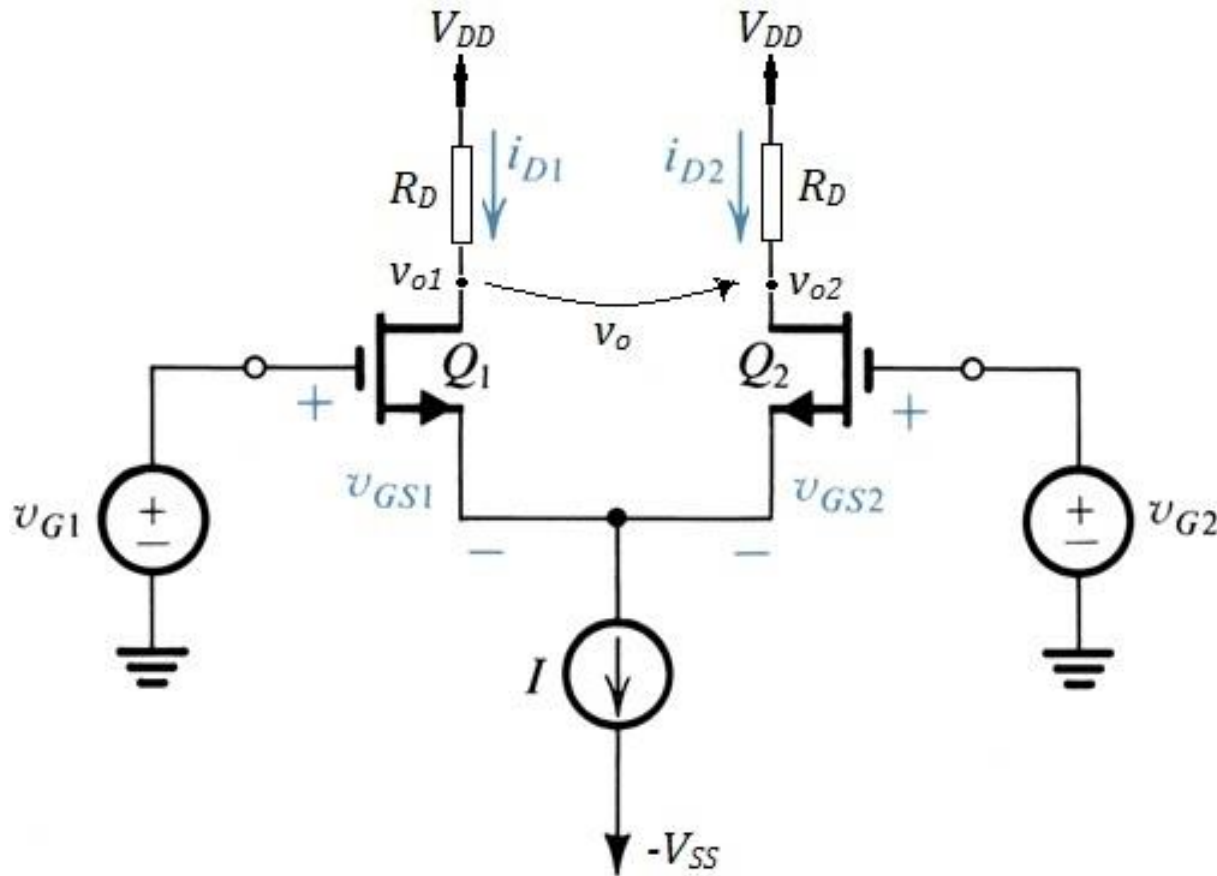
**Cap. 7: Amplificadores diferenciais com MOS: introdução, par diferencial, operação em pequenos sinais do par diferencial, ganho diferencial de tensão (p. 429-436)**

# Amplificador Diferencial



Vantagem do Amp. Dif. ?

# Amplificador Diferencial



$$v_o \propto (v_{G1} - v_{G2})$$

$$v_o = A \cdot (v_{G1} - v_{G2})$$

- Q1 e Q2 devem ser casados
- Q1 e Q2 devem estar polarizados na saturação

Vantagem do Amp. Dif. ?



Muito menos sensível a ruídos e interferência

# Amplificador Diferencial

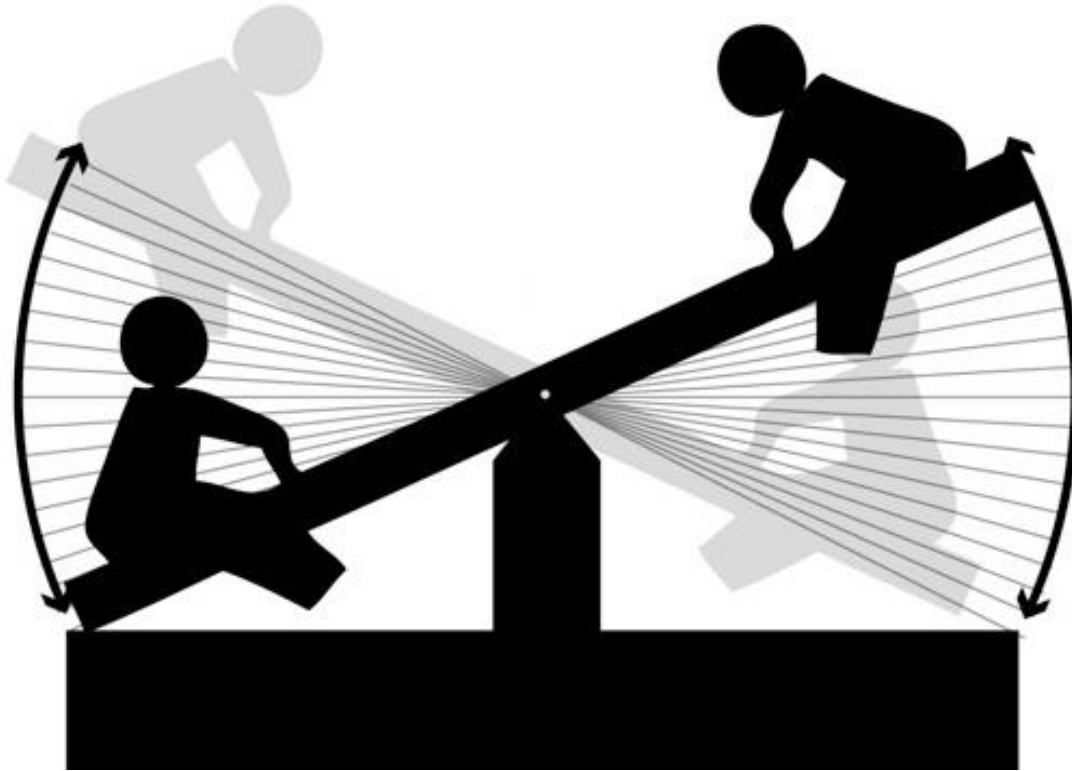
## Gangorra



# Amplificador Diferencial

## Gangorra

$$H_1 = i_{D1}$$



$$H_2 = i_{D2}$$

# NMOSFET

(modelo para grandes sinais)

- **Região de Corte:**  $v_{GS} \leq V_t$  ou  $v_{GS} - V_t \leq 0$

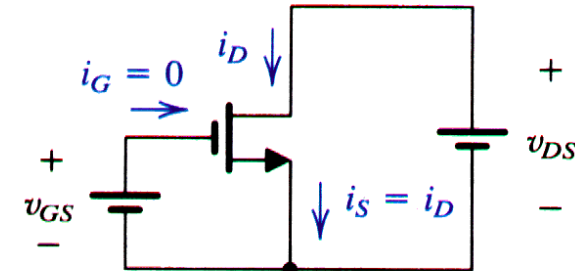
$$i_D = 0$$

- **Região Triodo:**  $0 < v_{DS} \leq v_{GS} - V_t$

$$i_D = k'_n \frac{W}{L} \left[ (v_{GS} - V_t) \cdot v_{DS} - \frac{v_{DS}^2}{2} \right]$$

- **Região de Saturação:**  $0 < v_{GS} - V_t \leq v_{DS}$

$$i_D = k'_n \frac{W}{L} \frac{(v_{GS} - V_t)^2}{2} \cdot (1 + \lambda \cdot v_{DS})$$



$$V_t > 0$$

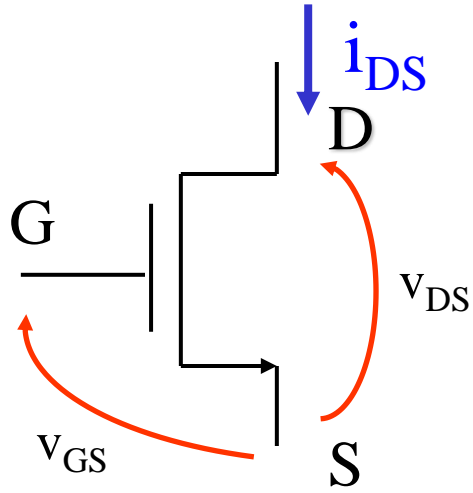
$$V_{GS} > 0$$

$$V_{DS} > 0$$

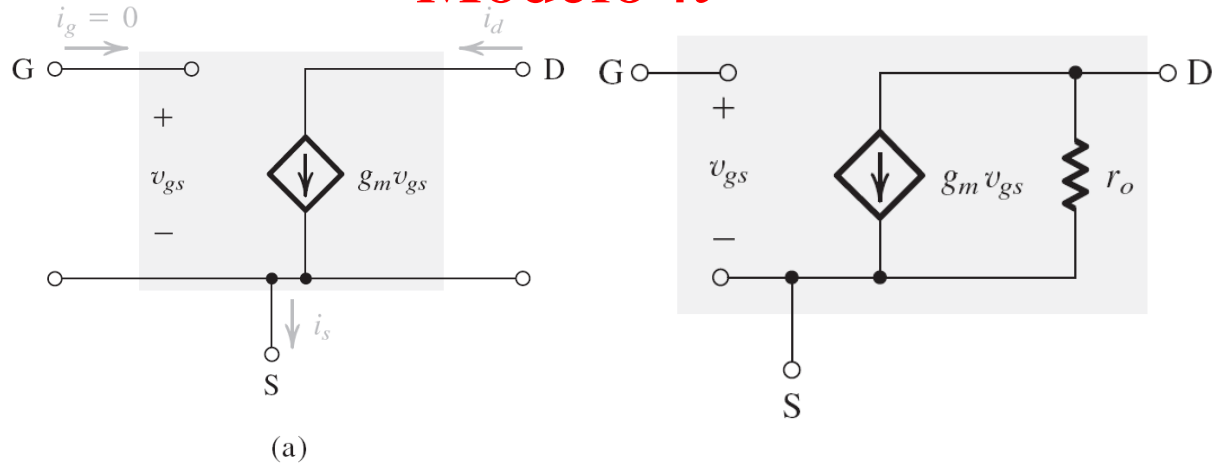
$$V_A > 0$$

onde  $k'_n = \frac{\mu_n \epsilon_{OX}}{t_{OX}} = \mu_n \cdot C_{OX}$        $\lambda = \frac{1}{V_A}$        $V_A$  tensão Early

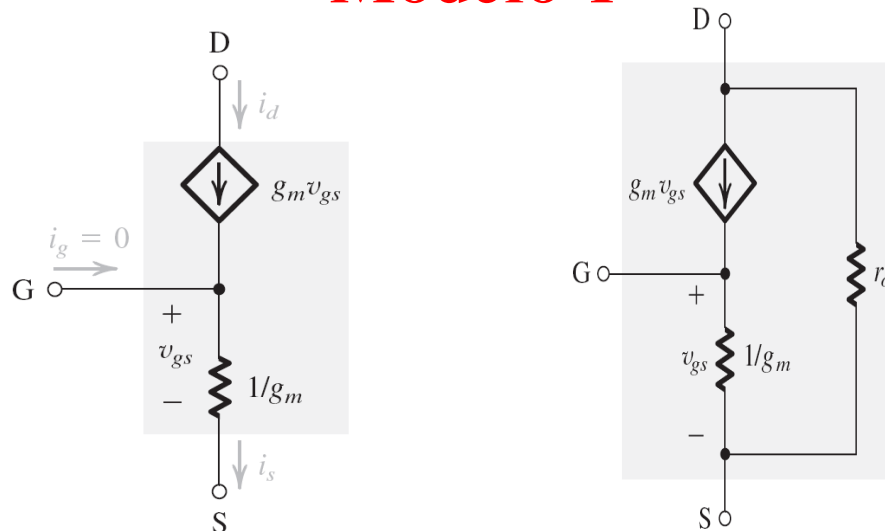
# Modelo equivalente do NMOSFET para pequenos sinais $v_{gs} \ll 2 \cdot (V_{GS} - V_t)$



