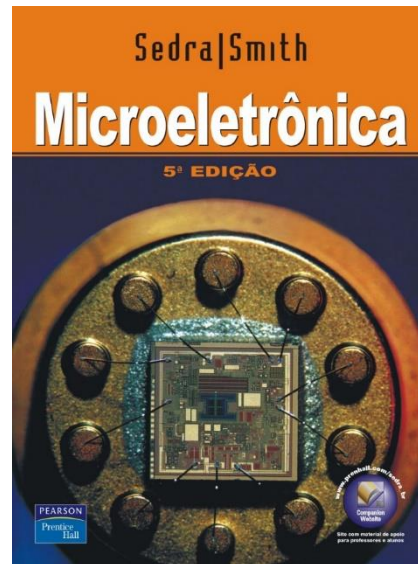


**AULA 4**

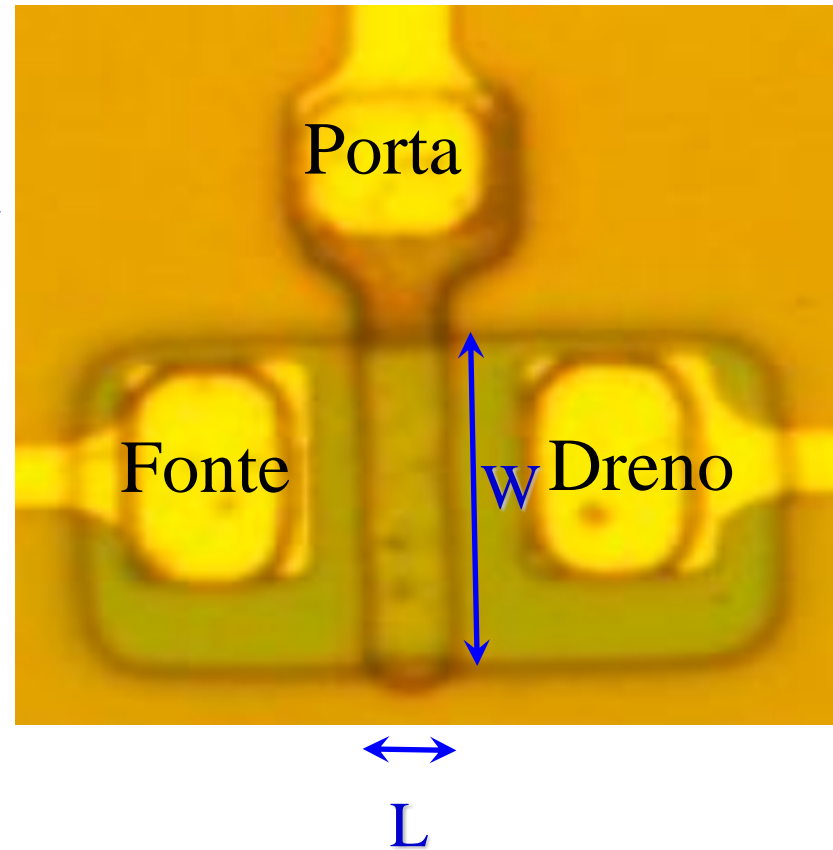
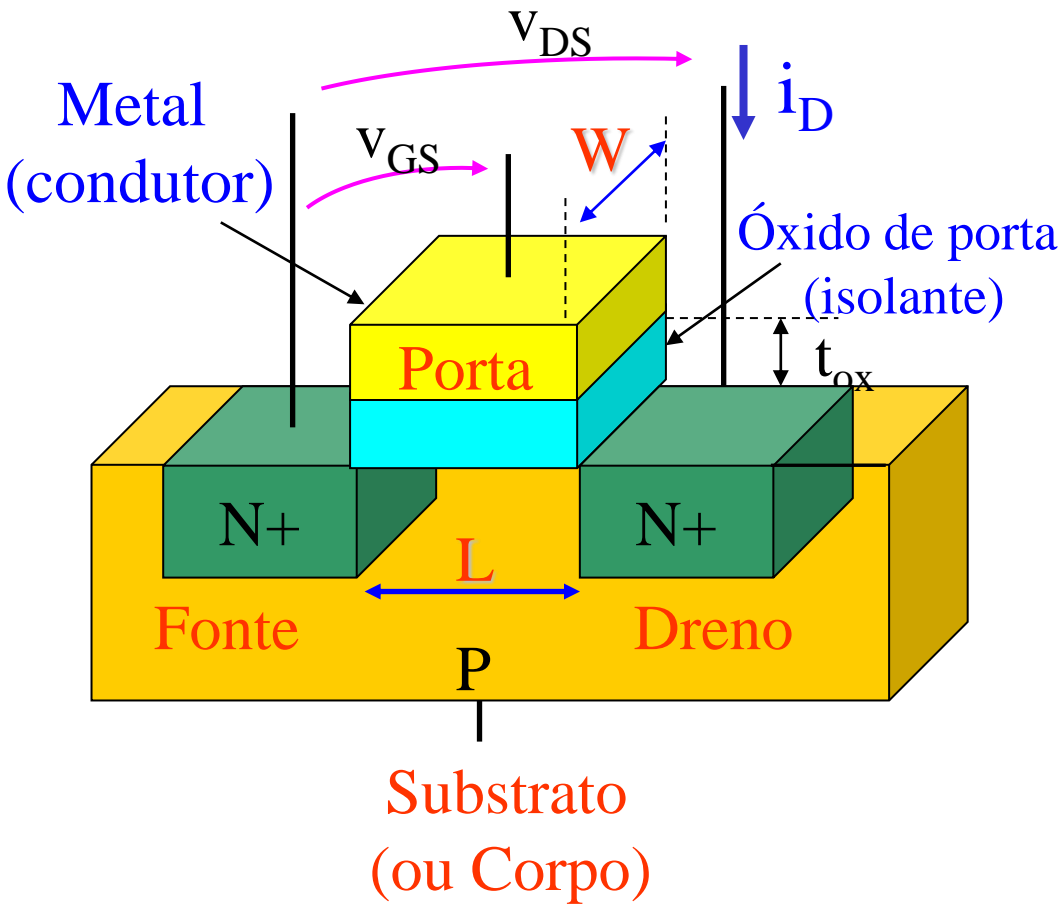


Características do MOSFET canal p, efeito de corpo, sumário, exercícios.

Sedra, Cap. 4  
p. 155-159

# NMOSFET

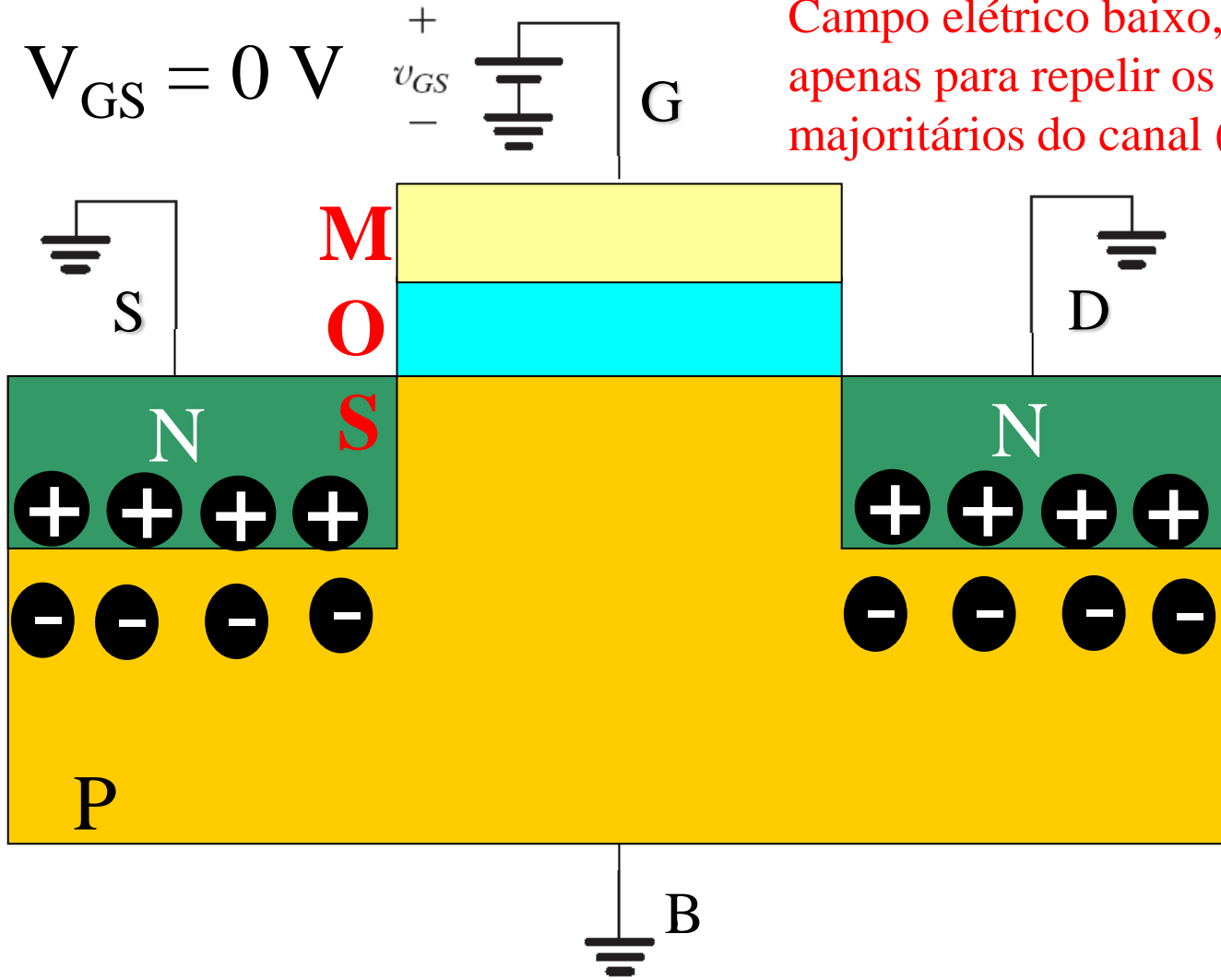
(Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor, canal N, tipo Enriquecimento)



# Transistor NMOS

$$V_{GS} = 0 \text{ e } V_{DS} = 0$$

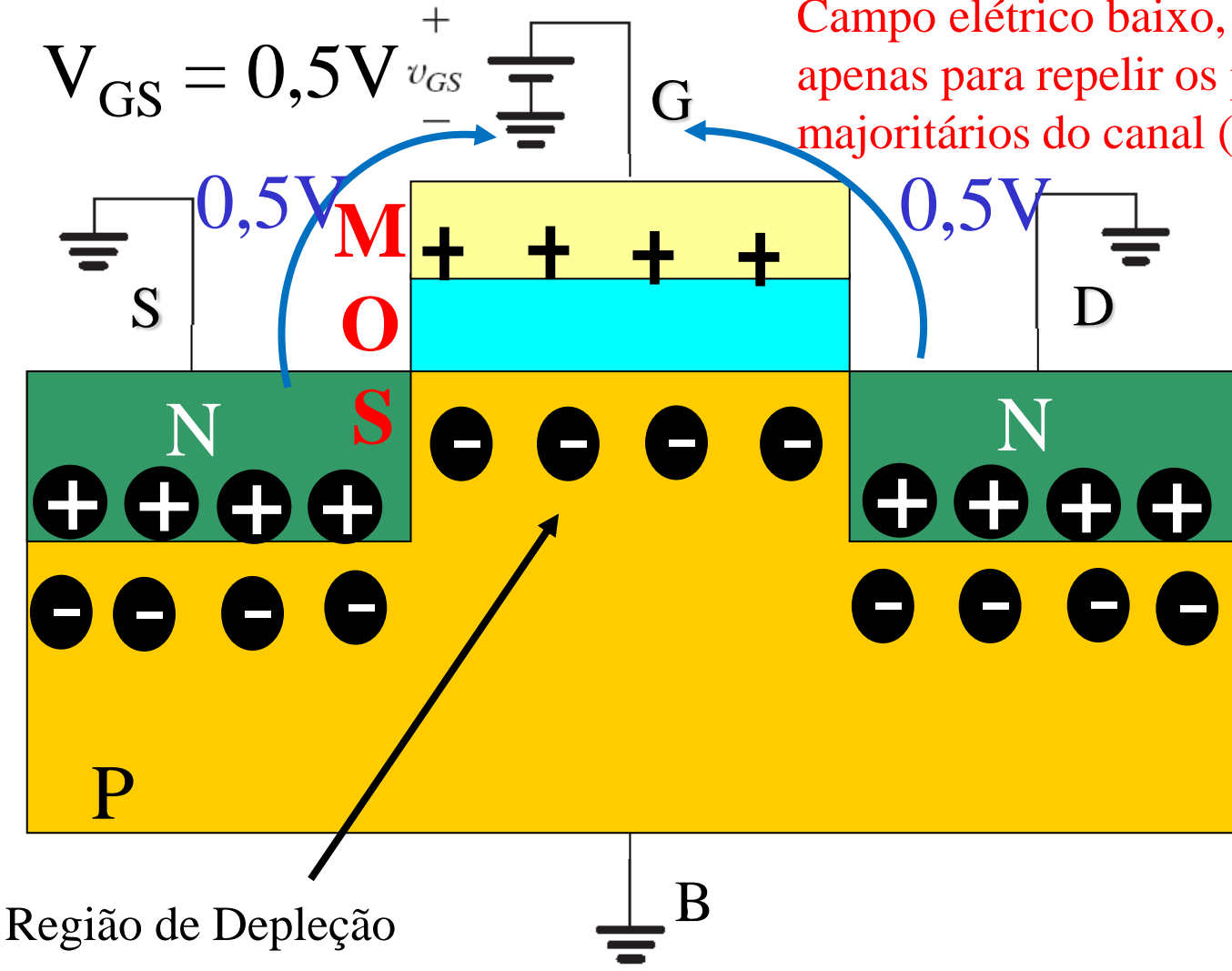
Campo elétrico baixo, suficiente apenas para repelir os portadores majoritários do canal (lacunas)