## Modelo $\pi$



## Modelo T



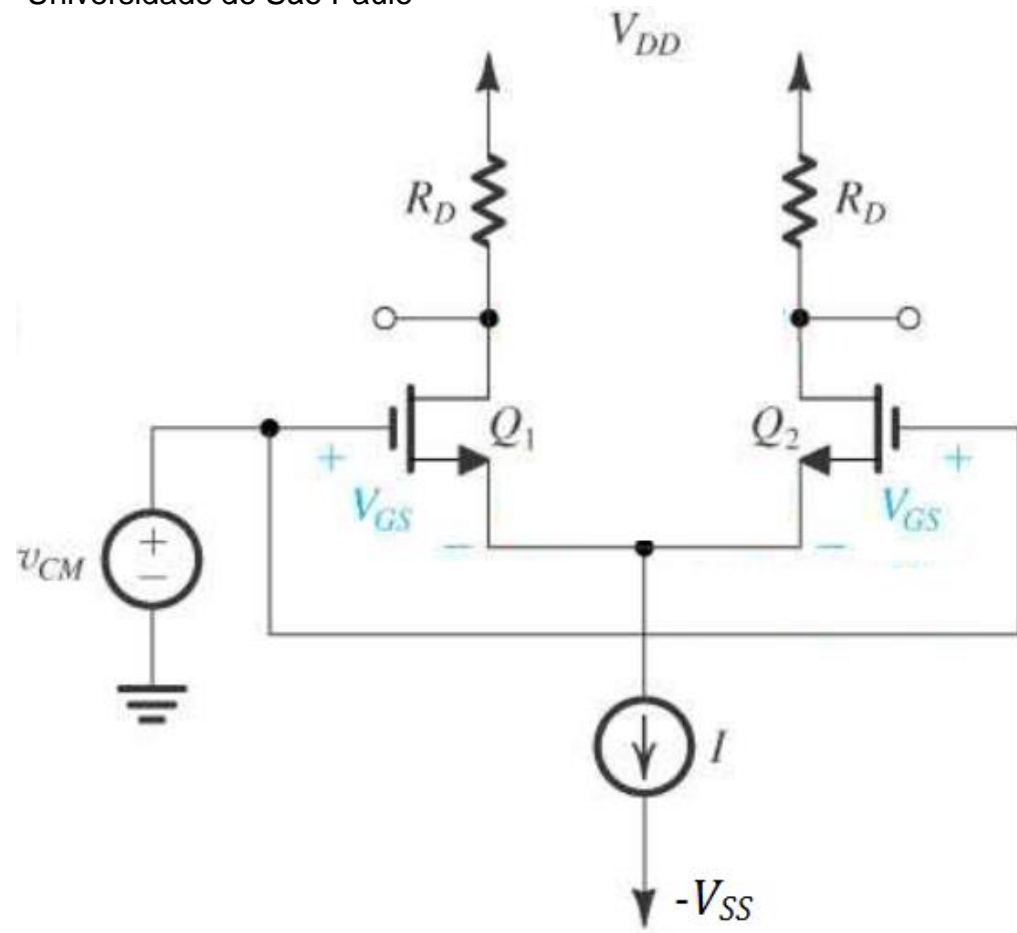
$$i_d = g_m \cdot v_{gs}$$

$$r_o = \frac{V_A}{I_D}$$

$$g_m = \frac{2 \cdot I_D}{V_{ov}}$$

# Amplificador Diferencial

## Modo Comum

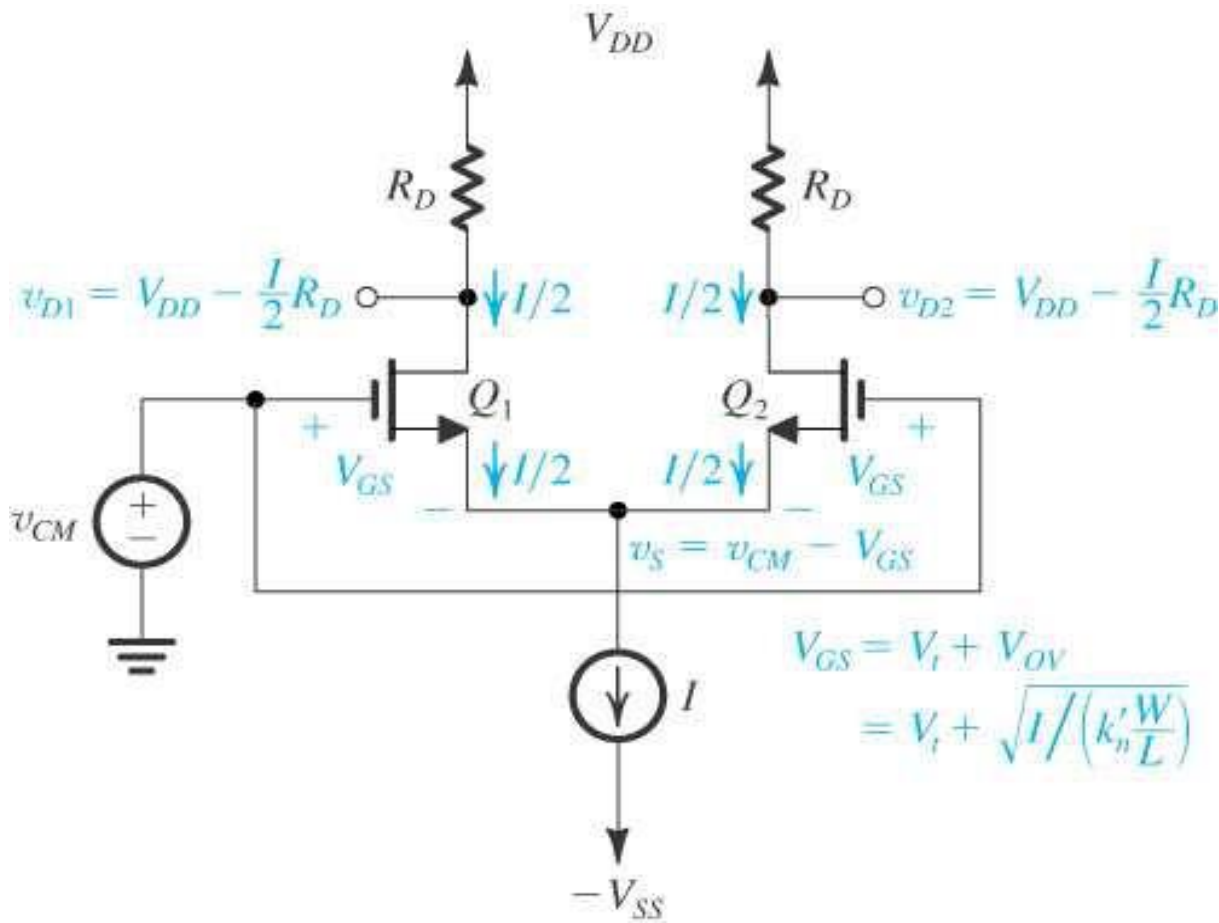


$$i_D = k'_n \frac{W}{L} \frac{(v_{GS} - V_t)^2}{2}$$



# Amplificador Diferencial

## Modo Comum



$$V_{G1} = V_{G2} = V_{CM}$$

$$i_{D1} = i_{D2} = I/2$$

$$i_{D1} + i_{D2} = I$$

$$V_{D1} = V_{DD} - R_D \cdot I/2$$

$$V_{D2} = V_{DD} - R_D \cdot I/2$$

$$V_S = v_{CM} - V_{GS}$$

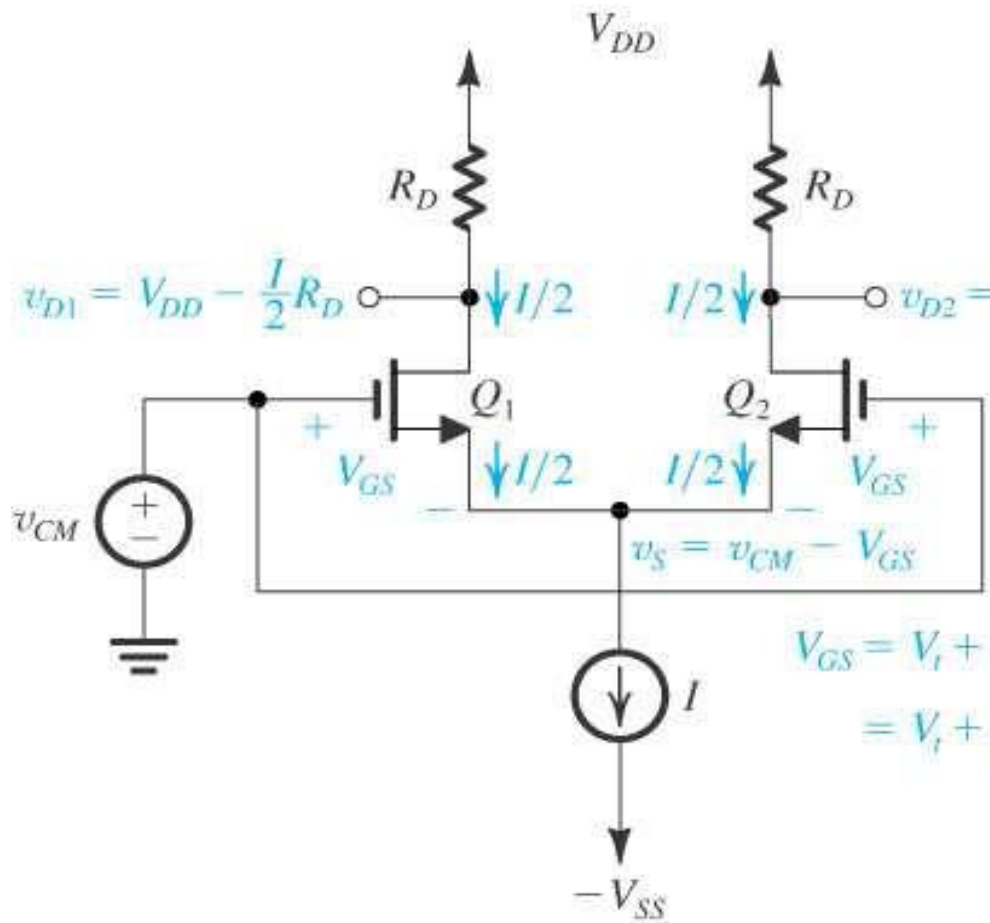
$$V_{GS} = V_t + V_{OV}$$

$$V_{OV,eq} = \sqrt{\frac{I}{k'_n \cdot (\frac{W}{L})}}$$

$$i_D = k'_n \frac{W}{L} \frac{(v_{GS} - V_t)^2}{2}$$

# Amplificador Diferencial

## Modo Comum



Limites de  $v_{CM}$  ?

$v_{CM, max}$  ?

(Manter Q1 e Q2 na Sat.)

$$v_{CM} = V_G \leq V_t + V_D$$

$$v_{CM, max} = V_t + V_{DD} - R_D \cdot I/2$$

$v_{CM, min}$  ?

(Garantir funcionamento da fonte de corrente)

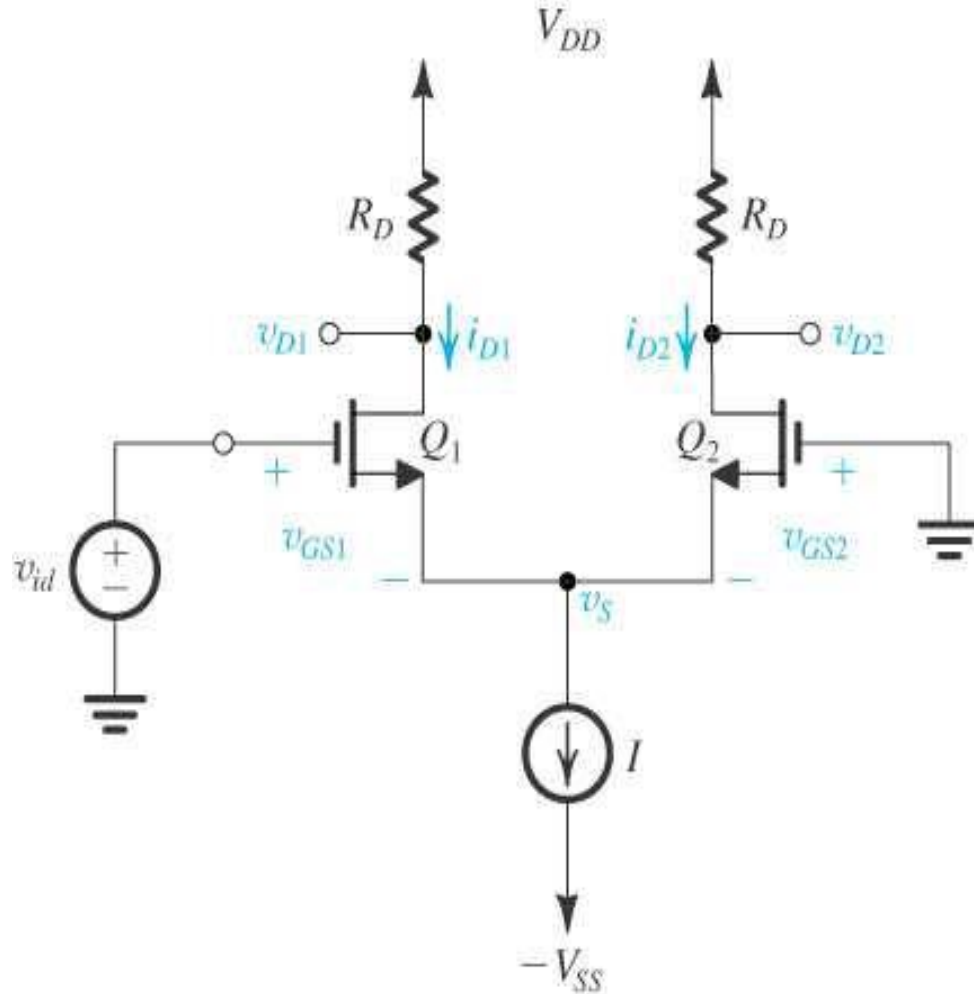
$$v_{CM, min} = -V_{SS} + V_{CS} + V_{GS}$$

$V_{CS}$  é tensão min. p/func. da fontes de corrente

$$i_D = k'_n \frac{W}{L} \frac{(v_{GS} - V_t)^2}{2}$$

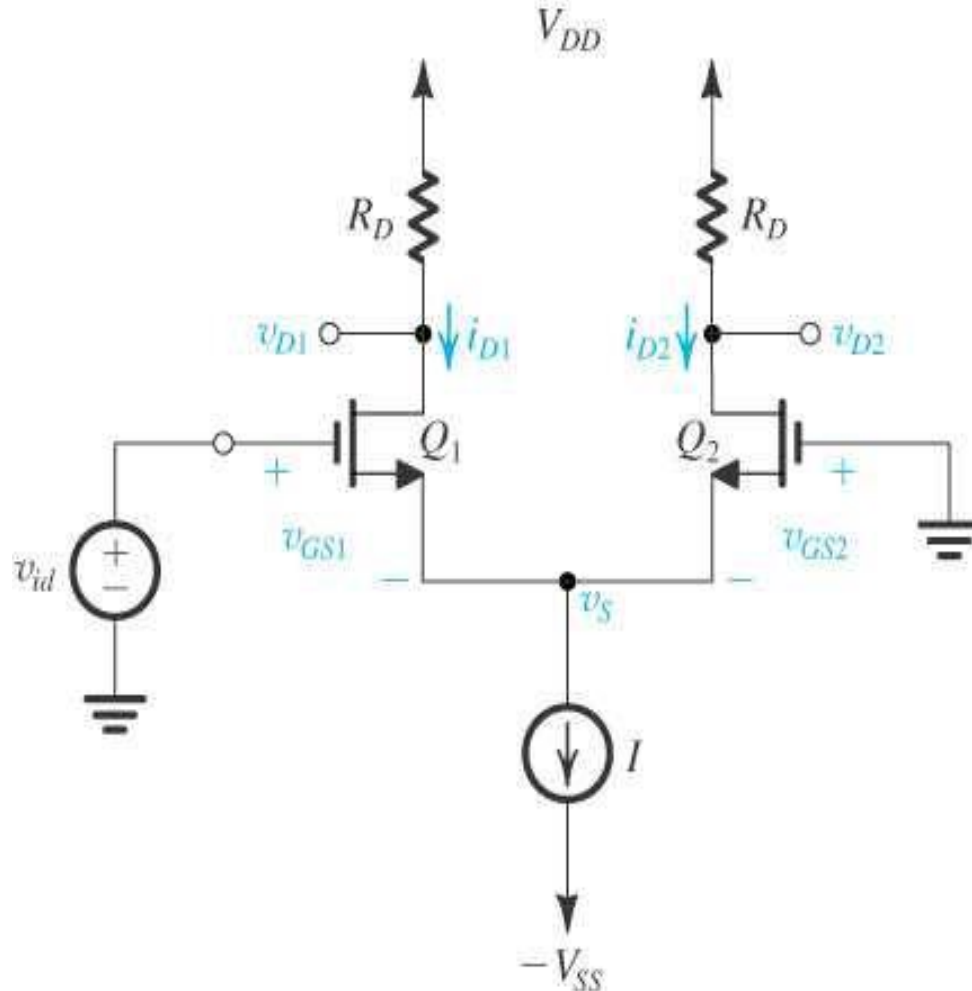
# Amplificador Diferencial

## Modo Diferencial



# Amplificador Diferencial

## Modo Diferencial



$$V_{id} = V_{G1} - V_{G2}$$

$$V_{id} > 0 \Rightarrow i_{D1} > i_{D2}$$

$$V_{D1} < V_{D2}$$

$$V_O = V_{D2} - V_{D1} > 0$$

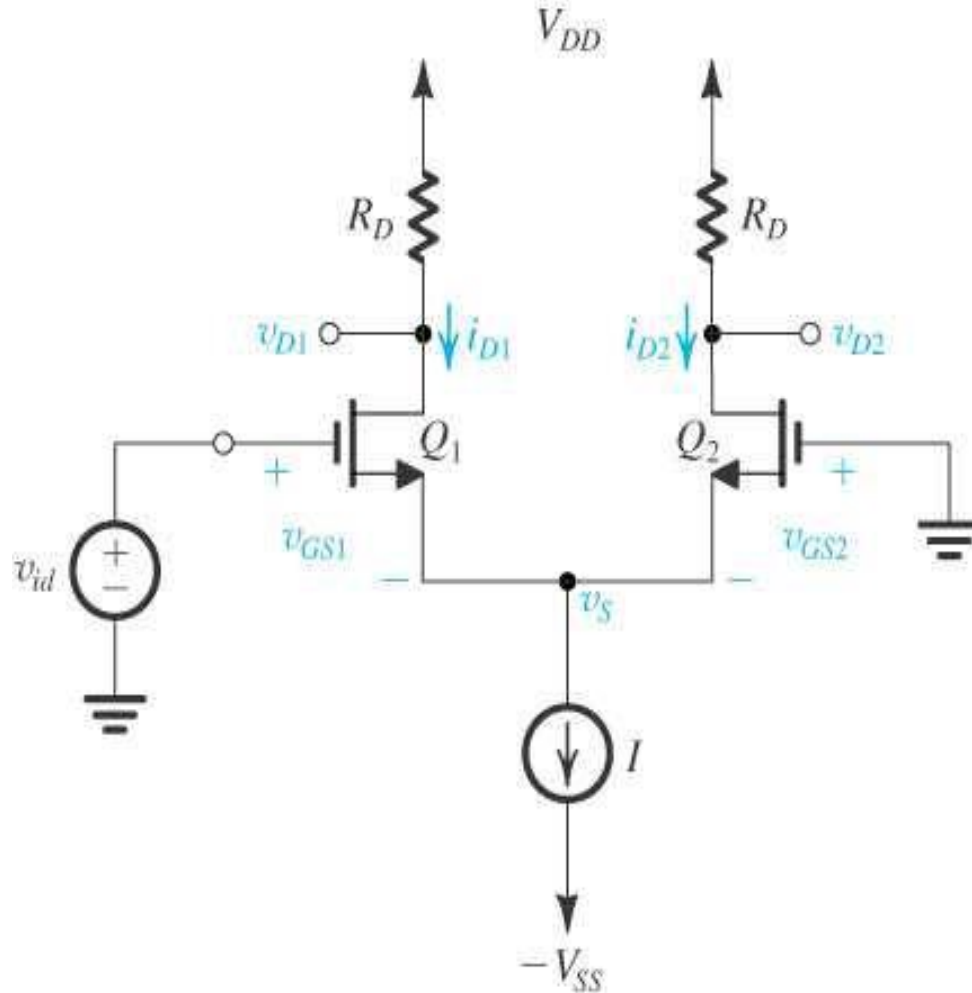
$$V_{id} < 0 \Rightarrow i_{D1} < i_{D2}$$

$$V_{D1} > V_{D2}$$

$$V_O = V_{D2} - V_{D1} < 0$$

# Amplificador Diferencial

## Modo Diferencial



Limites de  $v_{id}$  ?

p/  $v_{id, \max} \rightarrow i_{D1} = I$  e  $i_{D2} = 0$

$$i_{D1} = k'_n \frac{W}{L} \frac{(V_{ov})^2}{2} = I$$

$$V_{OV} = \sqrt{\frac{2.I}{k'_n \cdot (\frac{W}{L})}} = \sqrt{2} \cdot V_{OV,eq}$$

$$V_{GS1} = V_t + V_{OV}$$

$$V_{GS1} = V_t + \sqrt{2} \cdot V_{OV,eq}$$

$$v_{id} = V_{GS1} + V_S$$

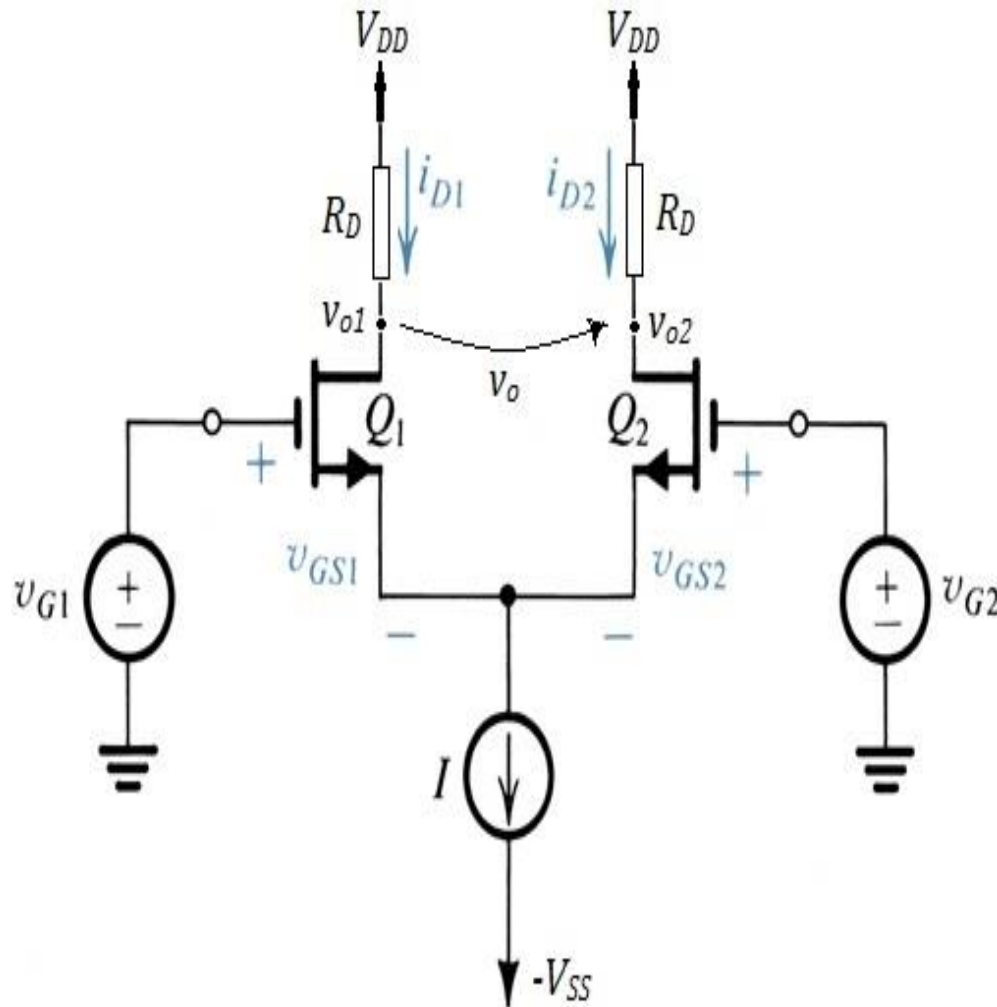
$$v_{id} = V_t + \sqrt{2} \cdot V_{OV,eq} + (-V_t)$$

$$V_{id, \max} = \sqrt{2} \cdot V_{OV,eq}$$

$$V_{id, \min} = -\sqrt{2} \cdot V_{OV,eq}$$

# Amplificador Diferencial

## Modo Diferencial (Grandes Sinais)



$$i_{D1} + i_{D2} = I$$

$$v_{id} = v_{G1} - v_{G2} = v_{GS1} - v_{GS2}$$

$$i_{D1} = k'_n \frac{W}{L} \frac{(v_{GS1} - V_t)^2}{2}$$

$$i_{D2} = k'_n \frac{W}{L} \frac{(v_{GS2} - V_t)^2}{2}$$

# Amplificador Diferencial

## Modo Diferencial (Grandes Sinais)

$$i_{D1} + i_{D2} = I$$

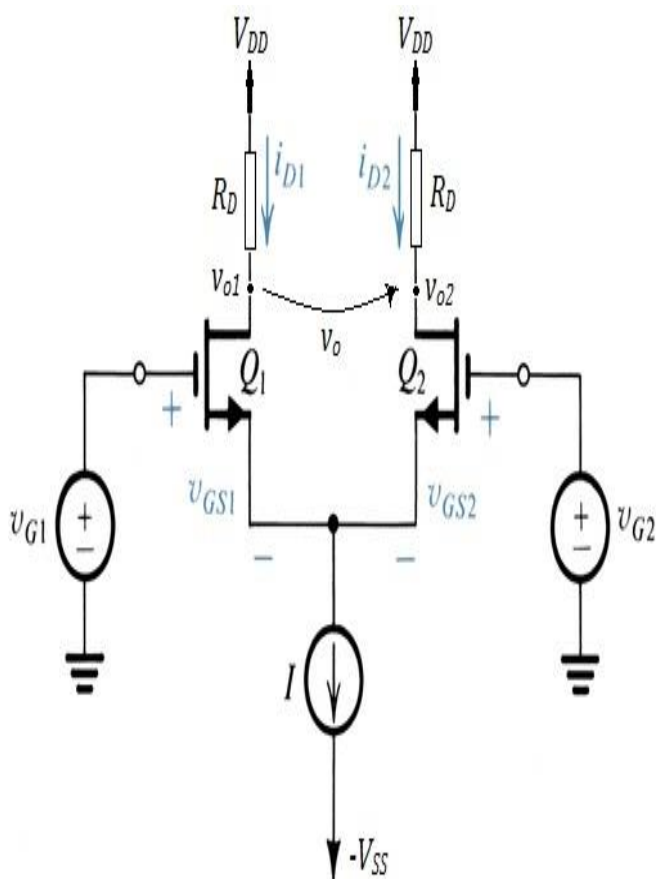
$$V_{id} = V_{G1} - V_{G2} = V_{GS1} - V_{GS2}$$

$$i_{D1} = \frac{I}{2} + \frac{I}{V_{OV}} \cdot \frac{V_{id}}{2} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{V_{id}/2}{V_{OV}}\right)^2}$$

$$i_{D2} = \frac{I}{2} - \frac{I}{V_{OV}} \cdot \frac{V_{id}}{2} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{V_{id}/2}{V_{OV}}\right)^2}$$

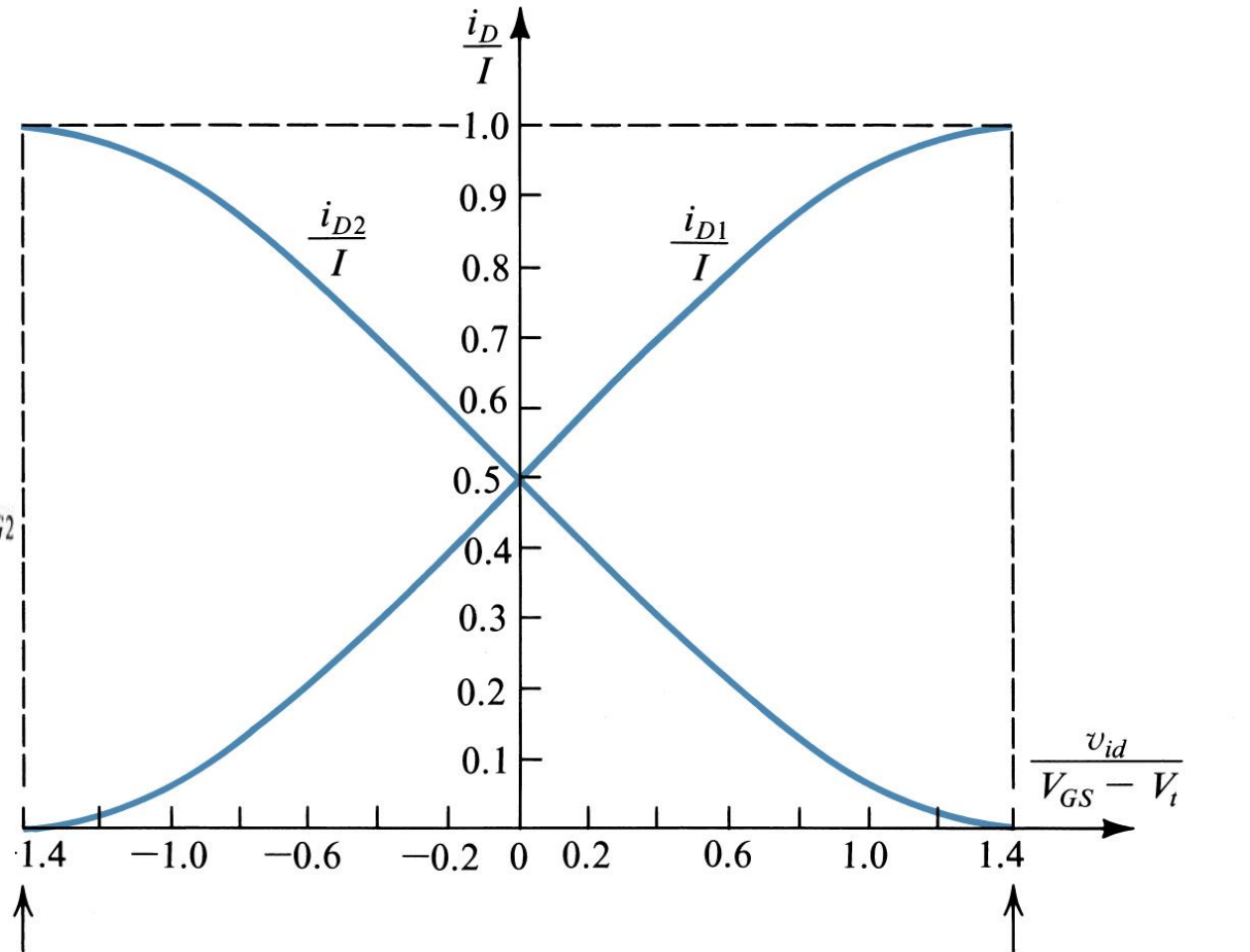
# Amplificador Diferencial

## Modo Diferencial (Grandes Sinais)



$$V_{id} = V_{G1} - V_{G2}$$

$$|v_{id}|_{\max} = \sqrt{2} (V_{GS} - V_t)$$



$$|v_{id}|_{\max} = \sqrt{2} (V_{GS} - V_t)$$



$$i_{D1} = \frac{I}{2} + \frac{I}{V_{OV}} \cdot \frac{v_{id}}{2} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{v_{id}/2}{V_{OV}}\right)^2}$$

$$i_{D2} = \frac{I}{2} - \frac{I}{V_{OV}} \cdot \frac{v_{id}}{2} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{v_{id}/2}{V_{OV}}\right)^2}$$

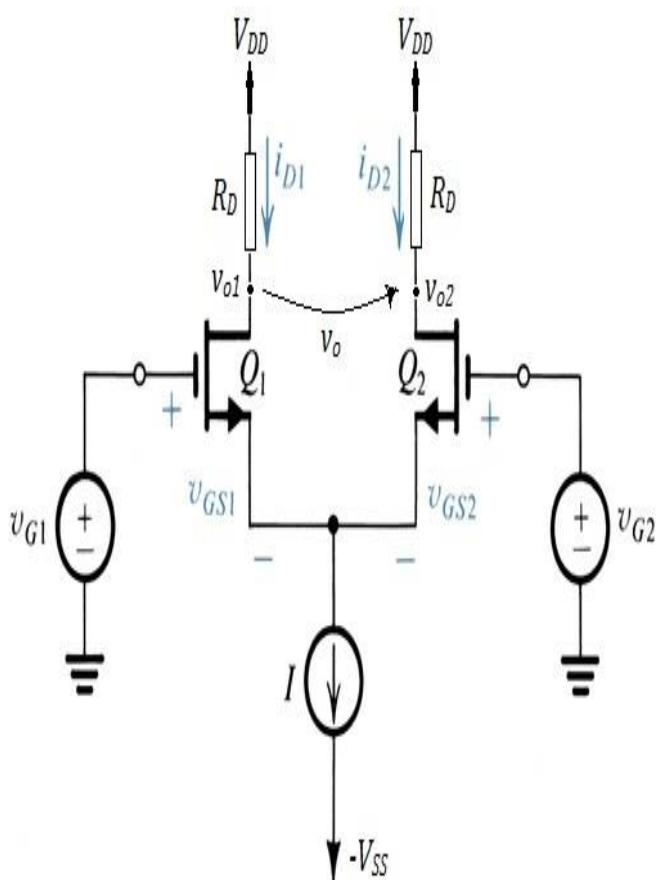
Para  $\frac{v_{id}/2}{V_{OV}} \ll 1 \rightarrow v_{id} \ll 2 \cdot V_{OV}$  (condição para pequenos sinais)

$$i_{D1} = \frac{I}{2} + \frac{I}{V_{OV}} \cdot \frac{v_{id}}{2} = I_{D1} + i_{d1} \rightarrow i_{d1} = \frac{I}{V_{OV}} \cdot \frac{v_{id}}{2} = g_m \cdot \frac{v_{id}}{2}$$

$$i_{D2} = \frac{I}{2} - \frac{I}{V_{OV}} \cdot \frac{v_{id}}{2} = I_D + i_{d2} \rightarrow i_{d2} = -\frac{I}{V_{OV}} \cdot \frac{v_{id}}{2} = -g_m \cdot \frac{v_{id}}{2}$$