# Transistor NMOS

$$V_{GS} > 0 \text{ e } V_{DS} = 0$$

Campo elétrico baixo, suficiente apenas para repelir os portadores majoritários do canal (lacunas)

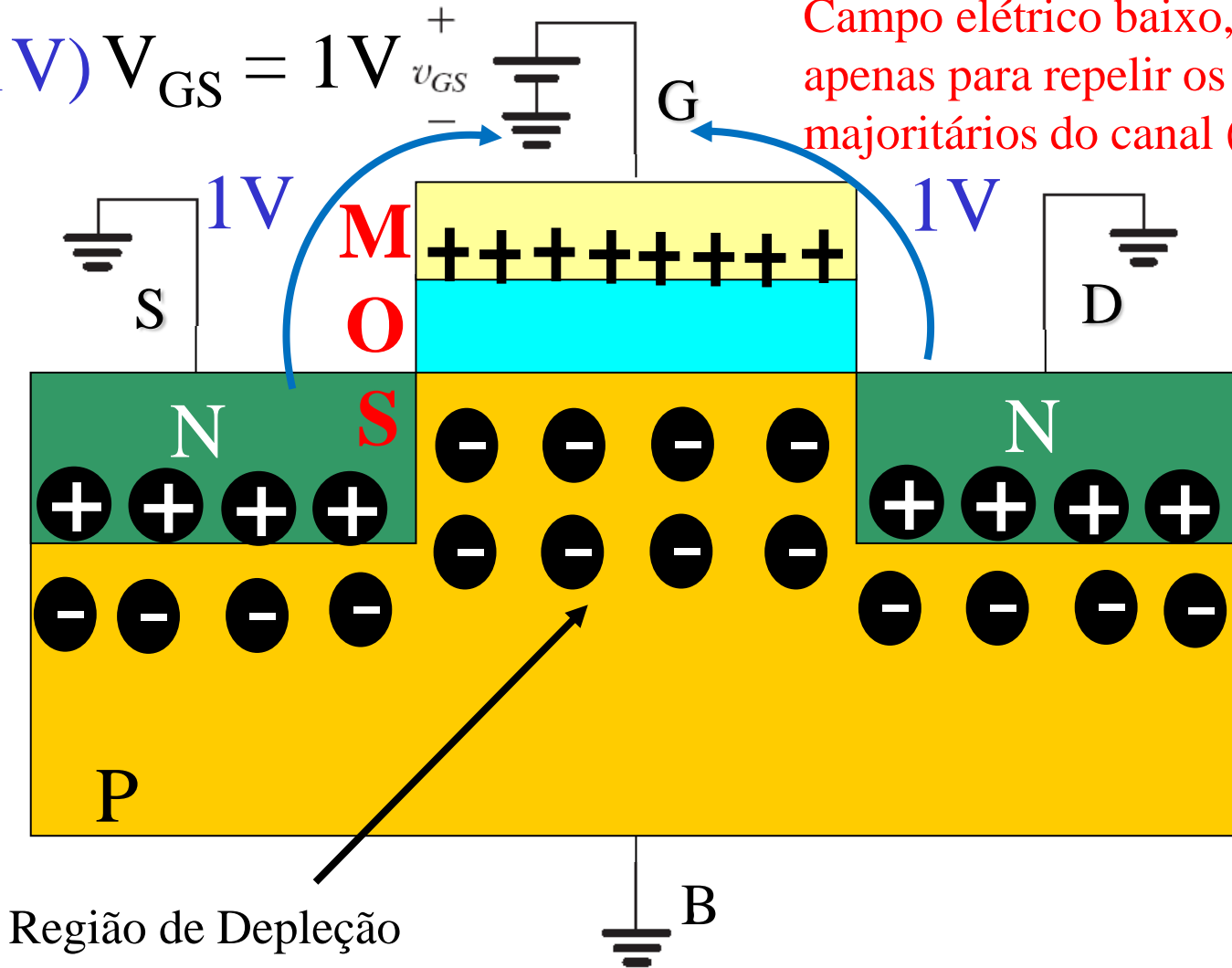


# Transistor NMOS

$$V_{GS} > 0 \text{ e } V_{DS} = 0$$

$$(V_t \cong 1V) V_{GS} = 1V$$

Campo elétrico baixo, suficiente apenas para repelir os portadores majoritários do canal (lacunas)



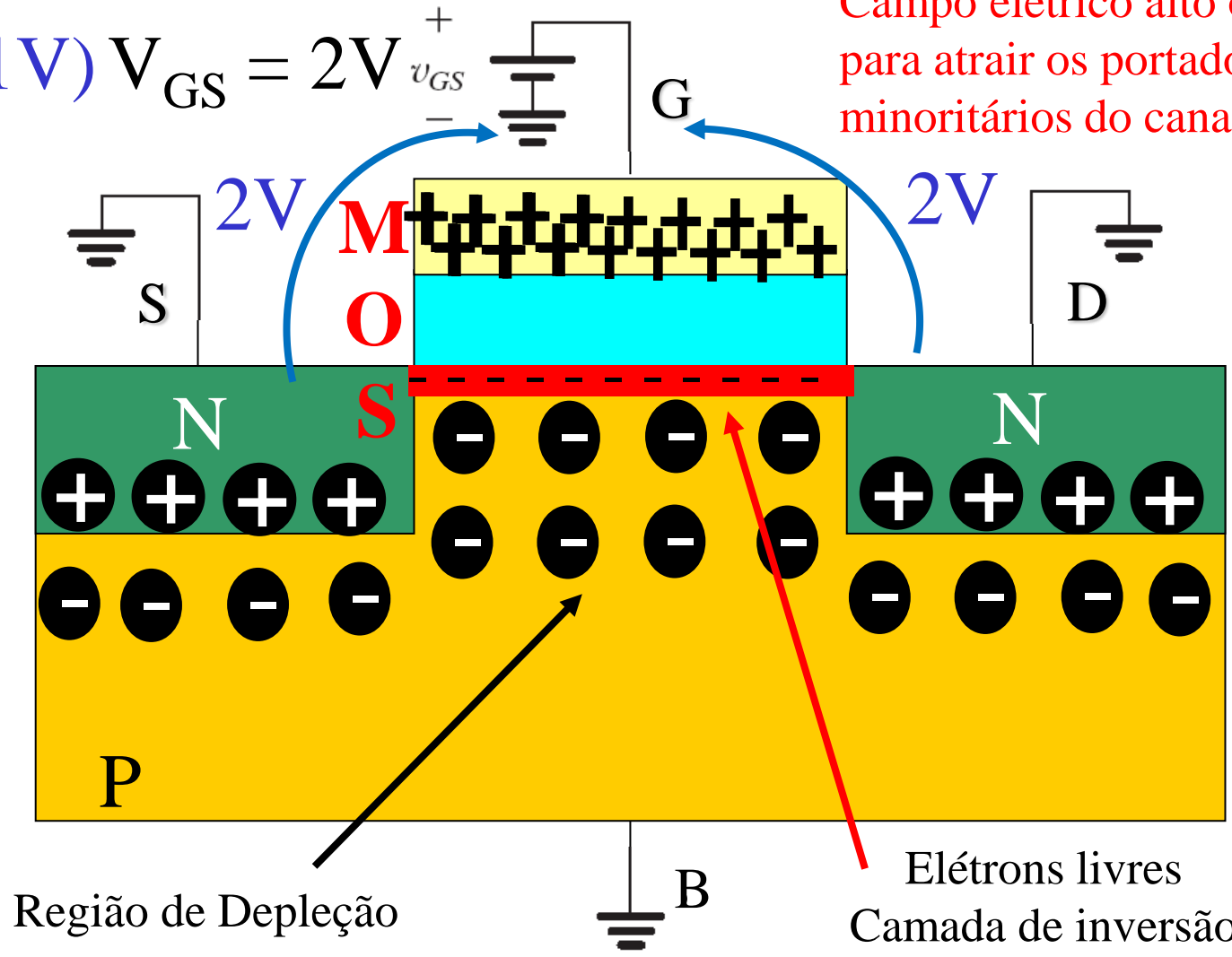
# Transistor NMOS

$V_{GS} > V_t$  (tensão de limiar) e  $V_{DS} = 0$

$(V_t \cong 1V)$

$V_{GS} = 2V$

Campo elétrico alto o suficiente para atrair os portadores minoritários do canal (elétrons)