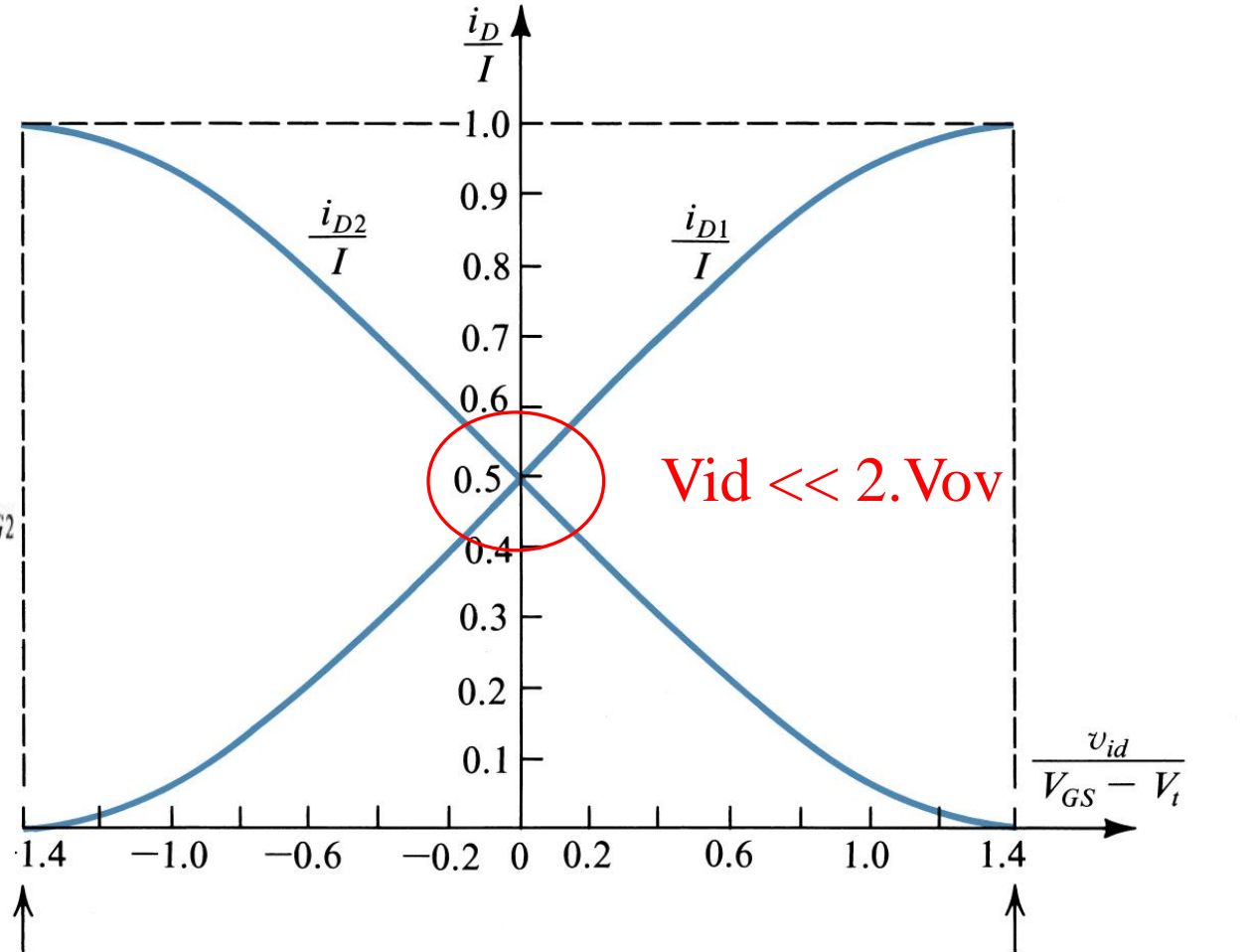
# Amplificador Diferencial

## Modo Diferencial (pequenos sinais)



$$V_{id} = V_{G1} - V_{G2}$$

$$|v_{id}|_{\max} = \sqrt{2} (V_{GS} - V_t)$$



$$|v_{id}|_{\max} = \sqrt{2} (V_{GS} - V_t)$$

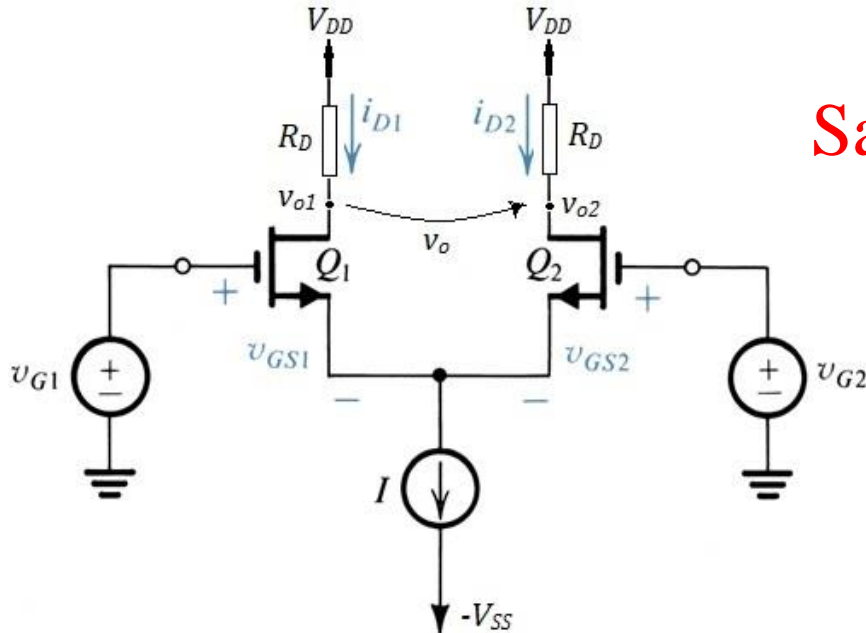
# Amplificador Diferencial

## Modo Diferencial (pequenos sinais)

Ganho em modo diferencial

Saída única (dreno e terra):  $v_{O1}/v_{id}$

Saída diferencial:  $v_O/v_{id}$



# Amplificador Diferencial

## Modo Diferencial (pequenos sinais)

$$V_{id} = V_{G1} - V_{G2}$$

Condição para pequenos sinais:

$$v_{id} \ll 2 \cdot V_{ov}$$

Ganho em modo diferencial

Saída única (dreno e terra):

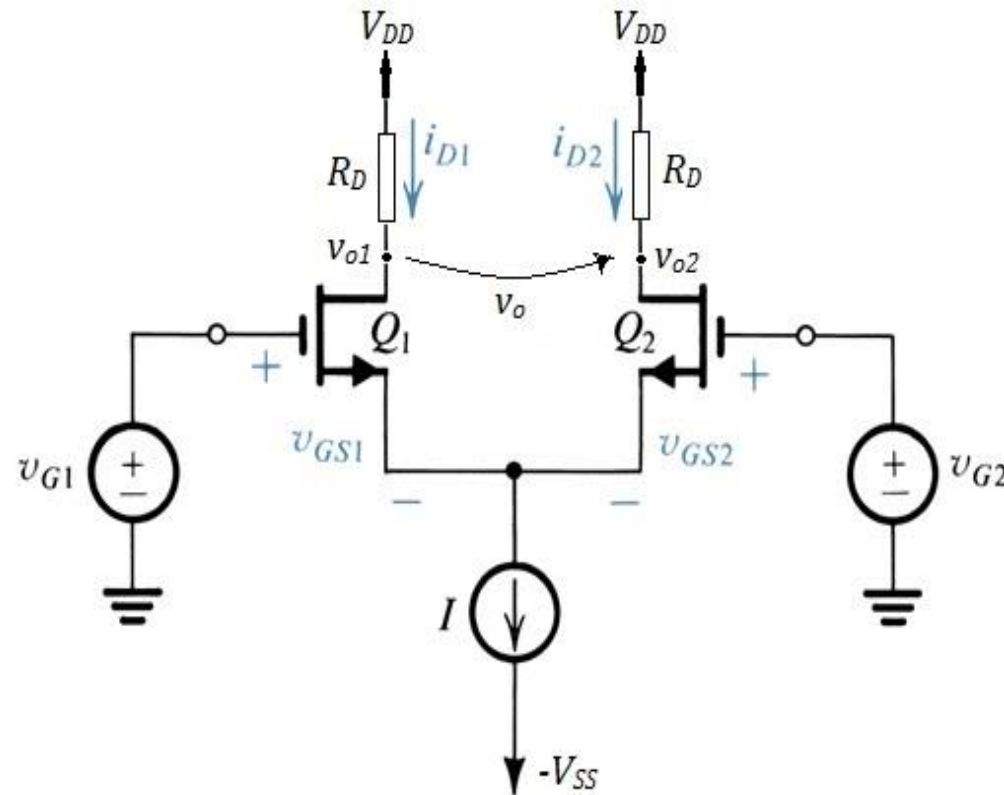
$$v_{O1}/v_{id} = -gm \cdot (R_D // r_O) / 2$$

$$v_{O2}/v_{id} = +gm \cdot (R_D // r_O) / 2$$

Saída diferencial:

$$V_O = V_{O2} - V_{O1}$$

$$V_O/v_{id} = gm \cdot (R_D // r_O)$$



## Exercício 7.4 (pag. 436)

**7.4** Um par diferencial MOS está operando com uma corrente total de 0,8 mA, utilizando transistores com razão  $W/L$  de 100,  $\mu_n C_{ox} = 0,2 \text{ mA/V}^2$ ,  $V_A = 20 \text{ V}$  e  $R_D = 5 \text{ k}\Omega$ . Determine  $V_{OV}$ ,  $g_m$ ,  $r_o$  e  $A_d$ .

**Resposta** 0,2 V; 4 mA/V; 50 k $\Omega$ ; 18,2 V/V.

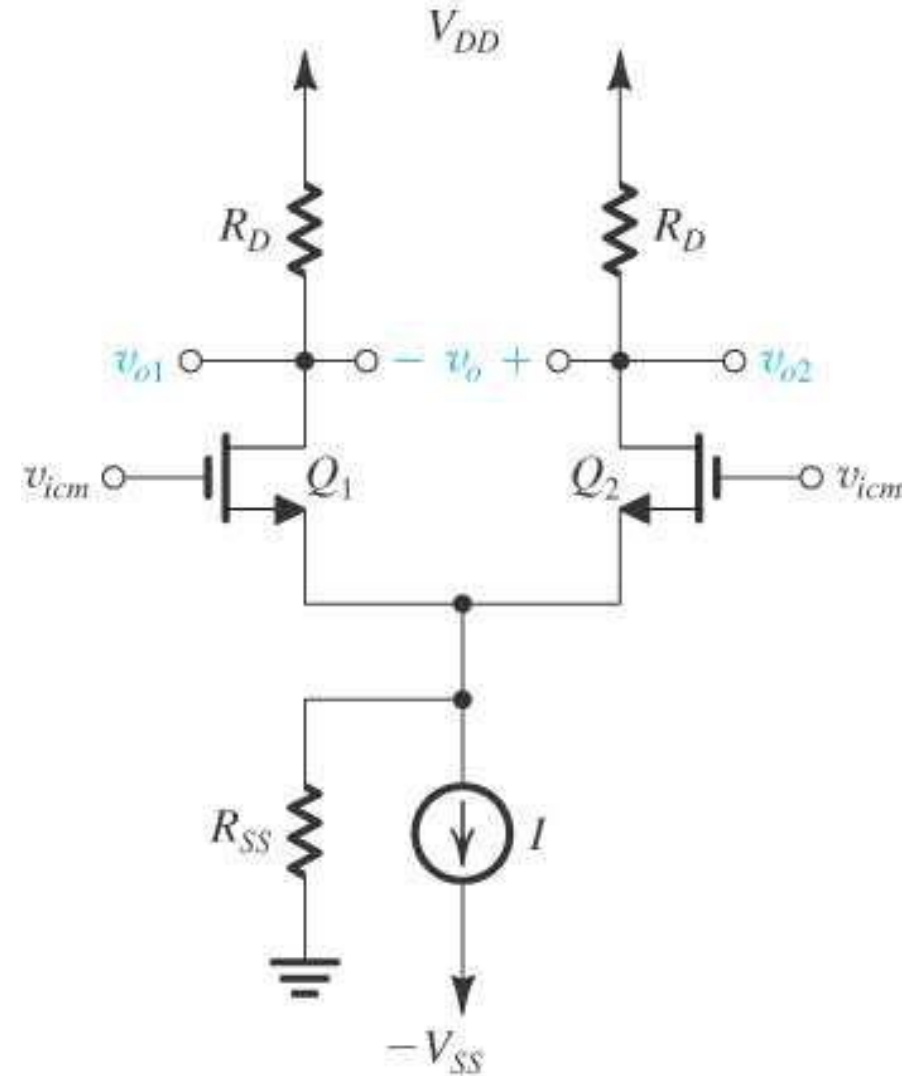
**AULA 18**



**Ganho de modo comum, rejeição  
de modo comum.  
(p. 436-438)**

# Amplificador Diferencial

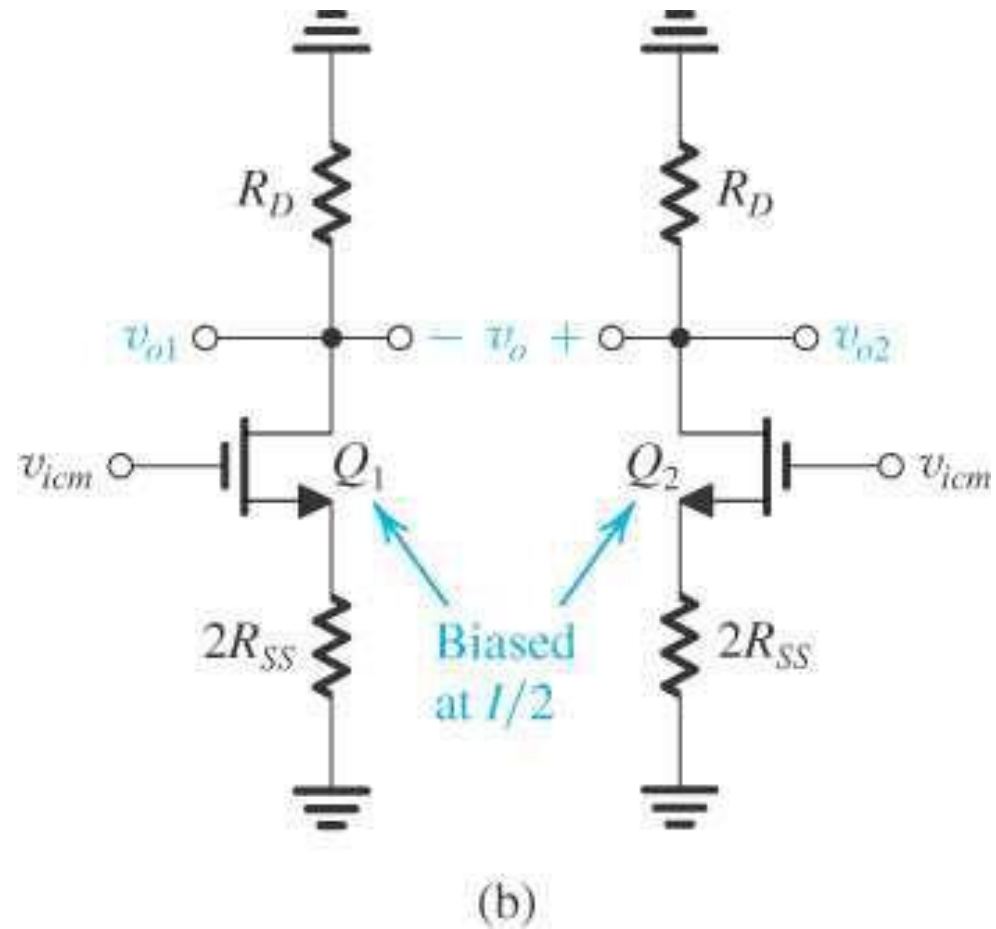
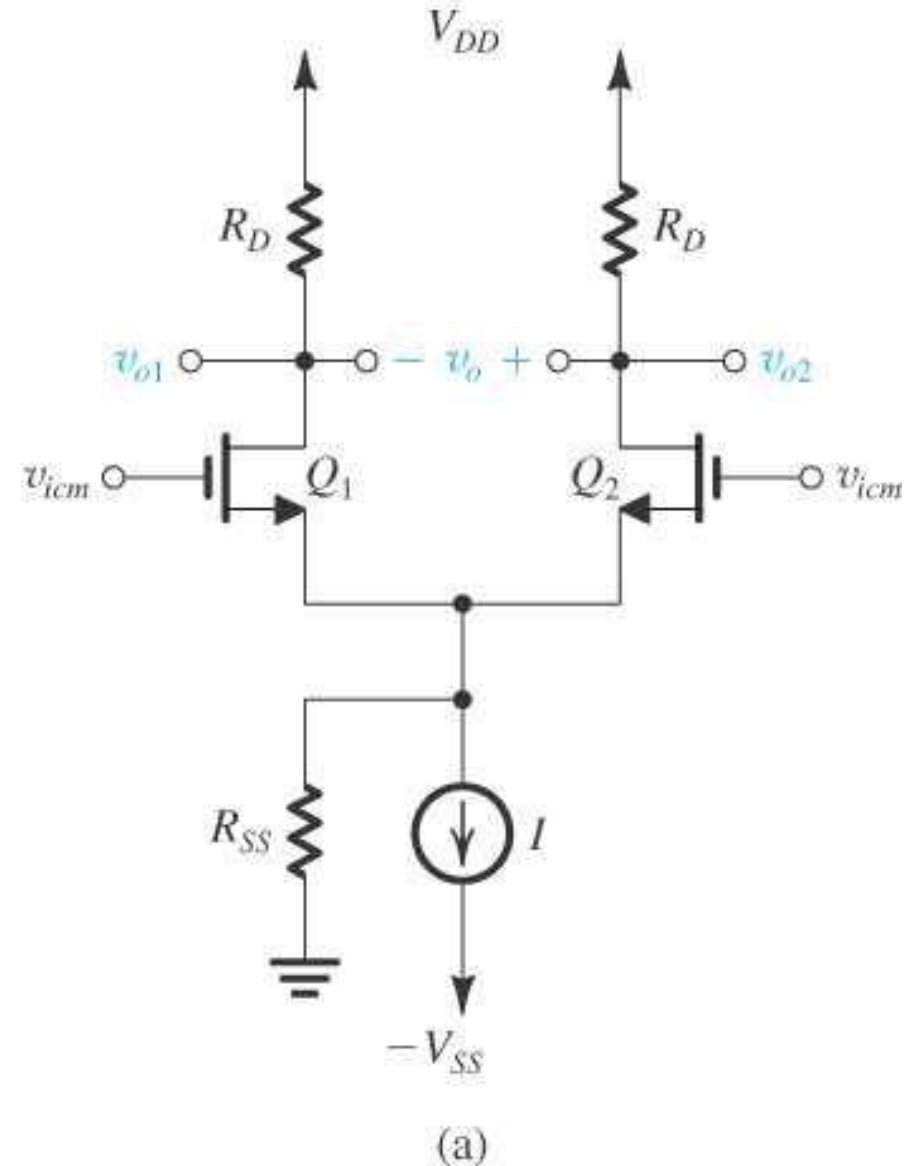
## Modo Comum (pequenos sinais)



(a)

# Amplificador Diferencial

## Modo Comum (pequenos sinais)



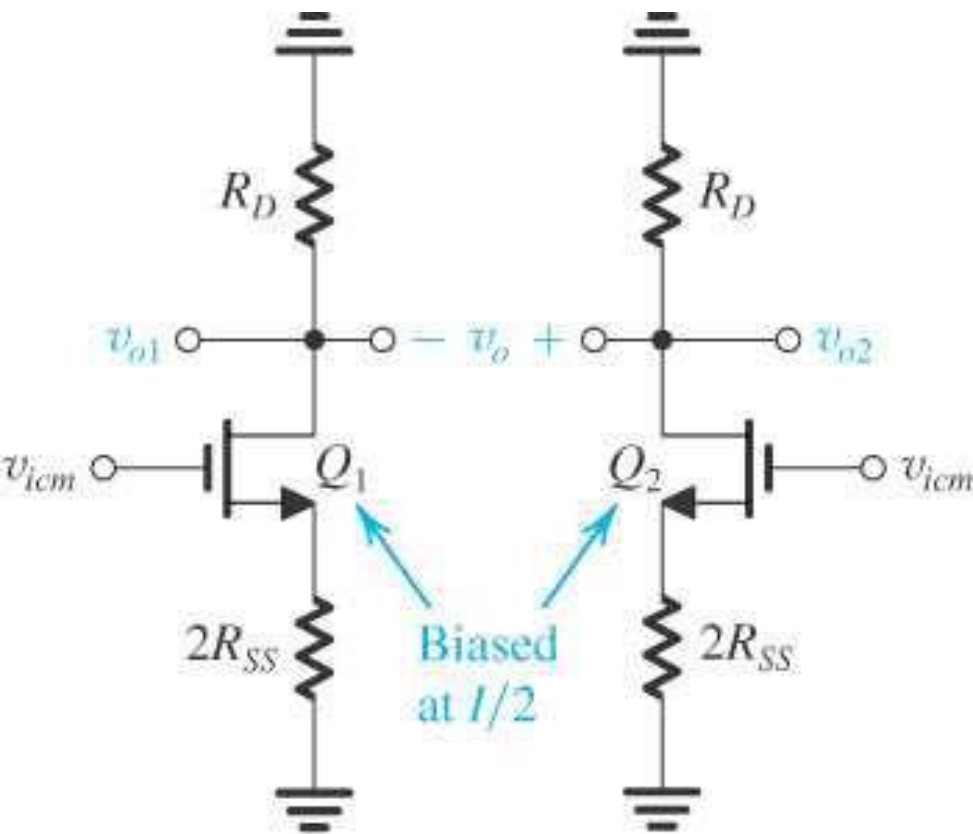


# Amplificador Diferencial

## Modo Comum (pequenos sinais)

Ganho em modo comum

Saída única (dreno e terra):



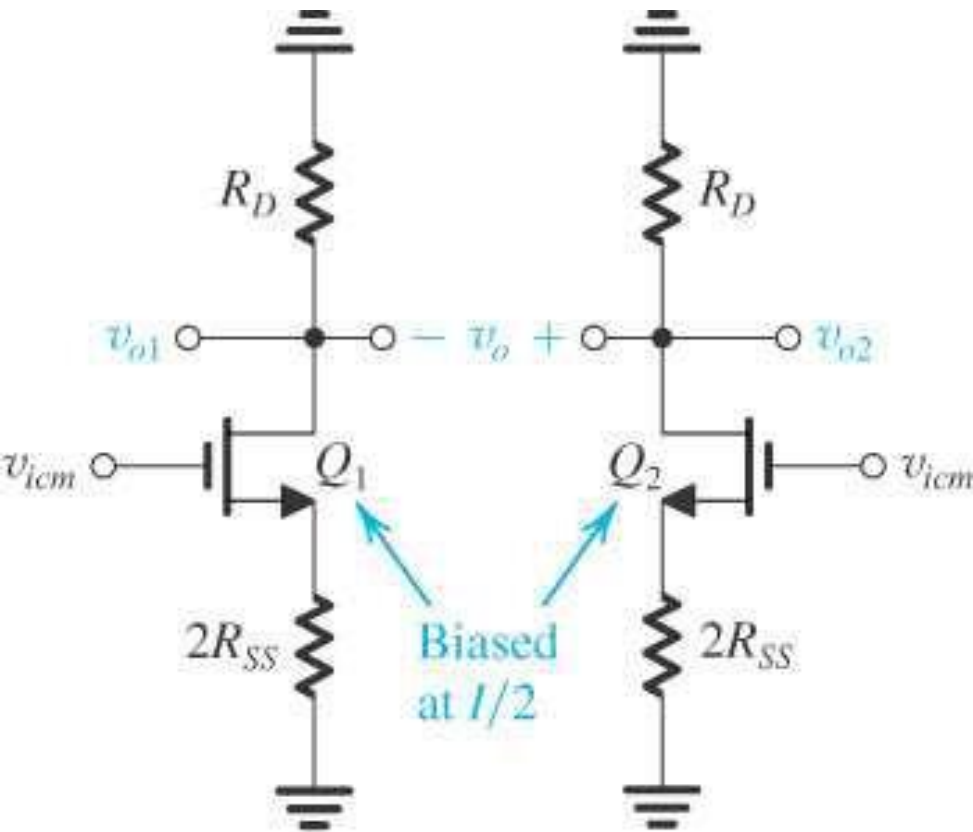
(b)

# Amplificador Diferencial

## Modo Comum (pequenos sinais)

Ganho em modo comum

Saída diferencial:



(b)

# Amplificador Diferencial

## Modo Comum (pequenos sinais)

Ganho em modo comum

Saída única (dreno e terra):

$$A_{cm} = v_{O1}/v_{icm} = -R_D/(1/g_m + 2.R_{SS})$$

Geralmente  $R_{SS} \gg 1/g_m$

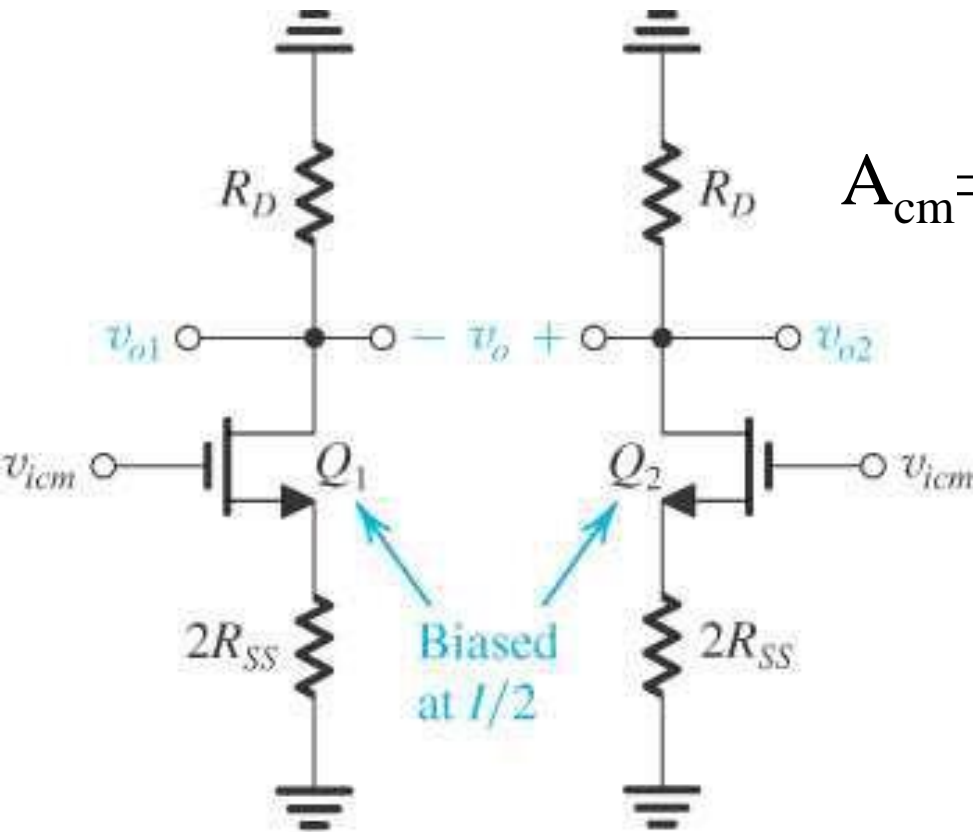
$$A_{cm} = v_{O1}/v_{icm} \cong -R_D/(2.R_{SS})$$

$$A_{cm} = v_{O2}/v_{icm} \cong -R_D/(2.R_{SS})$$

Saída diferencial:

$$A_{cm} = v_O/v_{icm} = (v_{O2} - v_{O1})/v_{icm}$$

$$A_{cm} = v_O/v_{icm} = 0$$



(b)

# Amplificador Diferencial

## (pequenos sinais)

### Relação de rejeição em modo comum (CMRR)

$$\text{CMRR} = |A_d / A_{\text{cm}}| \text{ ou } \text{CMRR}(\text{dB}) = 20 \cdot \log |A_d / A_{\text{cm}}|$$

#### 1) Saída única (dreno e terra):

$$|A_d| = g_m \cdot R_D / 2$$

$$|A_{\text{cm}}| = R_D / (2 \cdot R_{\text{SS}})$$

$$\text{CMRR} = |A_d / A_{\text{cm}}| = (g_m \cdot R_D / 2) / (R_D / 2 \cdot R_{\text{SS}}) = g_m \cdot R_{\text{SS}}$$

#### 2) Saída diferencial ( $Q_1$ e $Q_2$ casados e $R_{D1} = R_{D2}$ ):

$$|A_d| = g_m \cdot R_D$$

$$|A_{\text{cm}}| = 0$$

$$\text{CMRR} = (g_m \cdot R_D) / (0) \Rightarrow \text{infinito}$$

# Amplificador Diferencial

## (pequenos sinais)

### Relação de rejeição em modo comum (CMRR)

$$\text{CMRR} = |A_d / A_{\text{cm}}| \text{ ou } \text{CMRR(dB)} = 20 \cdot \log |A_d / A_{\text{cm}}|$$

Saída diferencial ( $Q_1$  e  $Q_2$  casados mas  $R_{D1} \neq R_{D2}$ ):

$$A_{\text{cm1}} = v_{O1} / v_{\text{icm}} \cong -R_{D1} / (2 \cdot R_{SS})$$

$$A_{\text{cm2}} = v_{O2} / v_{\text{icm}} \cong -R_{D2} / (2 \cdot R_{SS})$$

$$A_{\text{cm}} = v_O / v_{\text{icm}} = (v_{O2} - v_{O1}) / v_{\text{icm}} = -R_{D2} / (2 \cdot R_{SS}) + R_{D1} / (2 \cdot R_{SS})$$

$$A_{\text{cm}} = -(R_{D2} - R_{D1}) / (2 \cdot R_{SS}) = -\Delta R_D / (2 \cdot R_{SS}) = [-R_D / (2 \cdot R_{SS})] \cdot (\Delta R_D / R_D)$$

Considerando  $A_d = v_O / v_{\text{id}} \cong g_m \cdot R_D$

$$\text{CMRR} = |A_d / A_{\text{cm}}| = 2 \cdot g_m \cdot R_{SS} / (\Delta R_D / R_D)$$

# Amplificador Diferencial (pequenos sinais)

Relação de rejeição em modo comum (CMRR)

$$\text{CMRR} = |A_d / A_{\text{cm}}| \quad \text{ou} \quad \text{CMRR(dB)} = 20 \cdot \log |A_d / A_{\text{cm}}|$$

Saída diferencial ( $R_{D1} = R_{D2}$  mas  $g_{m1} \neq g_{m2}$ ):

$$A_{\text{cm}} = v_O / v_{\text{icm}} = [-R_D / (2 \cdot R_{SS})] \cdot (\Delta g_m / g_m)$$

Considerando  $A_d = v_O / v_{\text{id}} \cong g_m \cdot R_D$

$$\text{CMRR} = 2 \cdot g_m \cdot R_{SS} / (\Delta g_m / g_m)$$

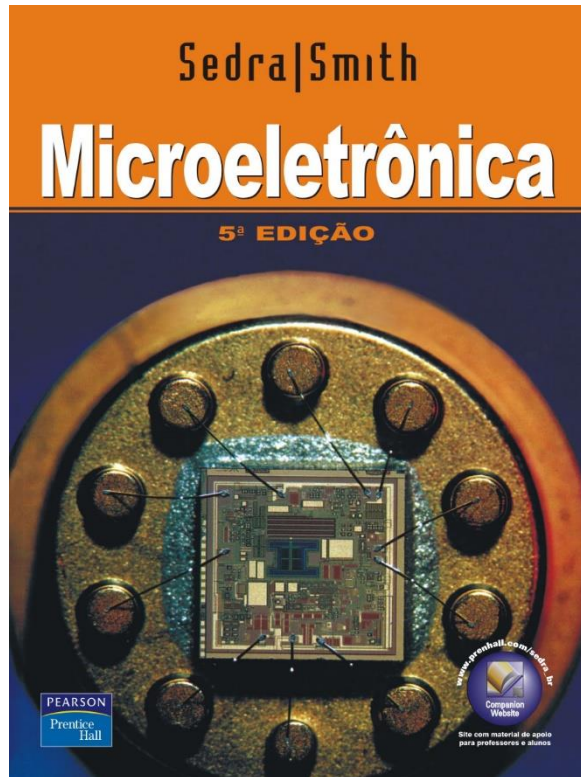
# Amplificador Diferencial

## Exercício 7.5 (pag. 437)

- 7.5** Um par diferencial operando na corrente de polarização de 0,8 mA emprega transistores com  $W/L = 100$  e  $\mu_n C_{ox} = 0,2 \text{ mA/V}^2$ , utilizando  $R_D = 5 \text{ k}\Omega$  e  $R_{SS} = 25 \text{ k}\Omega$ .
- (a) Encontre o ganho diferencial, o ganho em modo comum e a razão da rejeição em modo comum (em dB) caso a saída seja tomada entre dreno único e terra e com o circuito perfeitamente casado.
  - (b) Repita (a) quando a saída é tomada diferencialmente.
  - (c) Repita (b) quando a saída é tomada diferencialmente, supondo as resistências de dreno com 1% de descasamento.