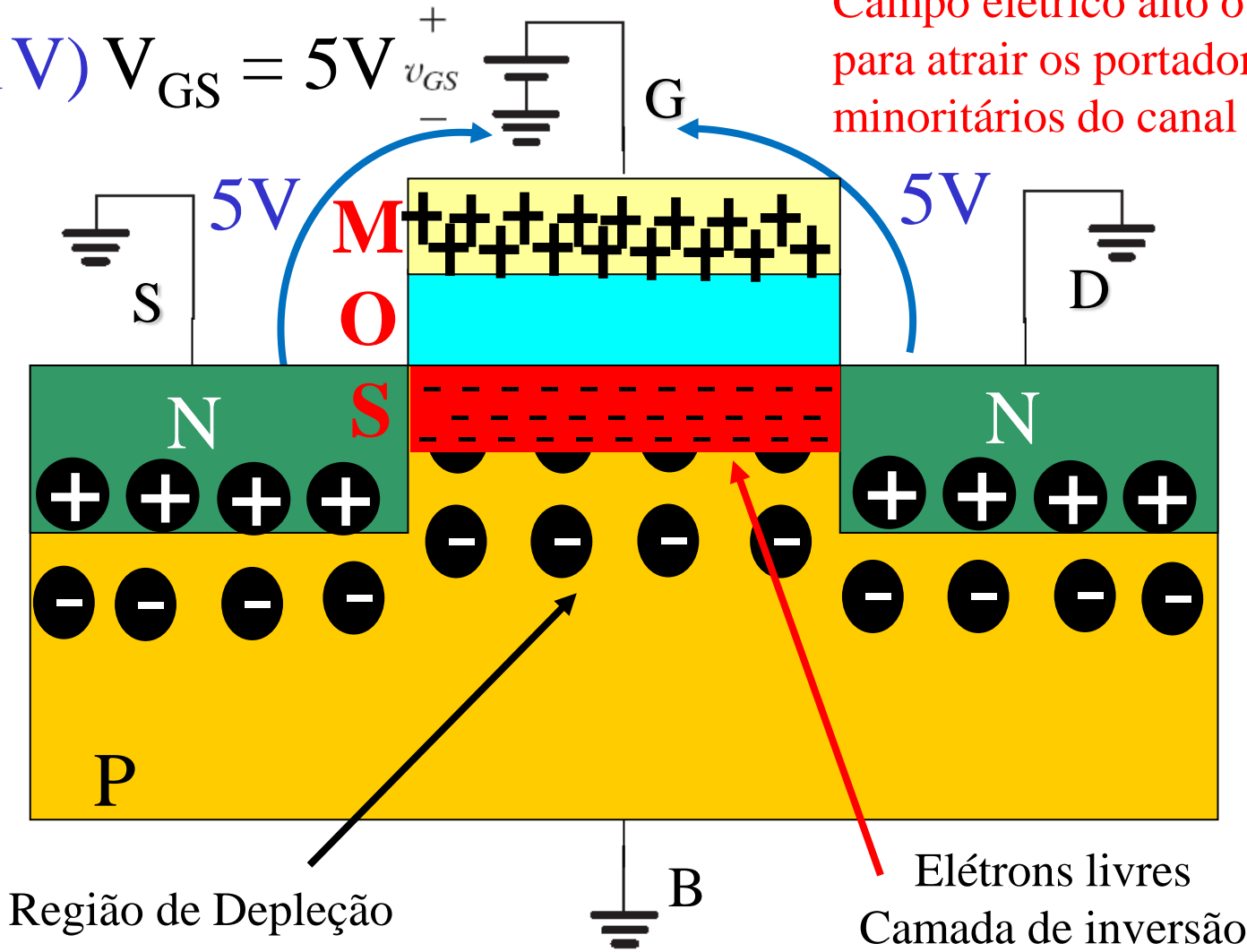


# Transistor NMOS

$V_{GS} \gg V_t$  (tensão de limiar) e  $V_{DS} = 0$

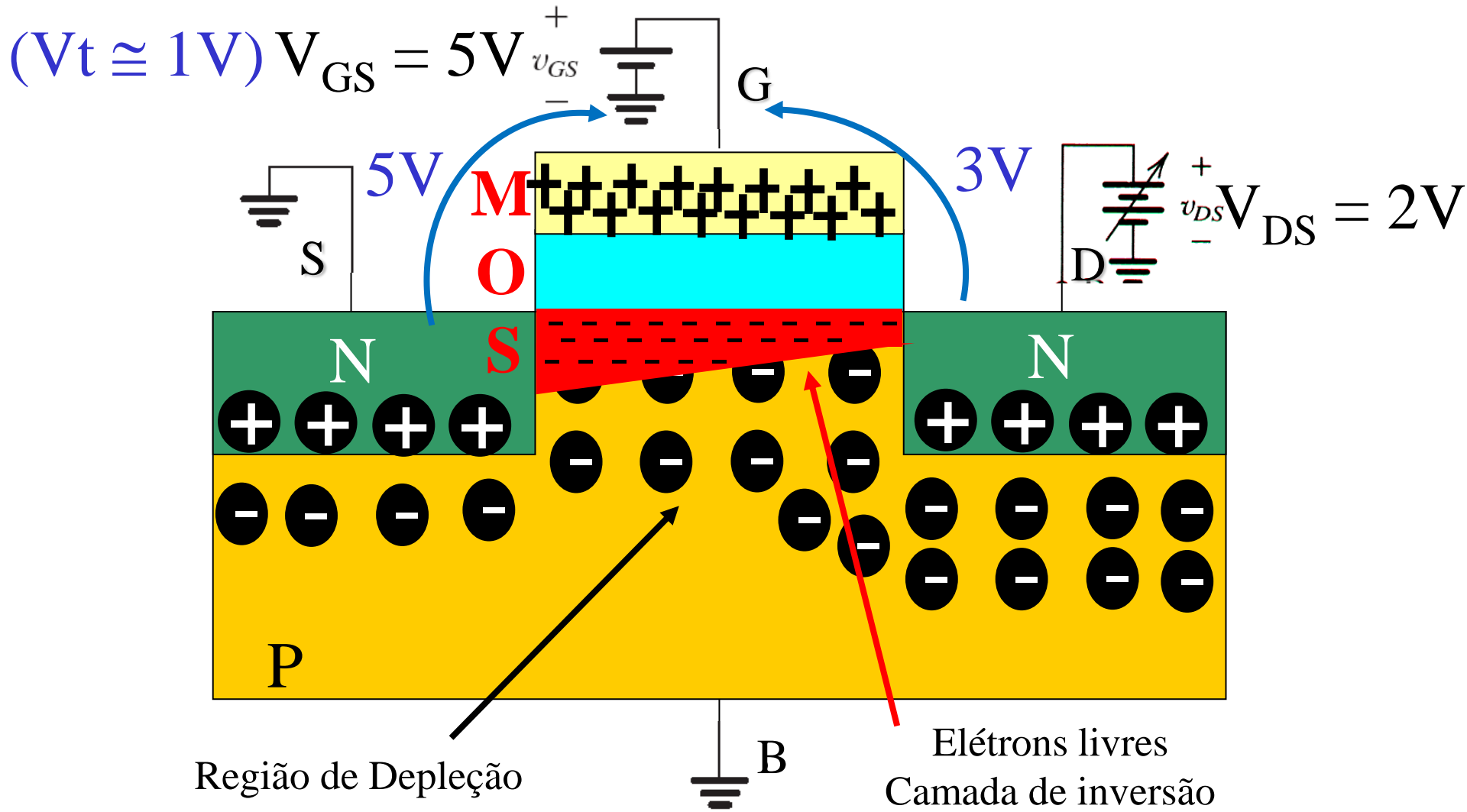
$(V_t \cong 1V) V_{GS} = 5V$

Campo elétrico alto o suficiente para atrair os portadores minoritários do canal (elétrons)



# Transistor NMOS

$V_{DS} < V_{GS} - V_t$  (Região de triodo)



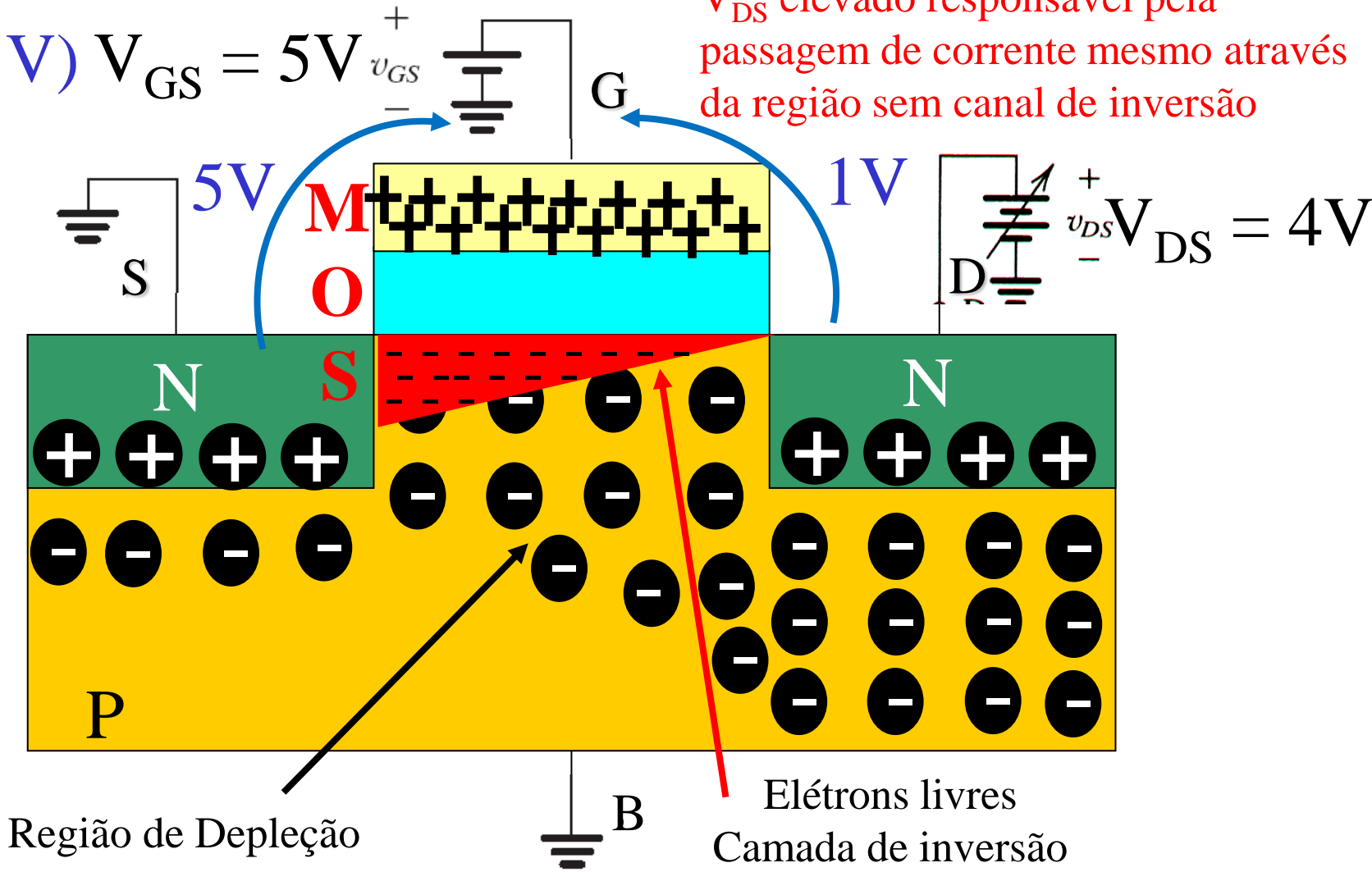


# Transistor NMOS

$$V_{DS} = V_{GS} - V_t \text{ (Triodo/Saturação)}$$

$$(V_t \cong 1V) V_{GS} = 5V$$

$V_{DS}$  elevado responsável pela passagem de corrente mesmo através da região sem canal de inversão

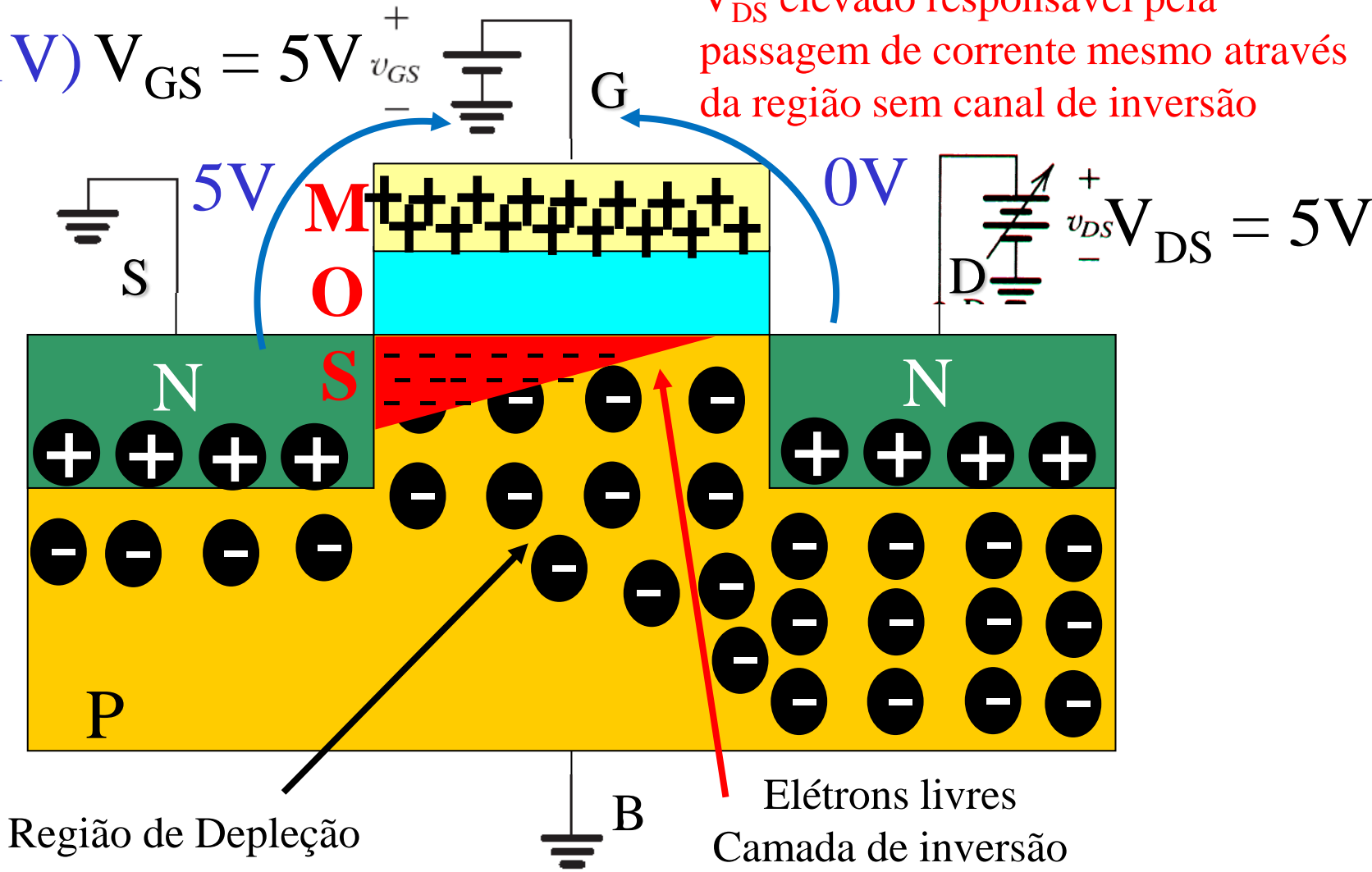


# Transistor NMOS

$V_{DS} > V_{GS} - V_t$  (Região de Saturação)

$(V_t \cong 1V) V_{GS} = 5V$

$V_{DS}$  elevado responsável pela passagem de corrente mesmo através da região sem canal de inversão



# Transistor NMOS

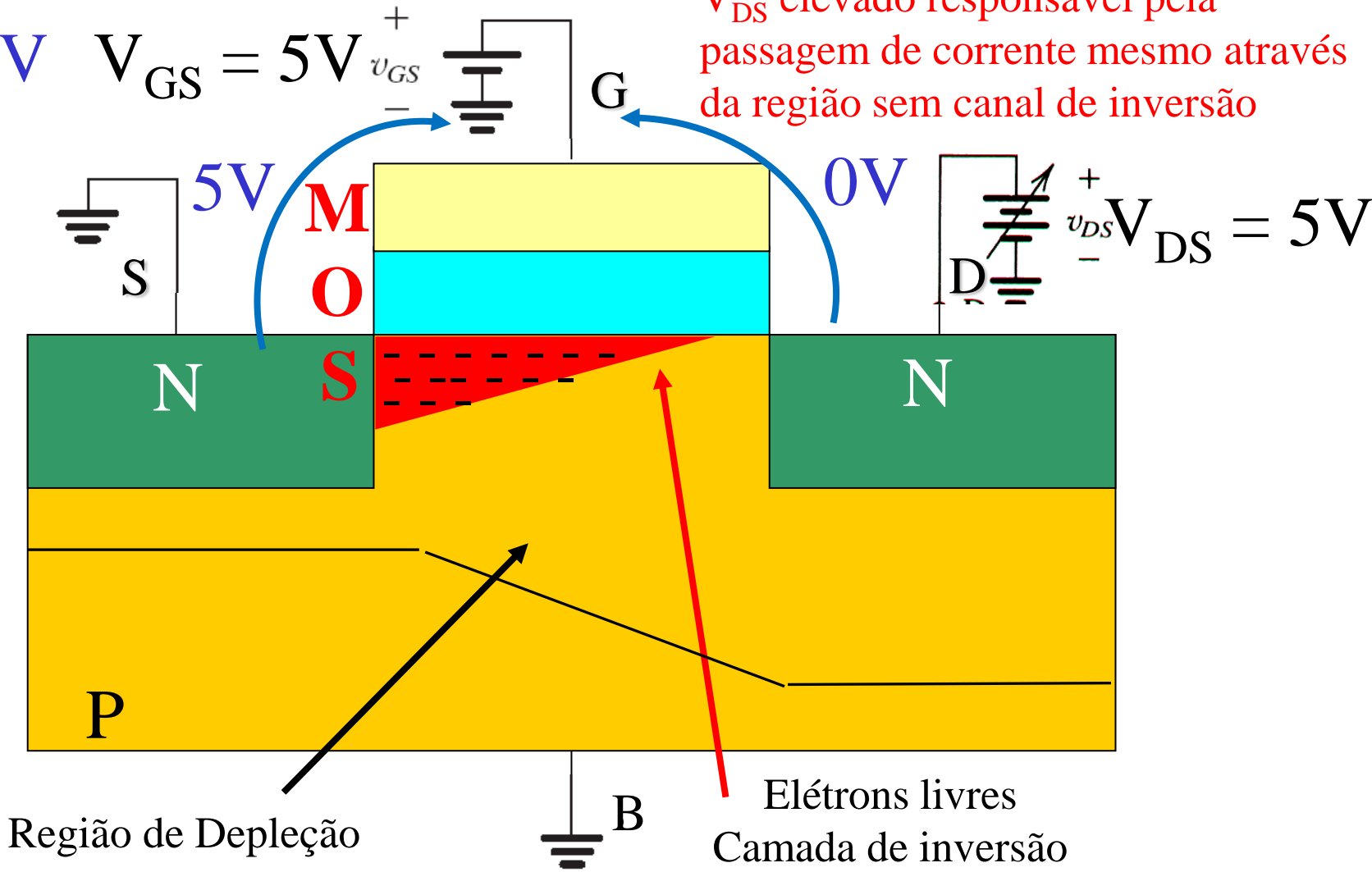
$V_{DS} > V_{GS} - V_t$  (Região de Saturação)

$V_t \cong 1V$

$V_{GS} = 5V$



$V_{DS}$  elevado responsável pela passagem de corrente mesmo através da região sem canal de inversão



# NMOSFET

## Modelo de $i_D = f(v_{GS}, v_{DS})$ de 1ª Ordem

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

$$i_D = 0$$

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

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

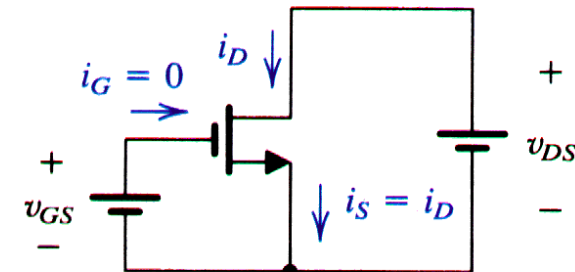
- **Região de Saturação:**  $0 < v_{GS} - V_t \leq v_{DS}$

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

onde

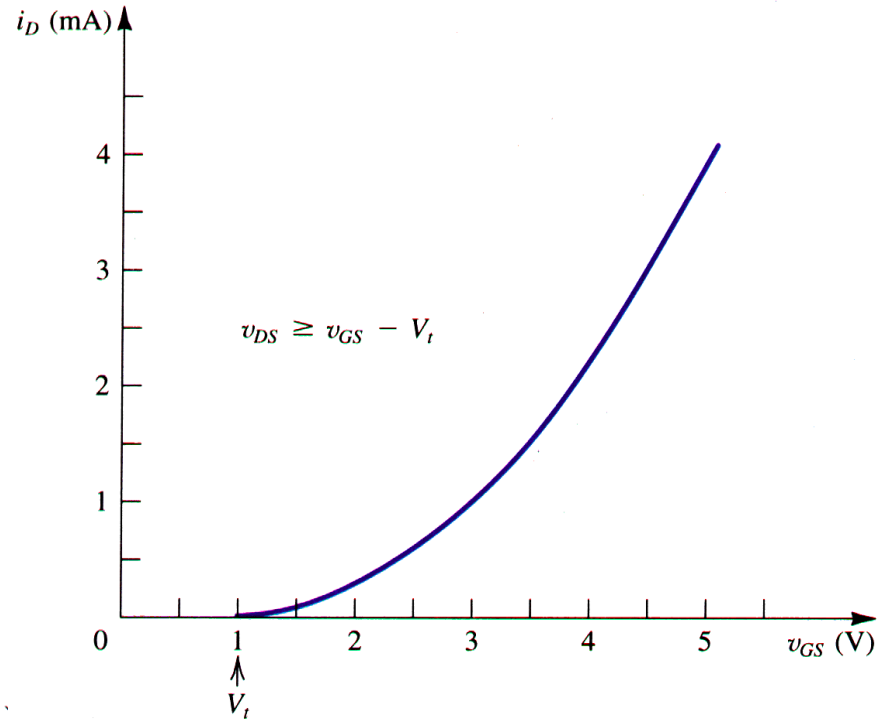
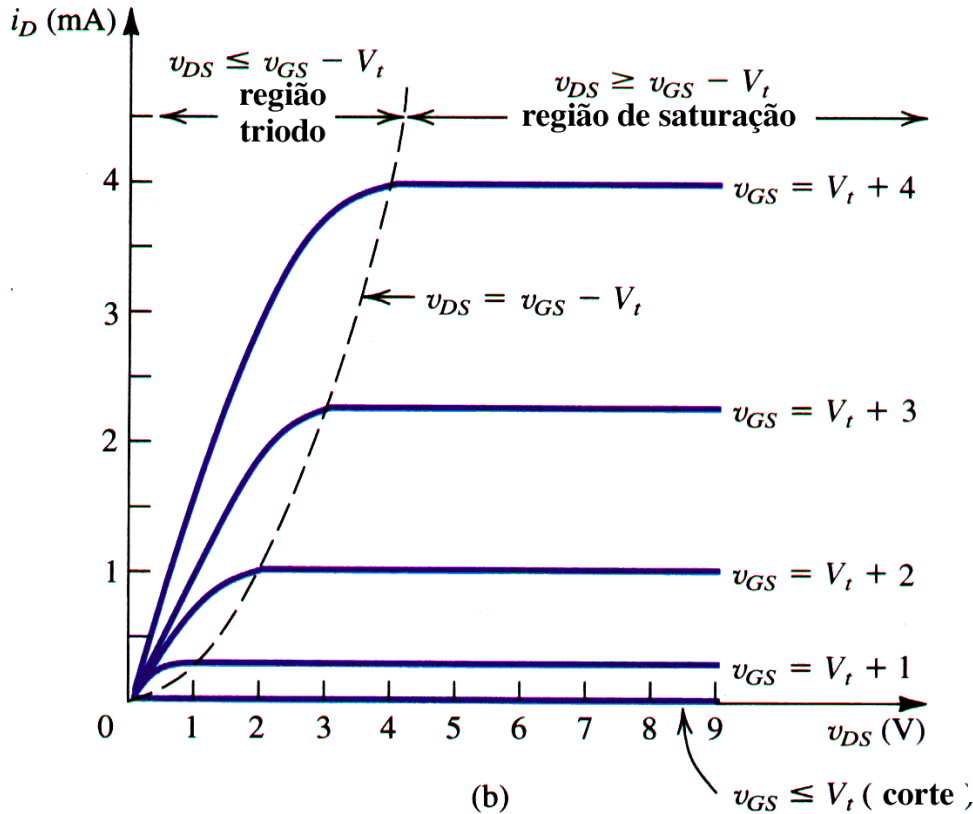
$$k'_n = \frac{\mu_n \epsilon_{OX}}{t_{OX}} = \mu_n \cdot C_{OX}$$