**Resposta** (a) 10 V/V; 0,1 V/V; 40 dB; (b) 20 V/V; 0 V/V;  $\infty$  dB; (c) 20 V/V; 0,001 V/V; 86 dB.

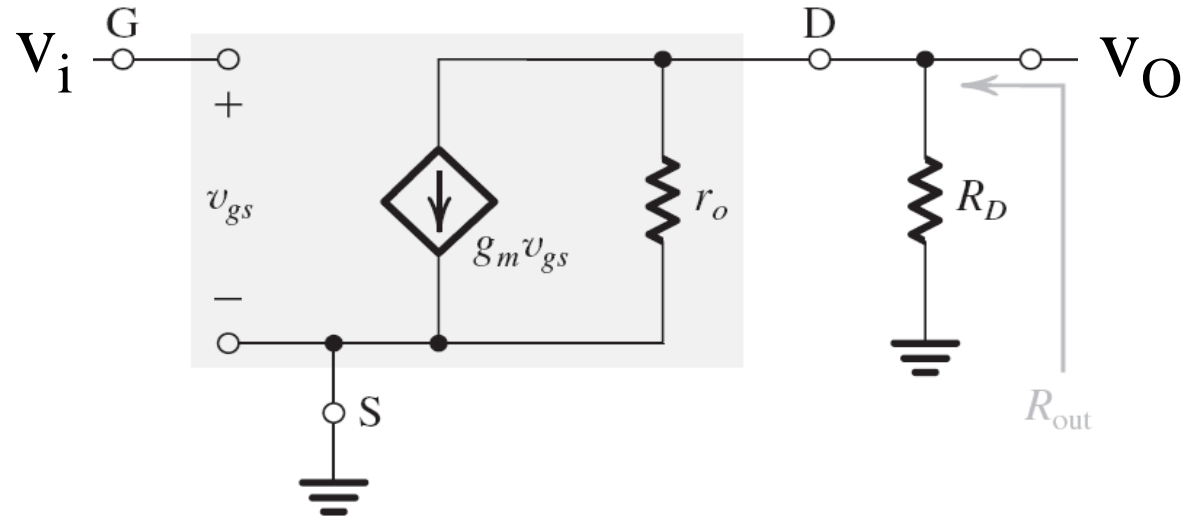
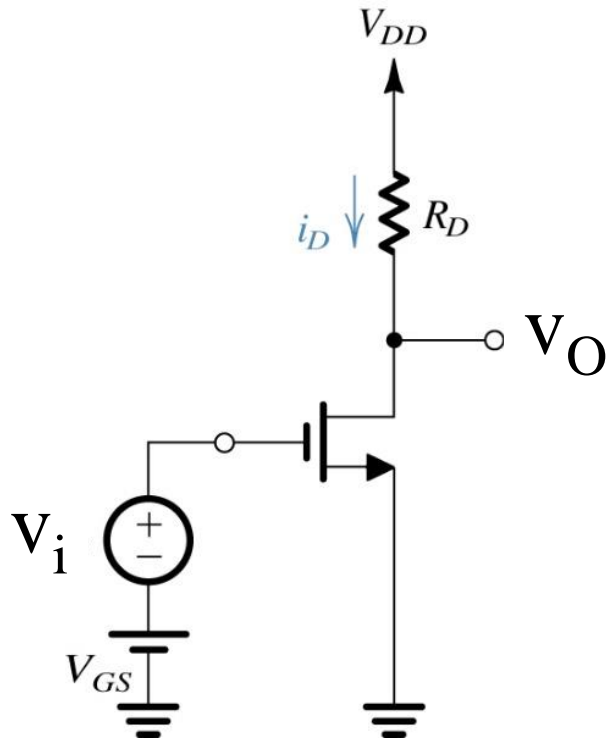
**AULA 19**



**Amplificador Diferencial MOS  
com carga ativa.  
(p. 452-456)**



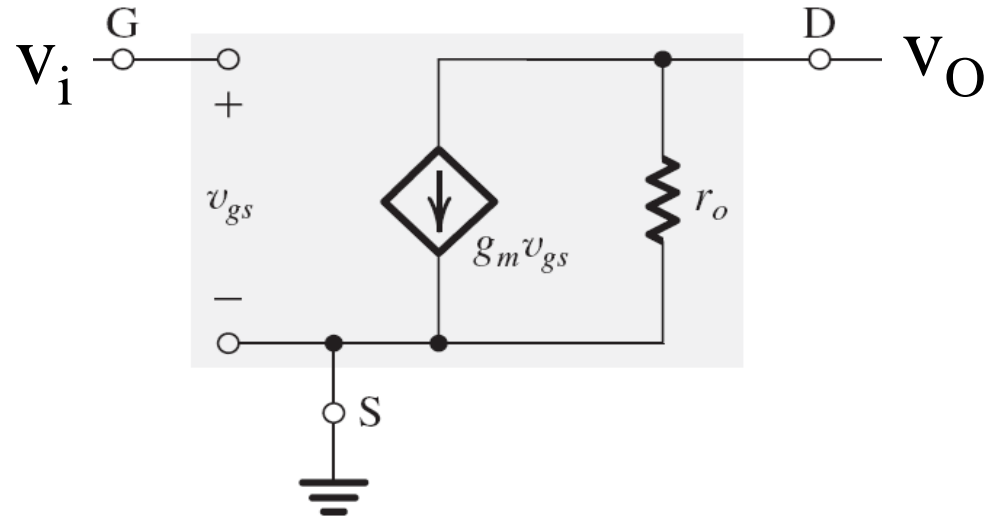
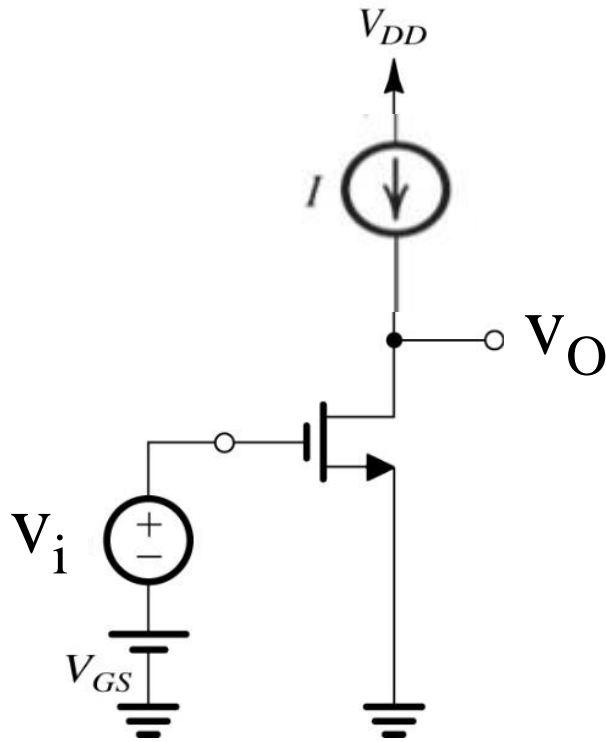
# Amplificador Fonte Comum com Carga Passiva ( $R_D$ )



$$A_V = v_O/v_i = - g_m.(R_D // r_o)$$

# Amplificador Fonte Comum

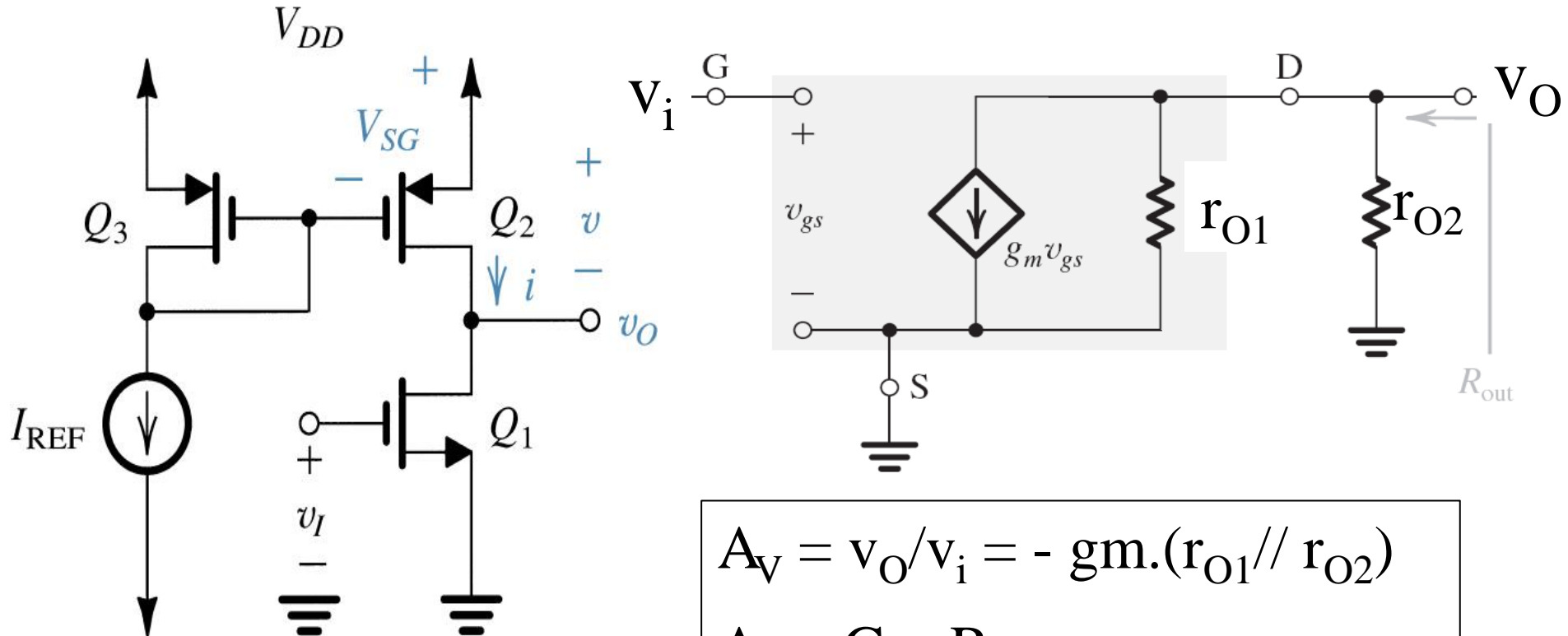
## com Carga Ativa (Ideal)



$$A_V = v_O/v_i = - g_m.r_o$$

# Amplificador Fonte Comum com Carga Ativa (Real)

Carga Ativa Real = Espelho de corrente



$$A_v = v_o/v_i = - g_m.(r_{O1} // r_{O2})$$

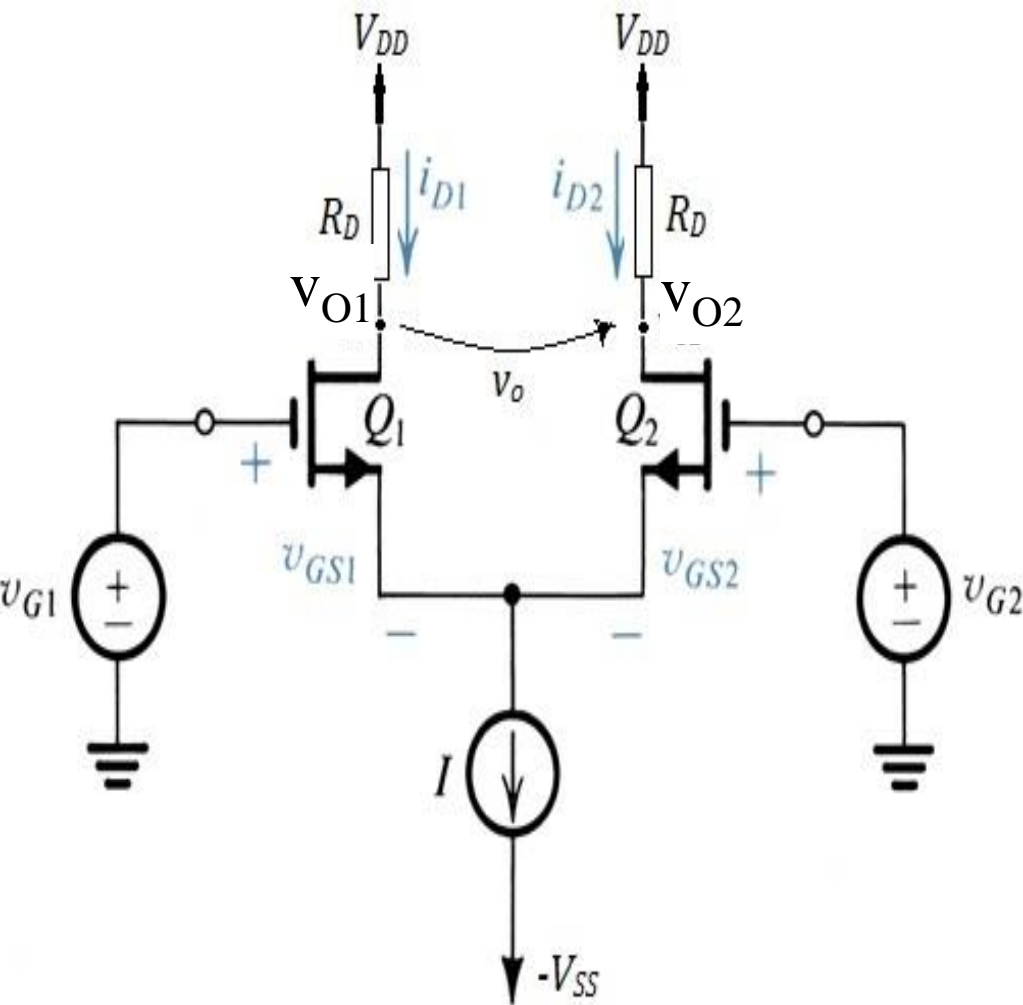
$$A_v = G_m.R_o$$

$G_m$  = Transcondutância de curto circuito

$R_o$  = Resistência de saída

# Amplificador Diferencial

## Modo Diferencial com Carga Passiva ( $R_D$ )



$$V_{id} = V_{G1} - V_{G2}$$

**Saída Simples (dreno e terra):**

$$v_{O1}/v_{id} = - gm.(R_D//r_O)/2$$

$$v_{O2}/v_{id} = + gm.(R_D//r_O)/2$$

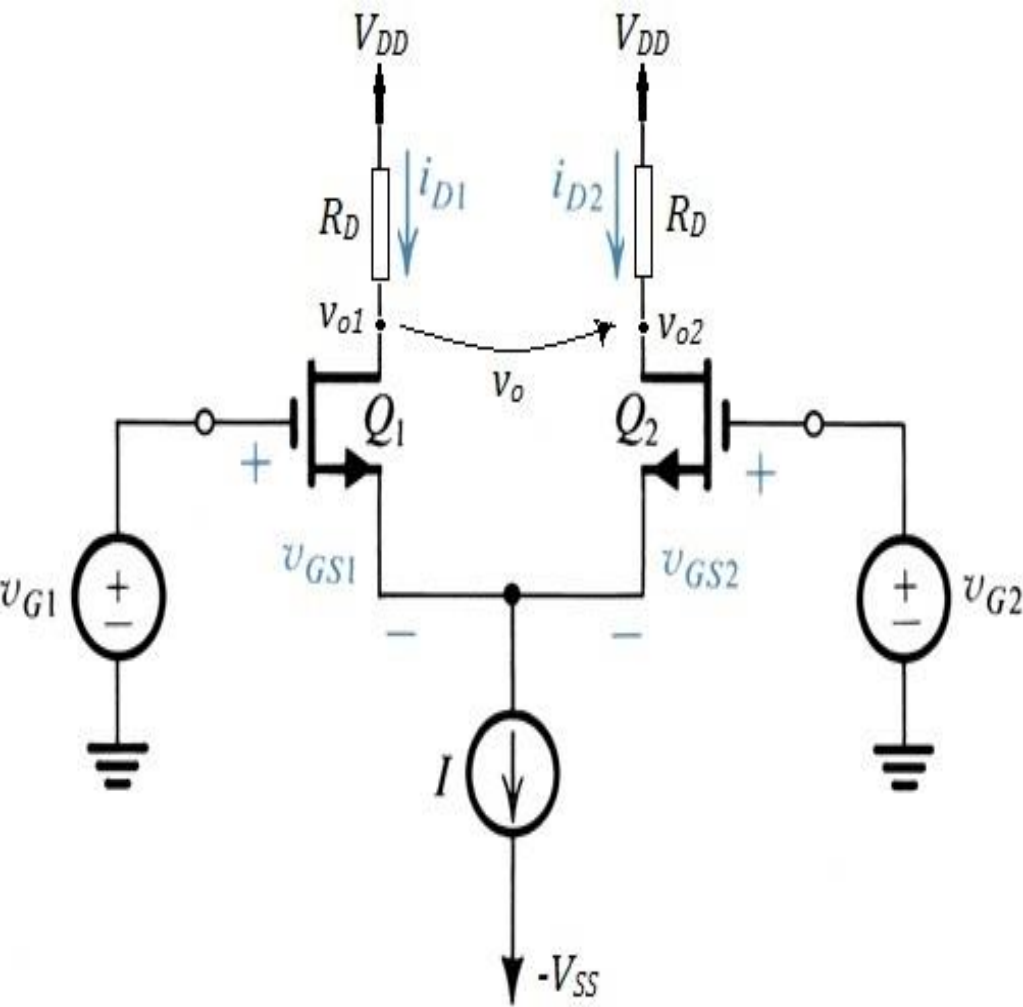
**Saída diferencial:**

$$V_O = V_{O2} - V_{O1}$$

$$A_V = v_O/v_{id} = gm.(R_D//r_O)$$

# Amplificador Diferencial

## Modo Diferencial com Carga Passiva ( $R_D$ )

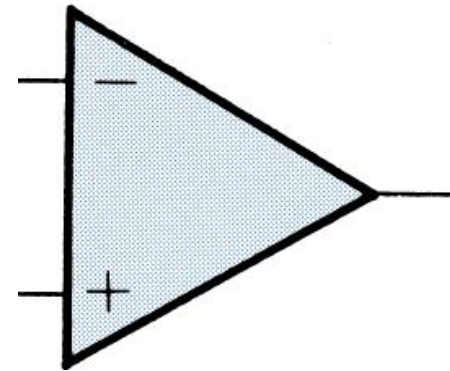


$$V_{id} = V_{G1} - V_{G2}$$

Saída Simples (dreno e terra):