Parametro de Transcondutância  
do processo [A/V<sup>2</sup>]



$$\begin{aligned} V_t &> 0 \\ V_{GS} &> 0 \\ V_{DS} &> 0 \end{aligned}$$

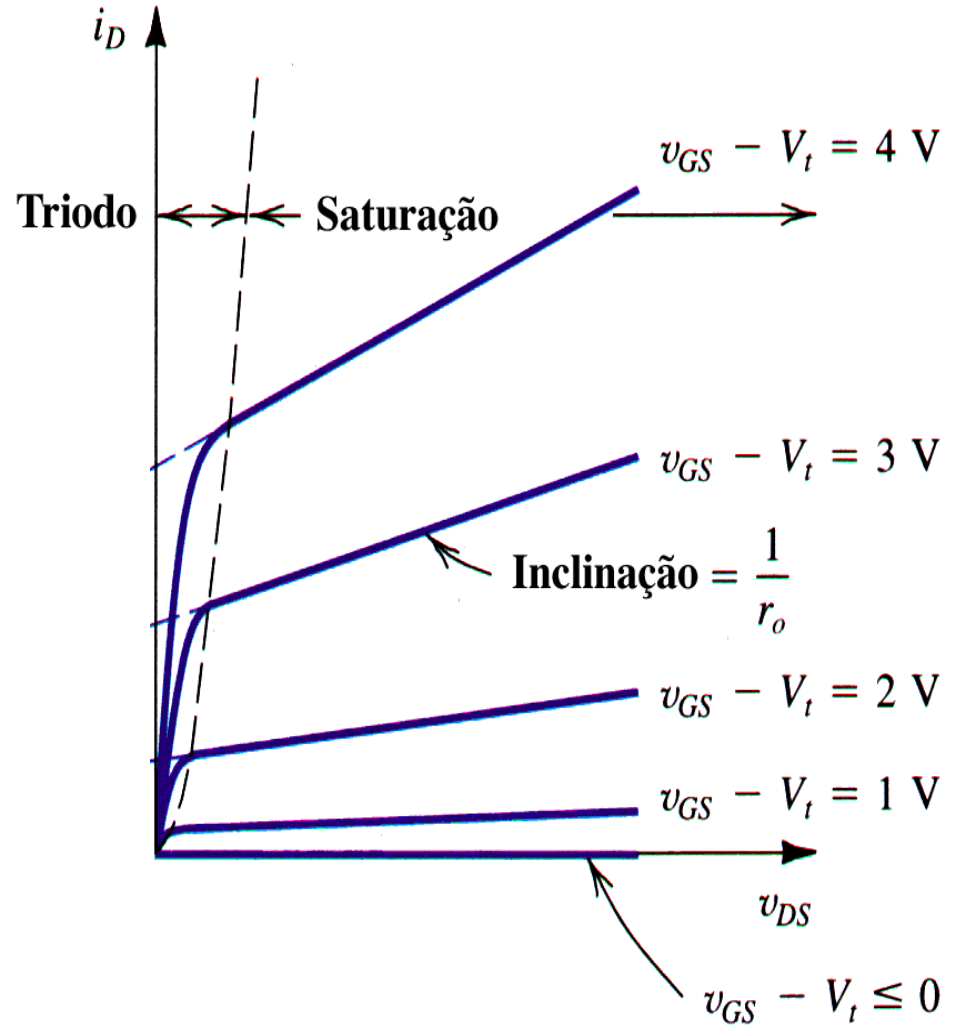
# Características de Corrente-Tensão de um NMOSFET



## Alunos de PSI3322

Vamos agora incrementar o modelo de primeira ordem do NMOS

# A Resistência de Saída Finita na Saturação (modulação do comprimento de canal)



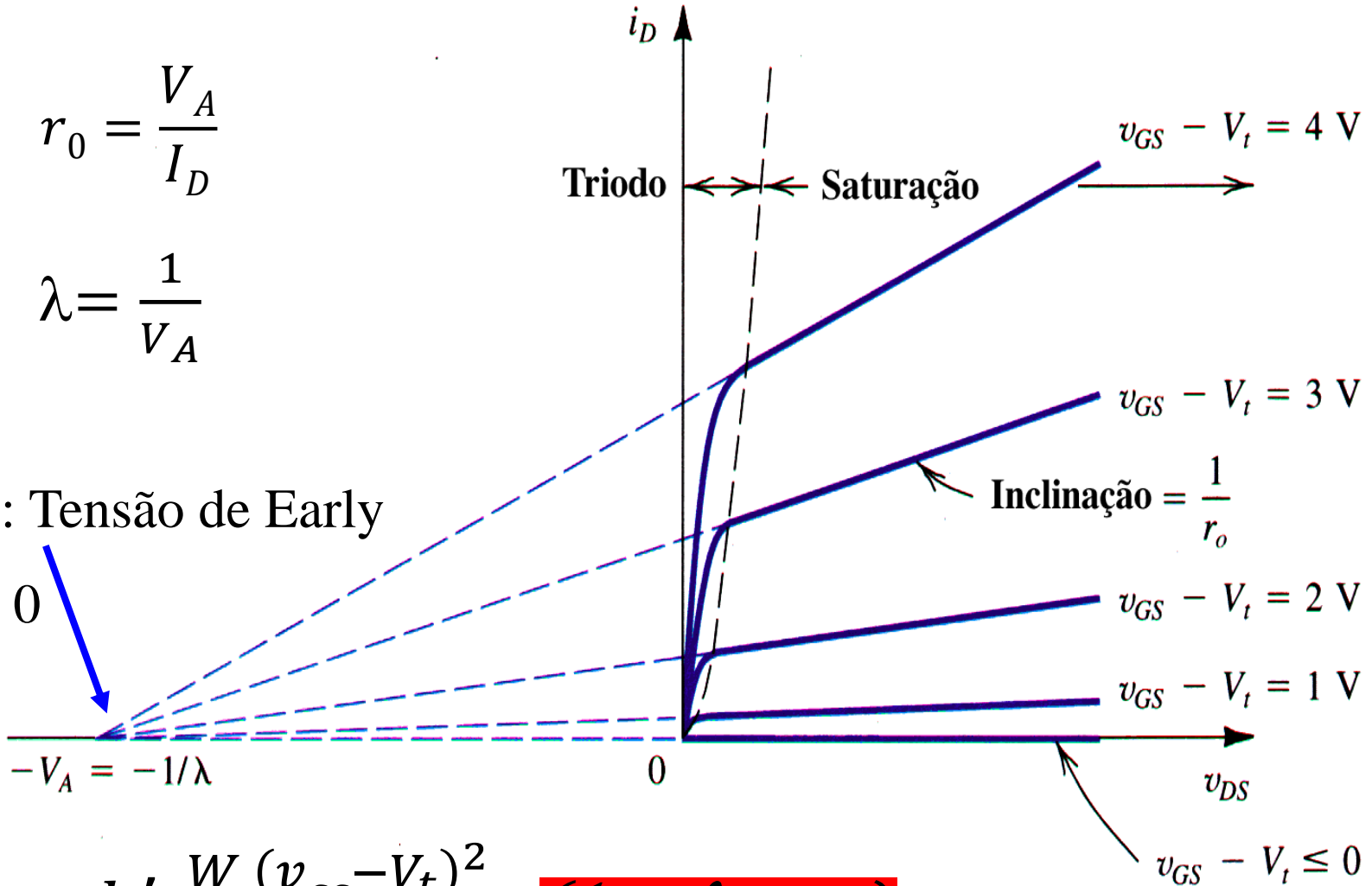
# A Resistência de Saída Finita na Saturação (modulação do comprimento de canal)

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

$$\lambda = \frac{1}{V_A}$$

$V_A$  : Tensão de Early

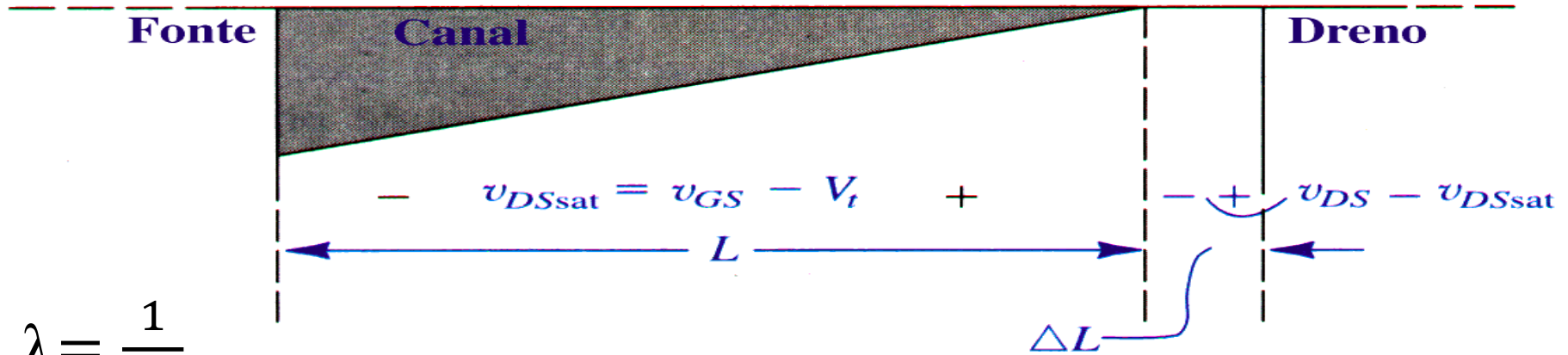
$V_A > 0$



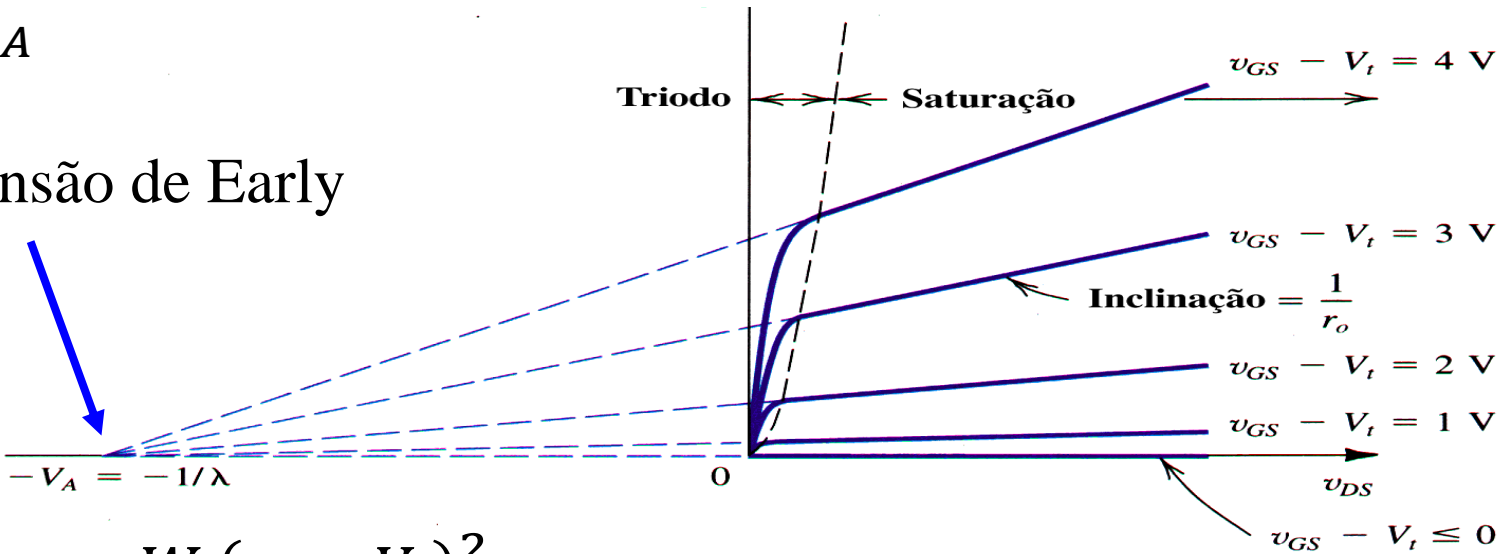
$$i_D = k'_n \frac{W}{L} \frac{(v_{GS} - V_t)^2}{2} \cdot (1 + \lambda \cdot v_{DS})$$



# A Resistência de Saída Finita na Saturação (modulação do comprimento de canal)



$V_A$  : Tensão de Early  
 $V_A > 0$



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

# NMOSFET

## Modelo de $i_D = f(v_{GS}, v_{DS})$

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

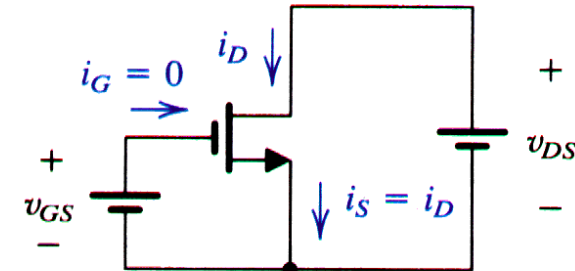
$$i_D = 0$$

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

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



$$\begin{aligned} V_t &> 0 \\ V_{GS} &> 0 \\ V_{DS} &> 0 \\ V_A &> 0 \end{aligned}$$