$$v_{O1}/v_{id} = - gm.(R_D//r_o)/2$$

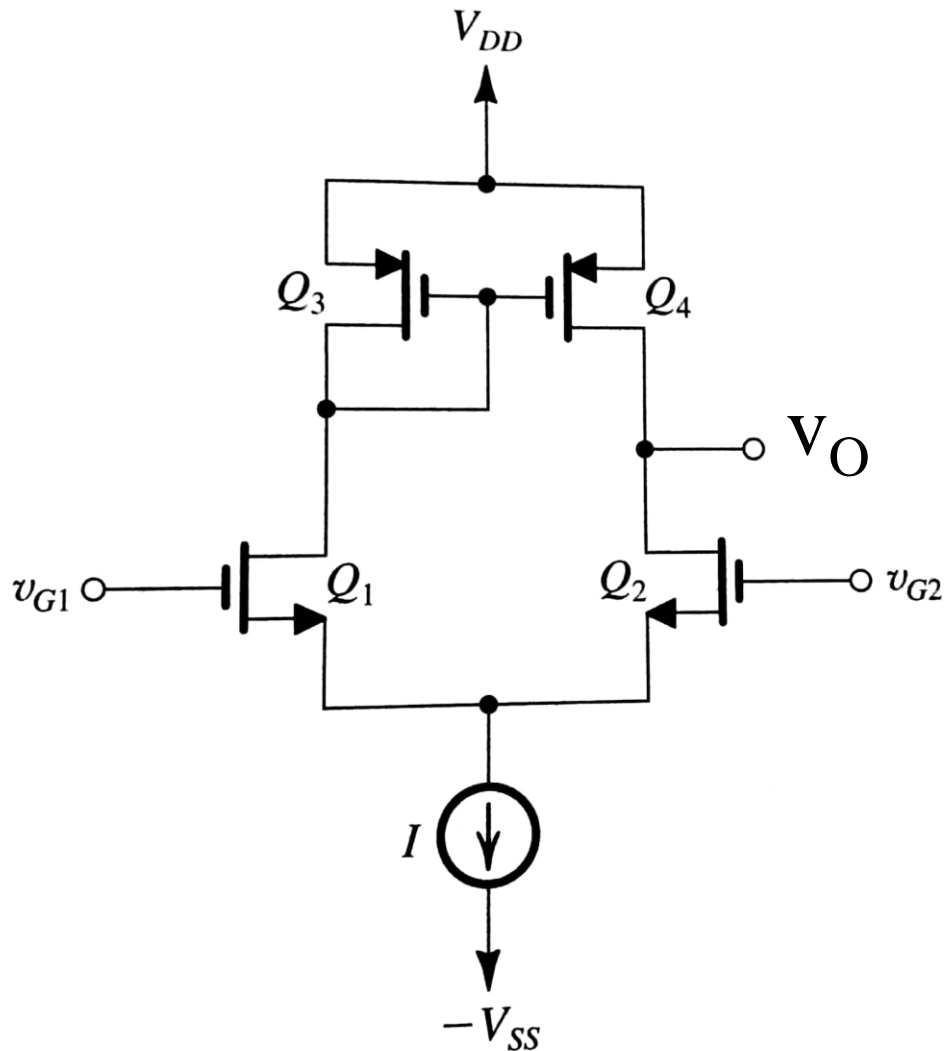
$$v_{O2}/v_{id} = + gm.(R_D//r_o)/2$$



# Amplificador Diferencial

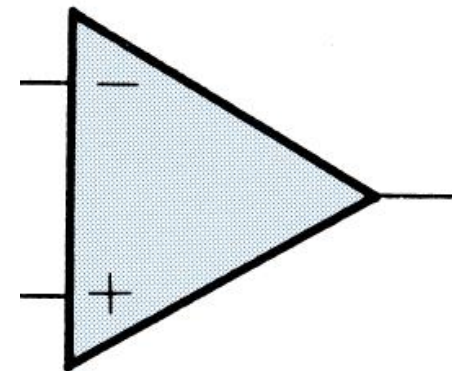
## Modo Diferencial com Carga Ativa

### Entrada diferencial e Saída simples



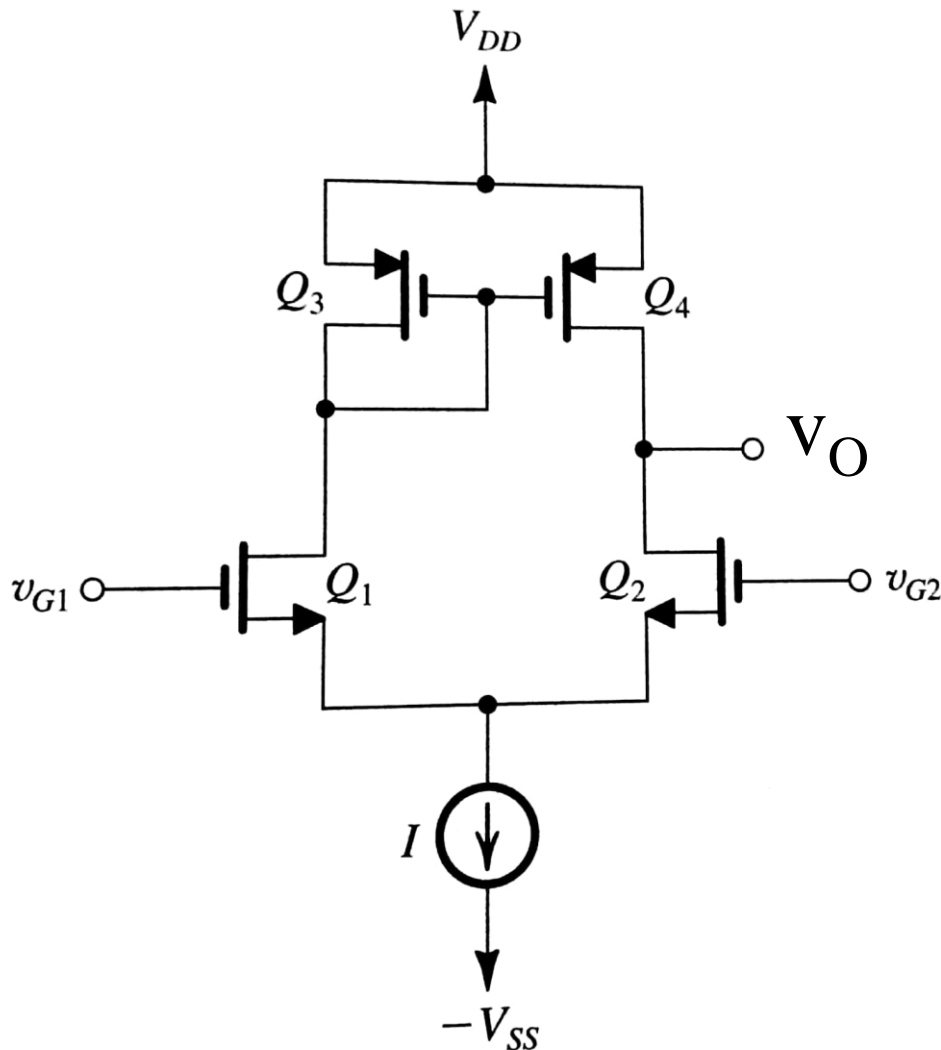
Vantagens da carga ativa:

- Maior ganho
- Menor área ocupada de C.I.



# Amplificador Diferencial com Carga Ativa

## Entrada diferencial e Saída simples



$$V_{id} = V_{G1} - V_{G2}$$

$$A_d = v_O / v_{id} = G_m \cdot R_O$$

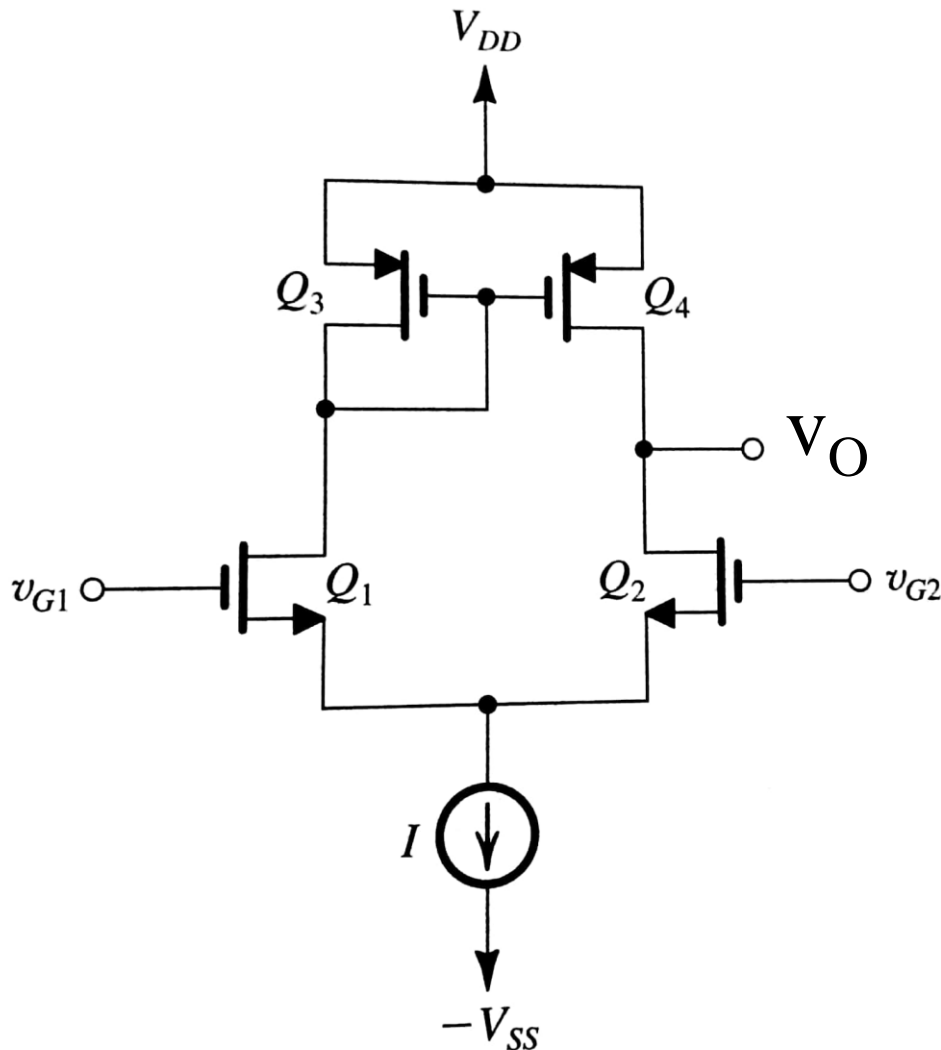
$G_m$  = transcondutância de curto circuito

$R_o$  = resistência de saída

# Amplificador Diferencial

## com Carga Ativa

### Entrada diferencial e Saída simples



$$V_{id} = V_{G1} - V_{G2}$$

$$A_d = v_O / v_{id} = G_m \cdot R_O$$

$G_m$  = transcondutância de curto circuito

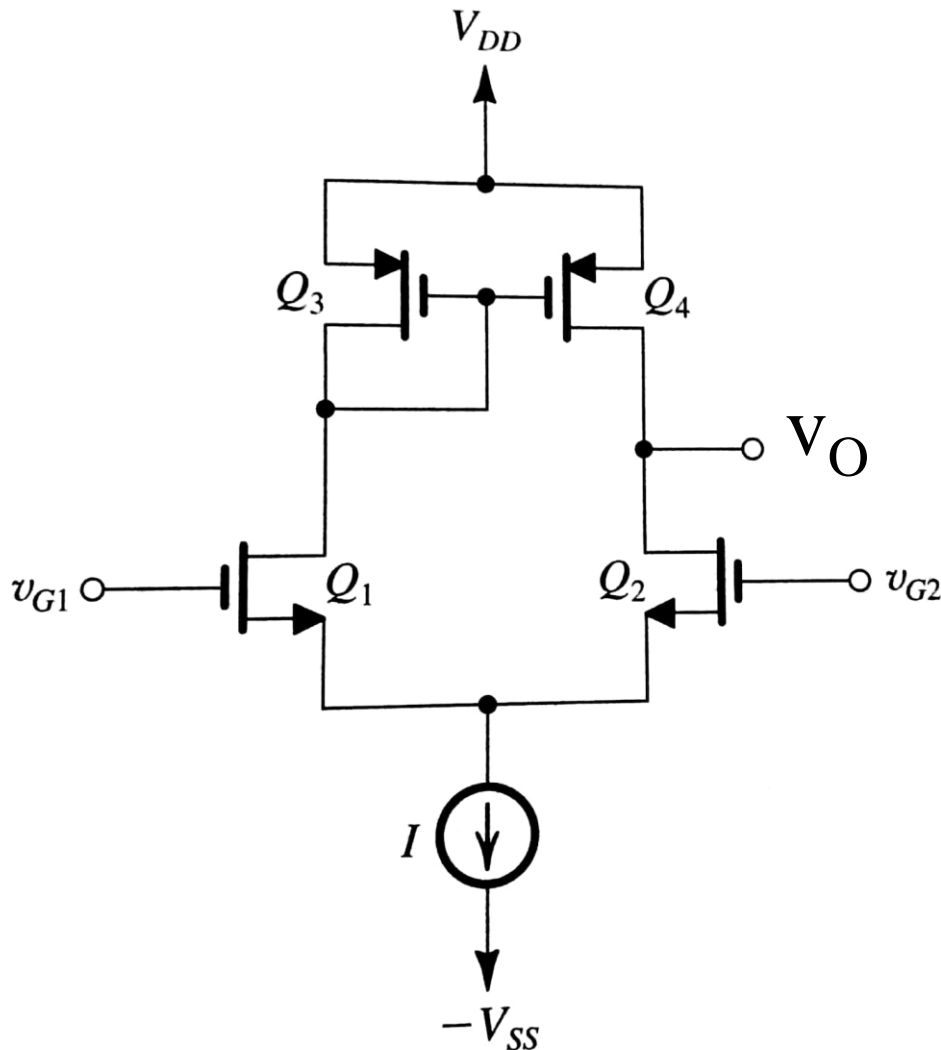
( $G_m = g_{m1} = g_{m2} = g_m$ )

$R_O$  = resistência de saída ( $R_O = r_{O2} // r_{O4}$ )