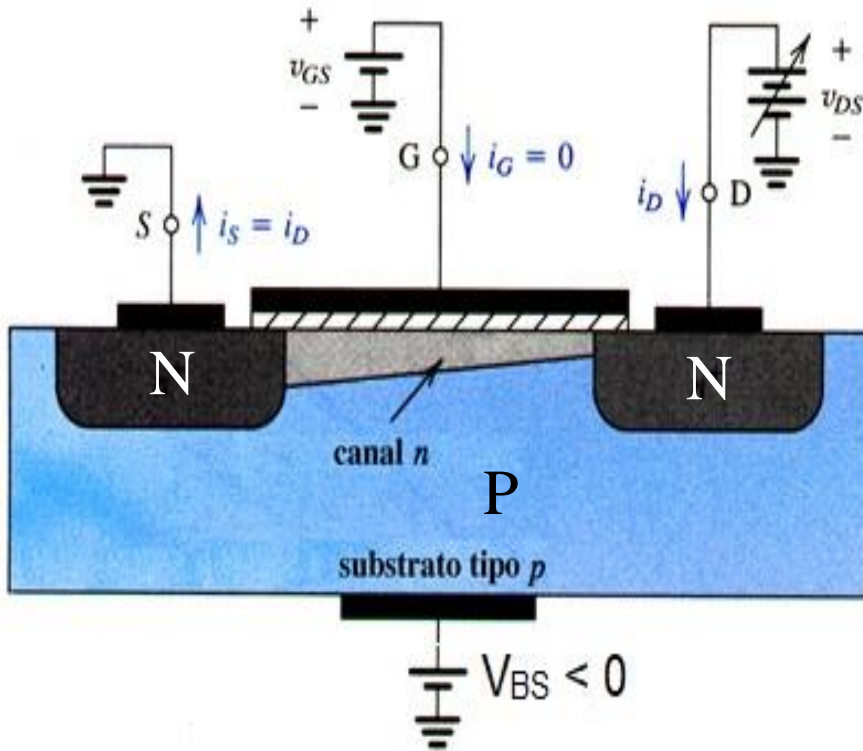
onde  $k'_n = \frac{\mu_n \epsilon_{OX}}{t_{OX}} = \mu_n \cdot C_{OX}$

$$\lambda = \frac{1}{V_A}$$

$V_A$  tensão Early

# O Efeito de Corpo (Substrato)

- Na maioria das aplicações o terminal da fonte é curto circuitado com o terminal de substrato, ou seja,  $V_{BS} = 0$ .
- Porém em um circuito integrado que tem apenas um substrato e vários transistores, é possível que o terminal de substrato esteja em um potencial menor que o da fonte ( $V_{BS} < 0$ ). Polarização reversa sempre
- Neste caso, quanto maior for a diferença de potencial ( $V_{BS}$ ), maior será a tensão de limiar.

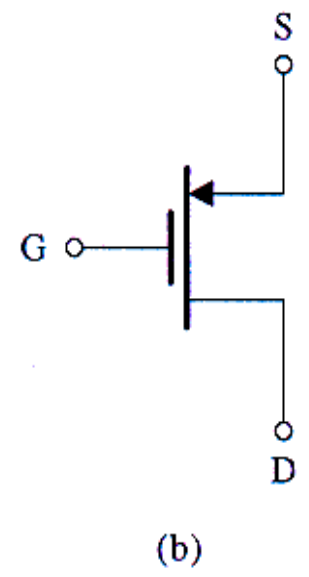
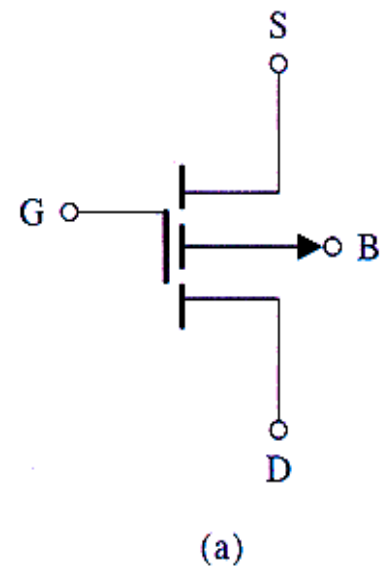
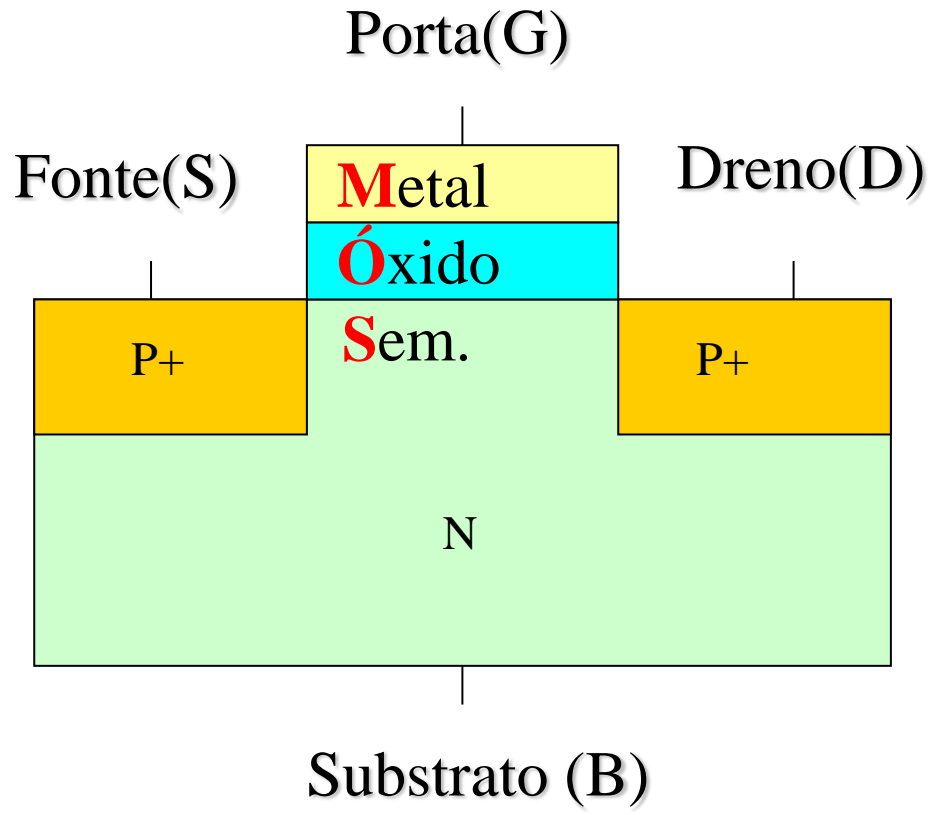


$$V_t(V_{BS}) - V_t(V_{BS} = 0) = \gamma(\sqrt{2\phi_F + |V_{BS}|} - \sqrt{2\phi_F})$$

$\phi_F$  = potencial de Fermi (0,3 a 0,4V)

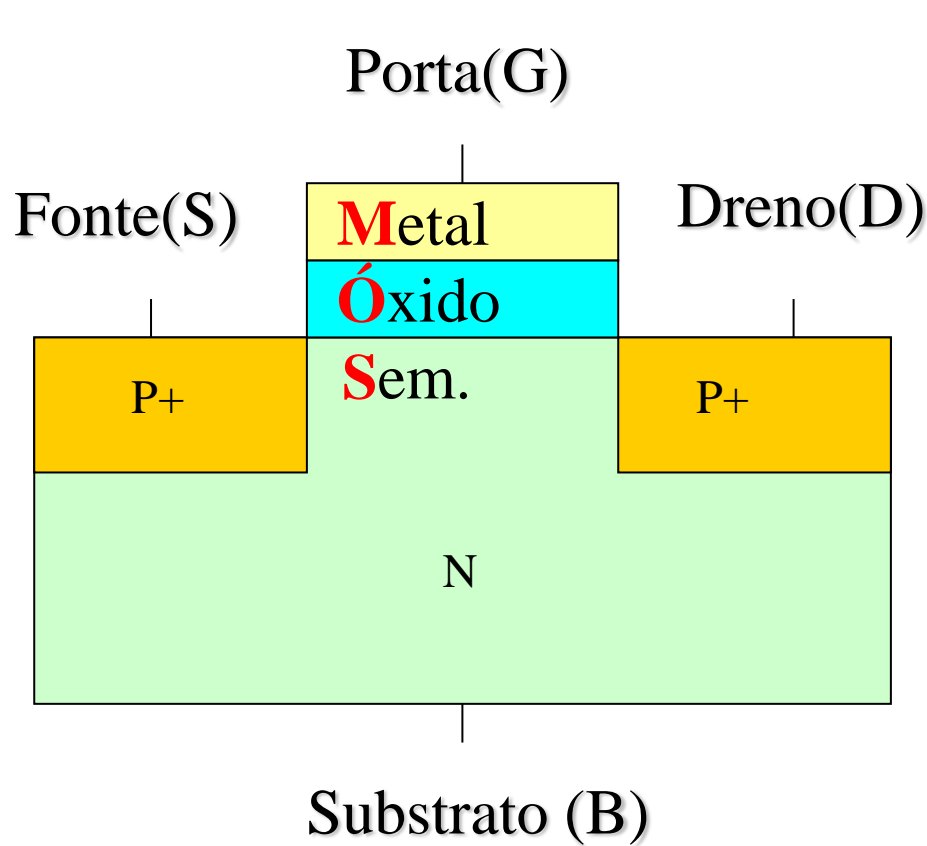
$$\gamma = \frac{\sqrt{2q \cdot \epsilon_{si} N_A}}{C_{OX}}$$

# MOSFET - Canal P (PMOS)

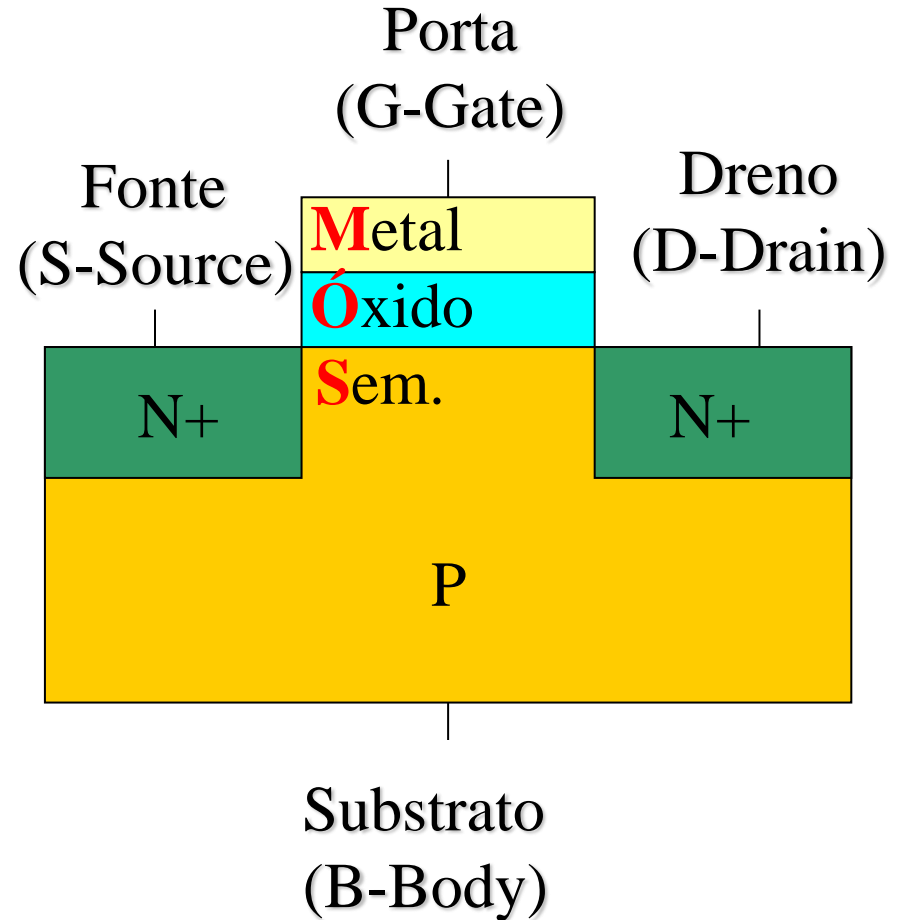


# Comparação entre os Transistores

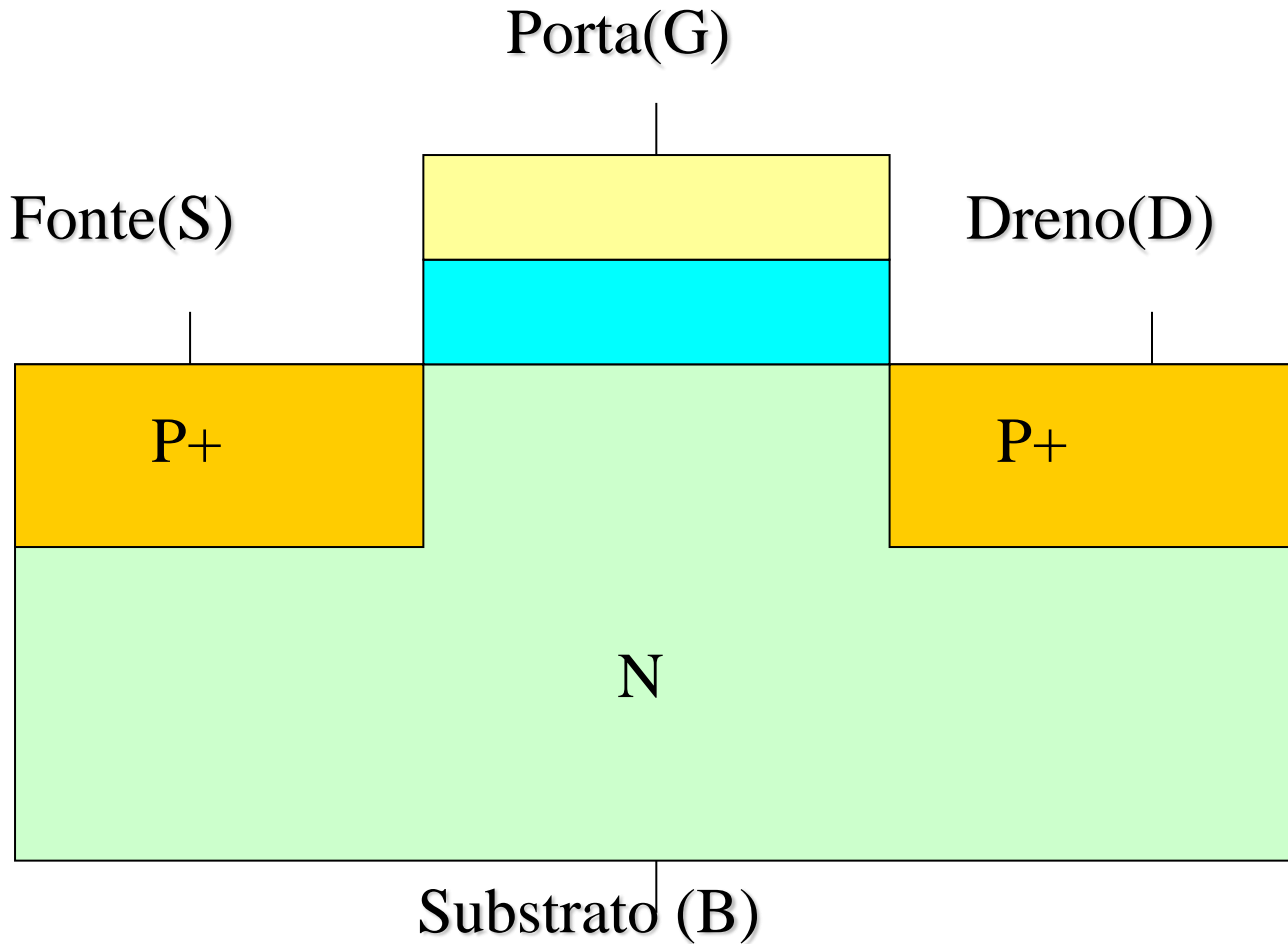
## PMOSFET



## NMOSFET

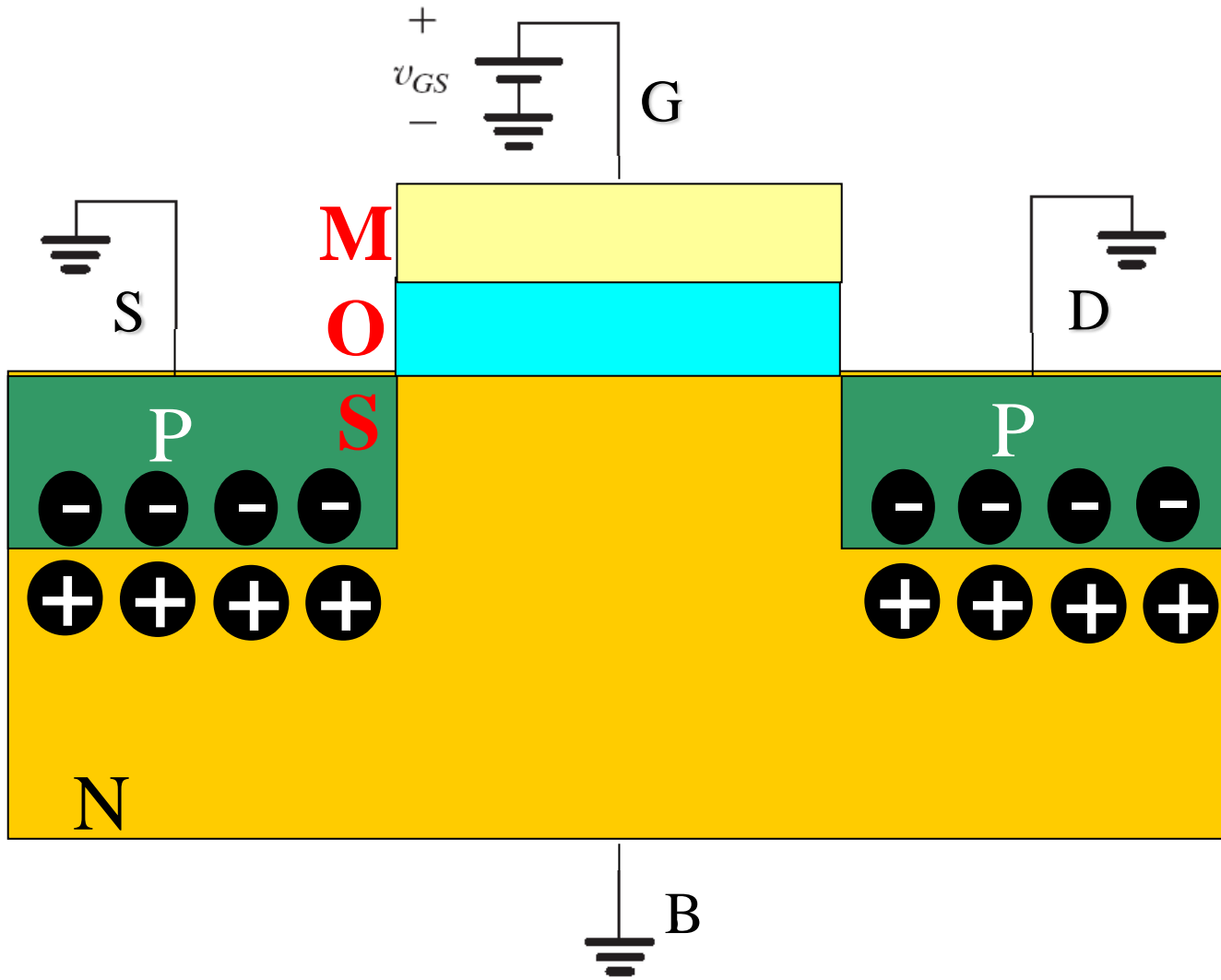


# PMOSFET



# Transistor PMOS

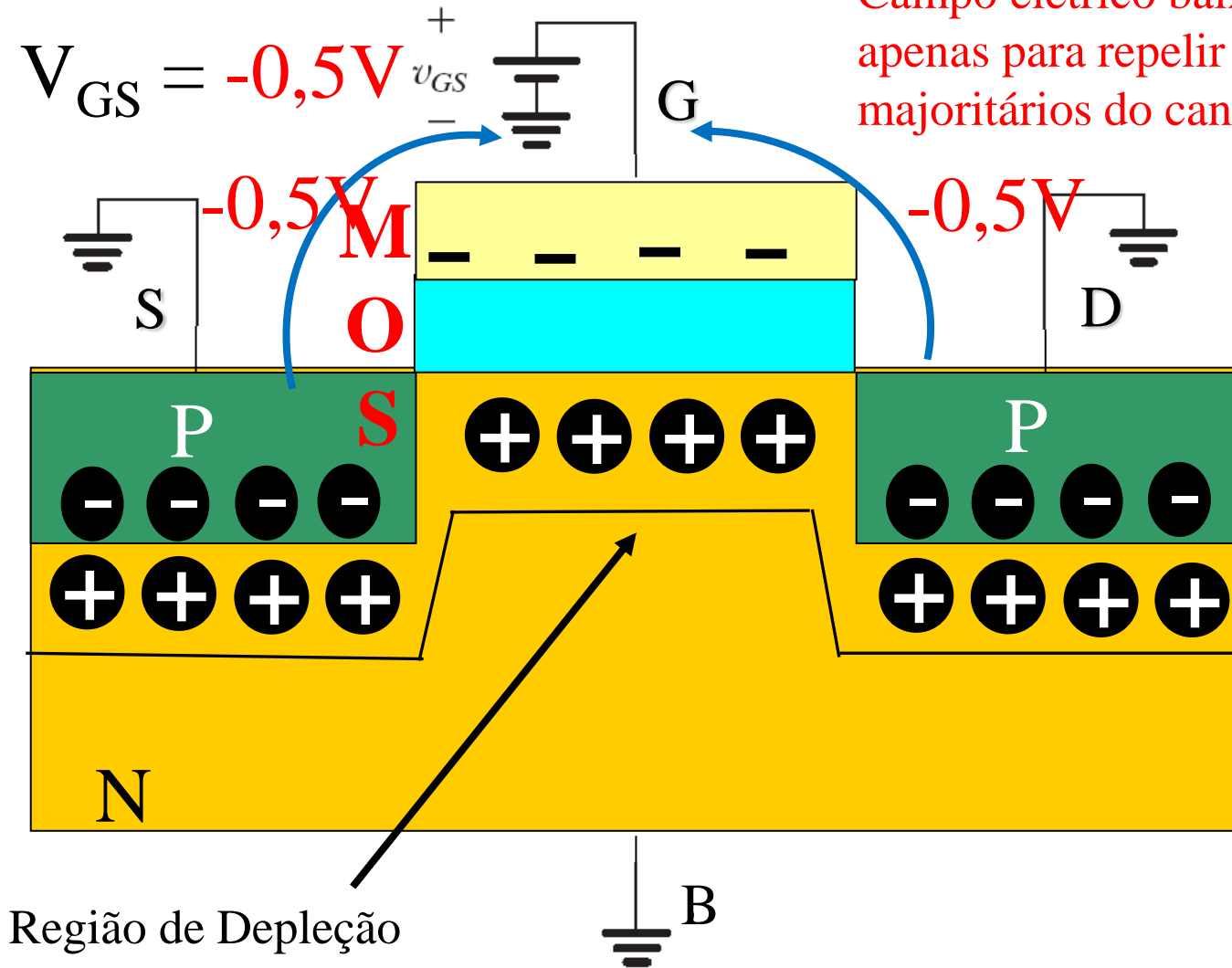
$$V_{GS} = 0 \text{ e } V_{DS} = 0$$



# Transistor PMOS

$$V_{GS} < 0 \text{ e } V_{DS} = 0$$

Campo elétrico baixo, suficiente apenas para repelir os portadores majoritários do canal (lacunas)