# Amplificador Diferencial com Carga Ativa

Entrada diferencial e Saída simples



$$v_{id} = v_{G1} - v_{G2}$$

$$A_d = v_O / v_{id} = g_{m1} \cdot (r_{O2} // r_{O4})$$

Para  $r_{O2} = r_{O4} = r_O$ :

$$A_d = v_O / v_{id} = g_{m1} \cdot (1/2) \cdot r_O$$

# Amplificador Diferencial

## Modo Comum (com Carga Passiva - $R_D$ )

**REVISÃO**

Ganho em modo comum

Saída única (dreno e terra):

$$A_{cm} = v_{O1}/v_{icm} = -R_D/(1/gm + 2.R_{SS})$$

Geralmente  $R_{SS} \gg 1/gm$

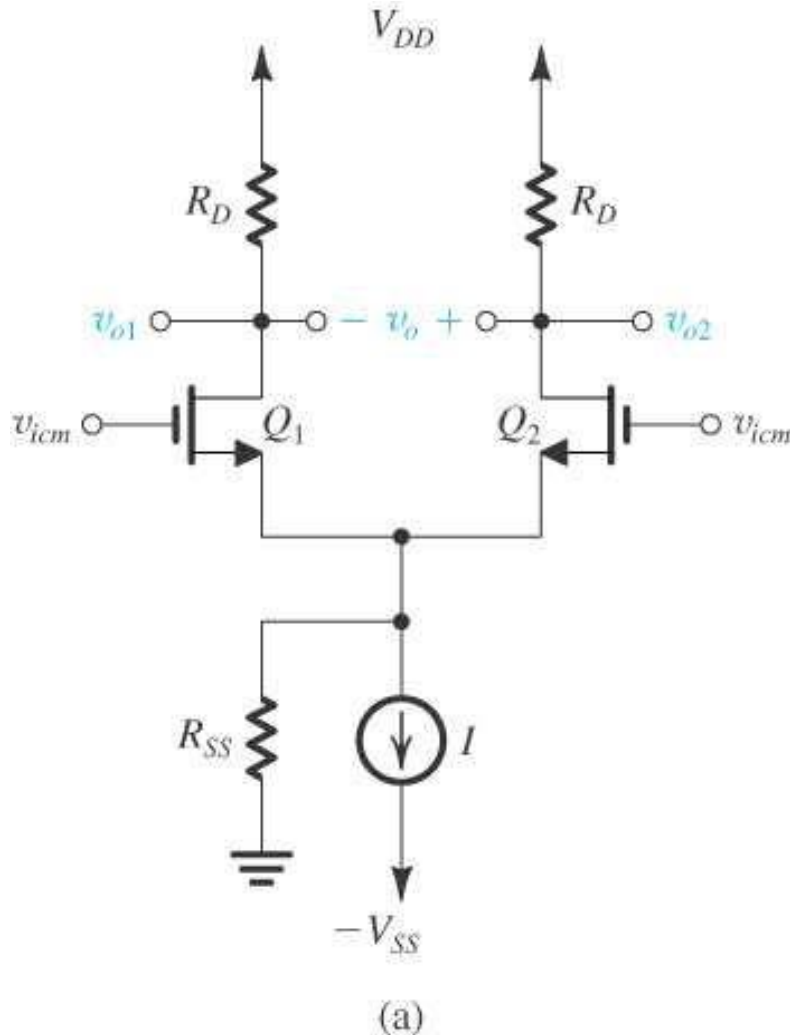
$$A_{cm} = v_{O1}/v_{icm} \cong -R_D/(2.R_{SS})$$

$$A_{cm} = v_{O2}/v_{icm} \cong -R_D/(2.R_{SS})$$

Saída diferencial:

$$A_{cm} = v_O/v_{icm} = (v_{O2} - v_{O1})/v_{icm}$$

$$A_{cm} = v_O/v_{icm} = 0$$



# Amplificador Diferencial

## Modo Comum (com Carga Passiva - $R_D$ )

**REVISÃO**

Ganho em modo comum

Saída única (dreno e terra):

$$A_{cm} = v_{O1}/v_{icm} = -R_D/(1/g_m + 2.R_{SS})$$

Geralmente  $R_{SS} \gg 1/g_m$

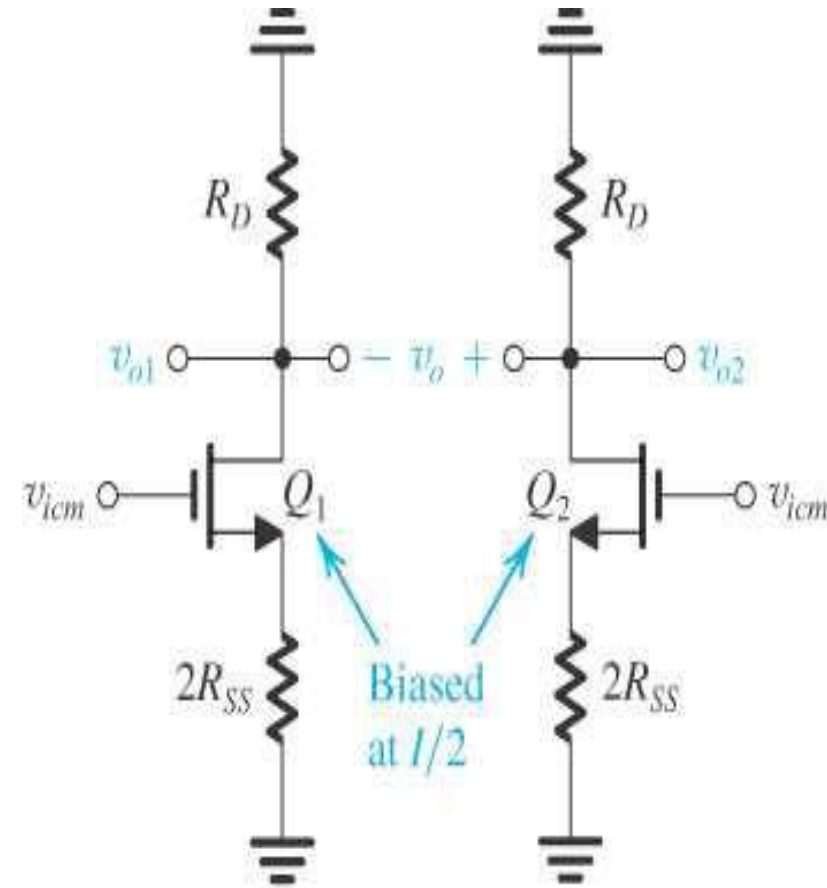
$$A_{cm} = v_{O1}/v_{icm} \cong -R_D/(2.R_{SS})$$

$$A_{cm} = v_{O2}/v_{icm} \cong -R_D/(2.R_{SS})$$

Saída diferencial:

$$A_{cm} = v_O/v_{icm} = (v_{O2} - v_{O1})/v_{icm}$$

$$A_{cm} = v_O/v_{icm} = 0$$

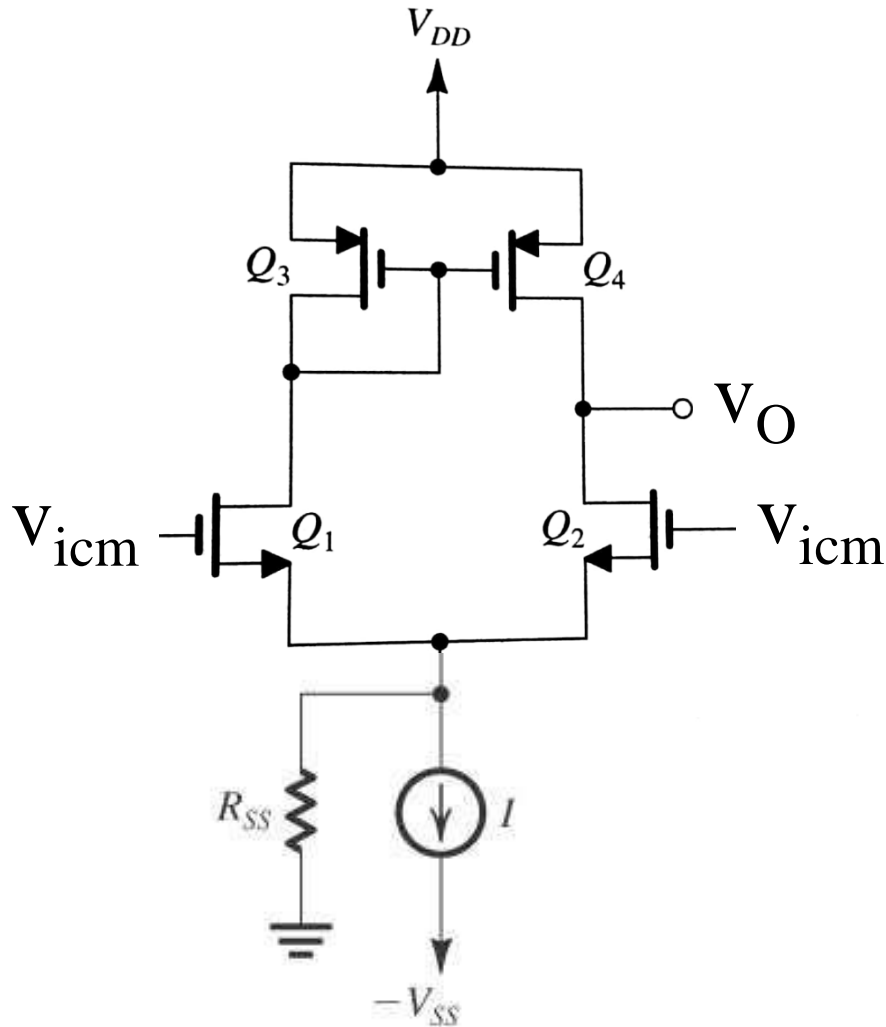


(b)

# Amplificador Diferencial

## Modo Comum com Carga Ativa

### Entrada em modo comum e Saída simples



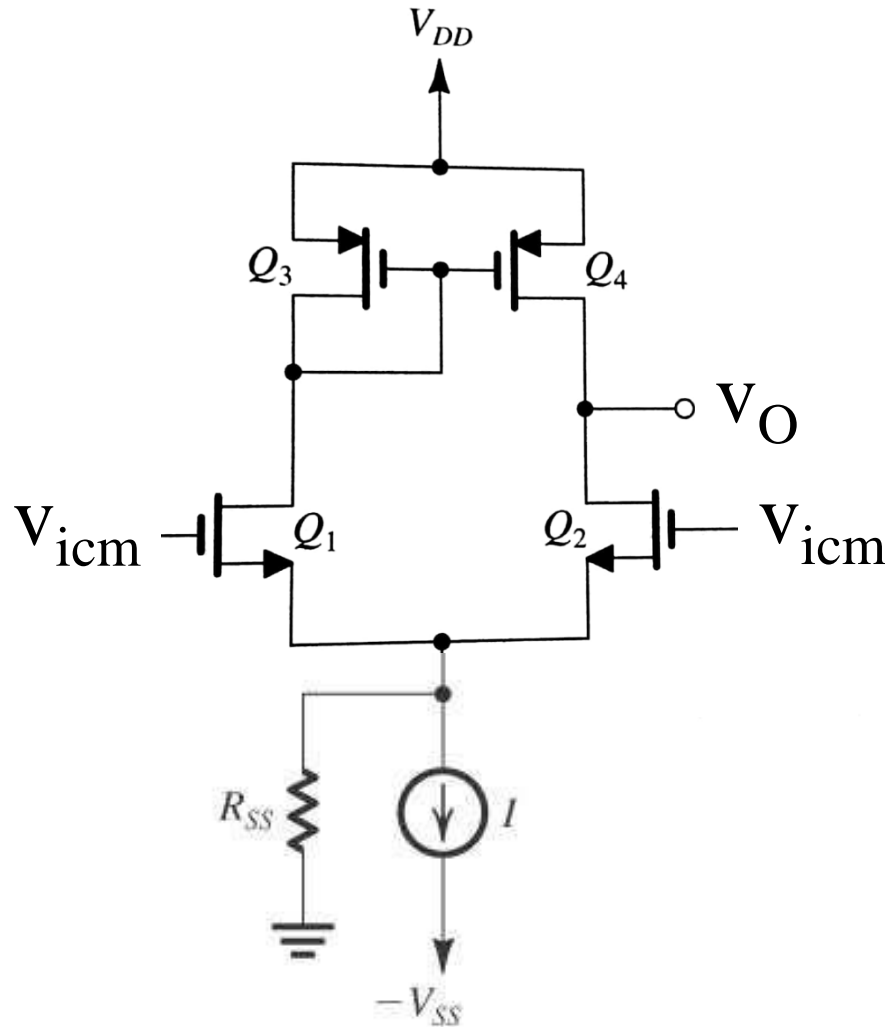
$$g_{m1} = g_{m2} \text{ e } g_{m3} = g_{m4}$$

$$A_{cm} = \frac{V_O}{V_{icm}} = ?$$

# Amplificador Diferencial

## Modo Comum com Carga Ativa

### Entrada em modo comum e Saída simples



$$g_{m1} = g_{m2} \text{ e } g_{m3} = g_{m4}$$

$$A_{cm} = \frac{V_O}{V_{icm}} = - \frac{1/g_{m3}}{(1/g_{m1} + 2.R_{SS})}$$

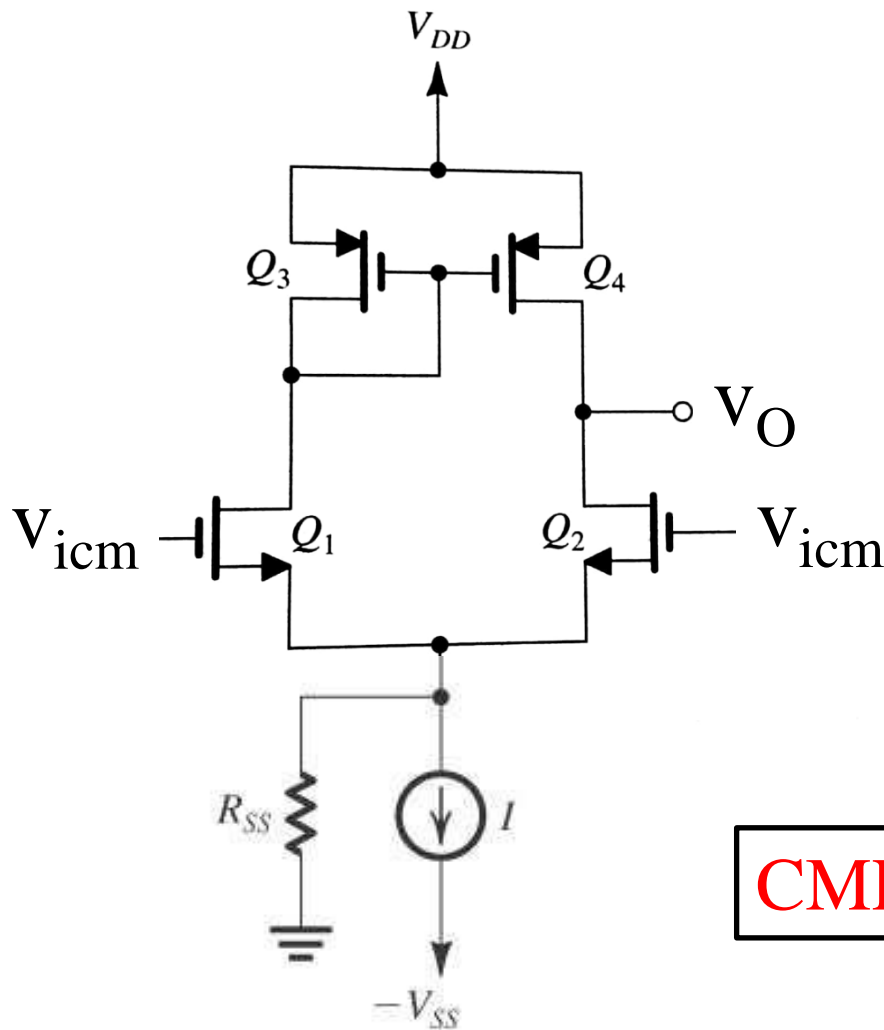
Geralmente  $R_{SS} \gg 1/g_m$

$$A_{cm} = - \frac{1/g_{m3}}{2.R_{SS}} = - \frac{1}{2.g_{m3}.R_{SS}}$$

# Amplificador Diferencial

## Modo Comum com Carga Ativa

### Entrada em modo comum e Saída simples



$$g_{m1} = g_{m2} \text{ e } g_{m3} = g_{m4}$$

$$A_{cm} = \frac{V_O}{V_{icm}} = - \frac{1/g_{m3}}{(1/g_{m1} + 2.R_{SS})}$$

Geralmente  $R_{SS} \gg 1/g_m$

$$A_{cm} = - \frac{1/g_{m3}}{2.R_{SS}} = - \frac{1}{2.g_{m3}.R_{SS}}$$

$$CMRR = |A_d / A_{cm}|$$

$$CMRR = (g_{m1}.r_{o2} // r_{o4}).(2.g_{m3}.R_{SS})$$

## Exercício 7.12 (pag. 456)

**7.12** Um amplificador diferencial MOS com carga ativa do tipo mostrado na Figura 7.28(a) é especificado da seguinte forma:  $(W/L)_n = 100$ ,  $(W/L)_p = 200$ ,  $\mu_n C_{ox} = 2\mu_p C_{ox} = 0,2 \text{ mA/V}^2$ ,  $V_{An} = |V_{Ap}| = 20 \text{ V}$ ,  $I = 0,8 \text{ mA}$ ,  $R_{SS} = 25 \text{ k}\Omega$ . Calcule  $G_m$ ,  $R_o$ ,  $A_d$ ,  $|A_{cm}|$  e CMRR.

**Resposta**  $4 \text{ mA/V}$ ;  $25 \text{ k}\Omega$ ;  $100 \text{ V/V}$ ;  $0,005 \text{ V/V}$ ;  $20.000$  ou  $86 \text{ dB}$ .