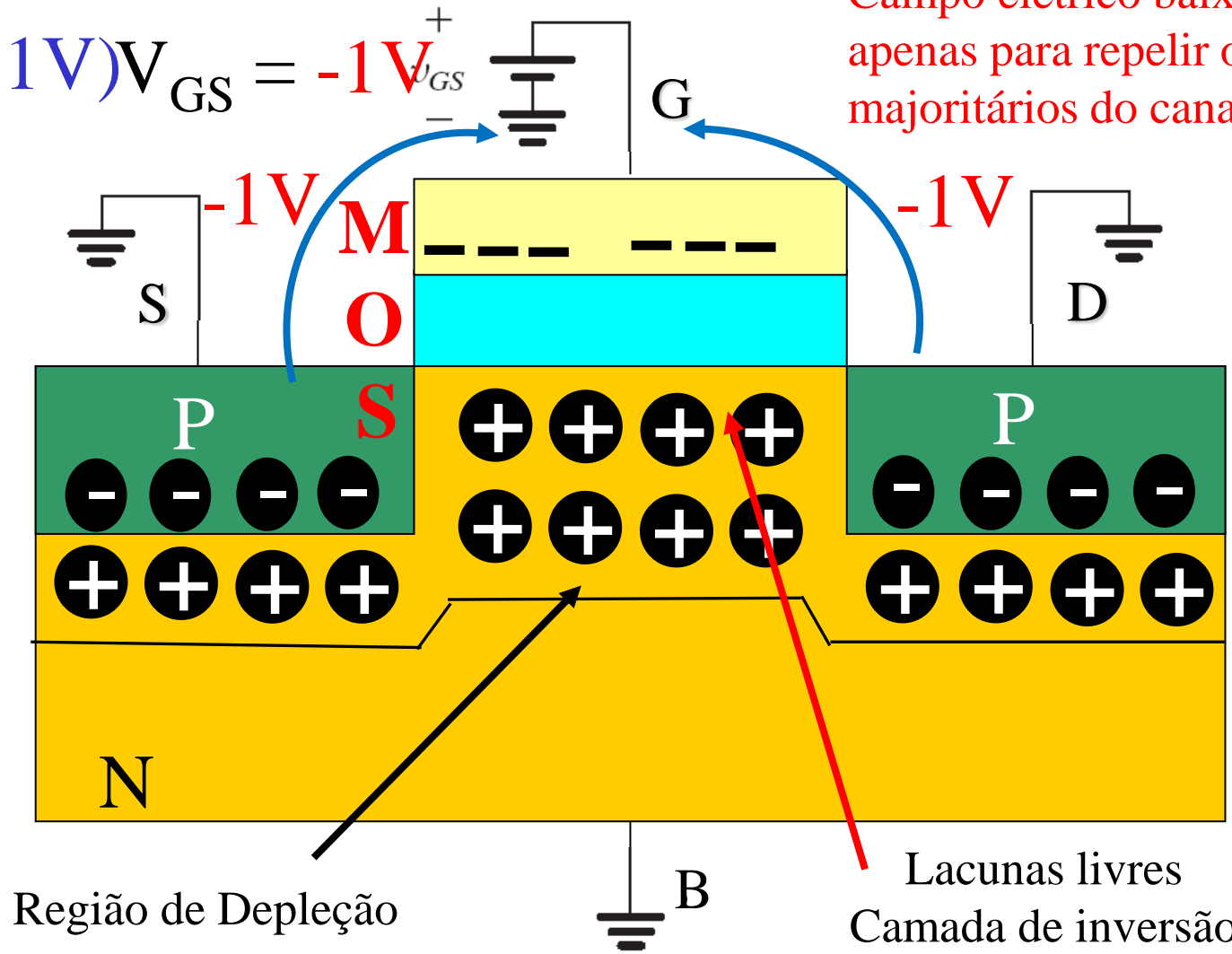


# Transistor PMOS

$$V_{GS} < 0 \text{ e } V_{DS} = 0$$

$$(V_t \cong -1V) V_{GS} = -1V$$

Campo elétrico baixo, suficiente apenas para repelir os portadores majoritários do canal (lacunas)

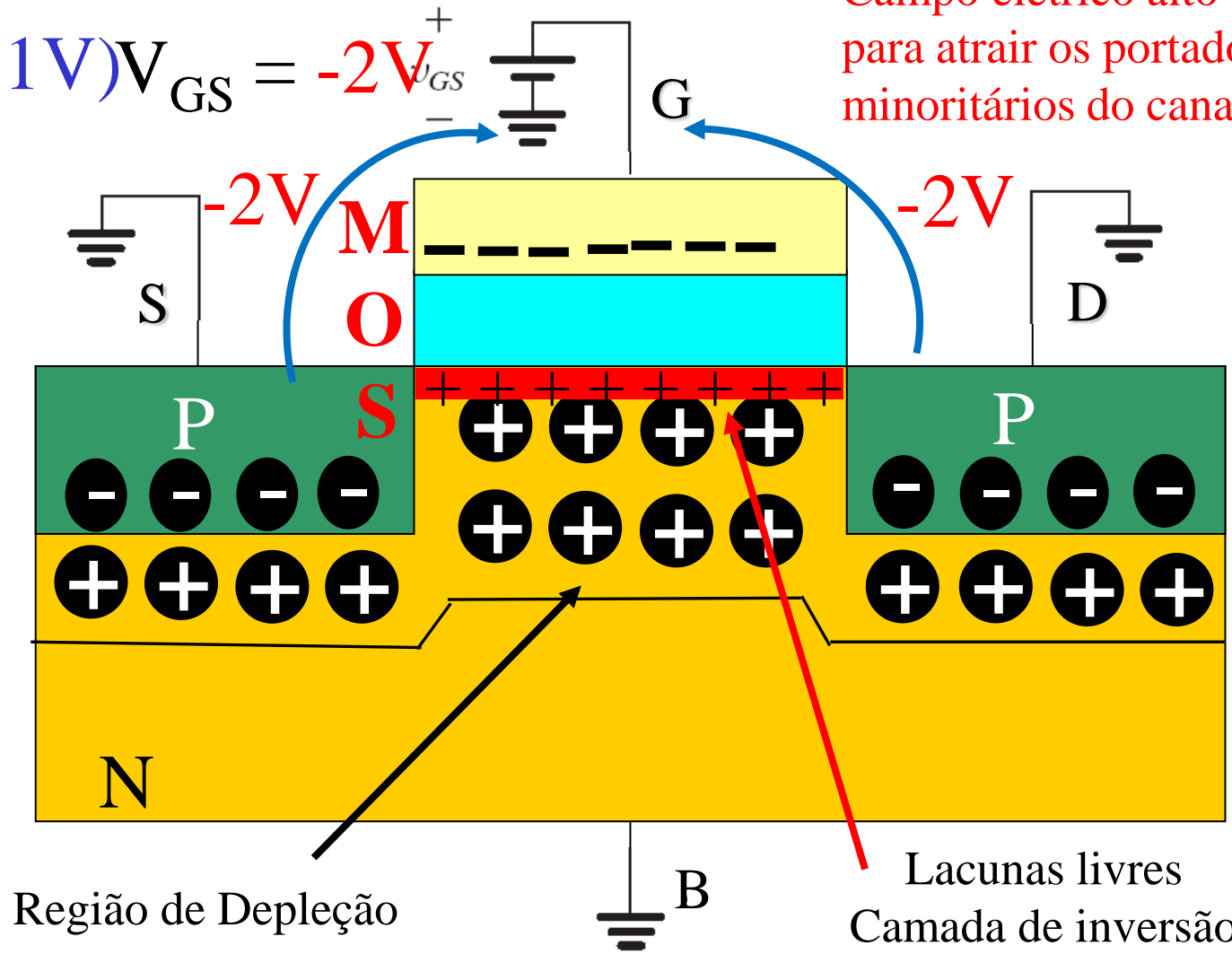


# Transistor PMOS

$V_{GS} < V_t$  (tensão de limiar) e  $V_{DS} = 0$

$(V_t \cong -1V) V_{GS} = -2V$

Campo elétrico alto o suficiente para atrair os portadores minoritários do canal (lacunas)

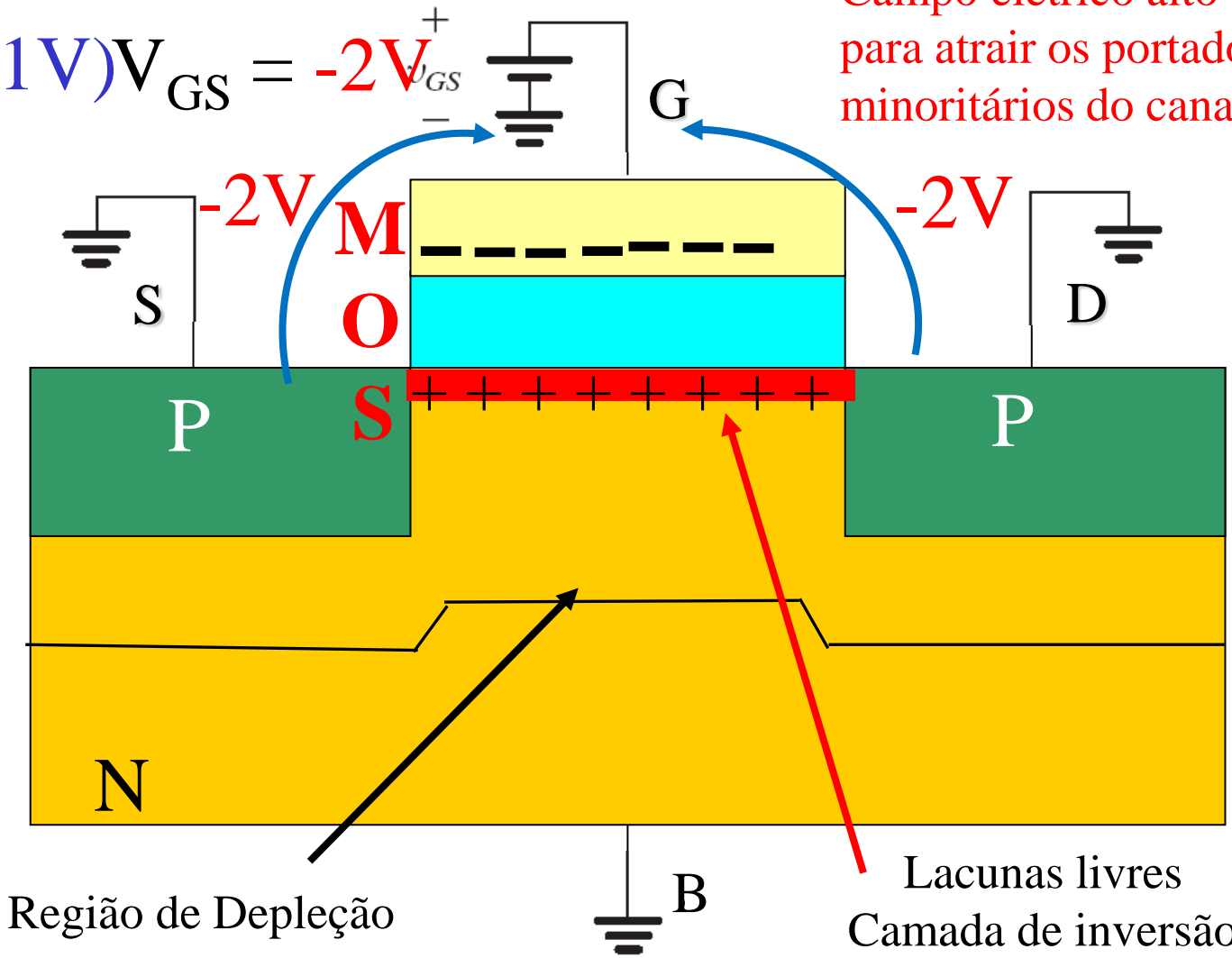


# Transistor PMOS

$V_{GS} < V_t$  (tensão de limiar) e  $V_{DS} = 0$

$(V_t \cong -1V) V_{GS} = -2V$

Campo elétrico alto o suficiente para atrair os portadores minoritários do canal (lacunas)

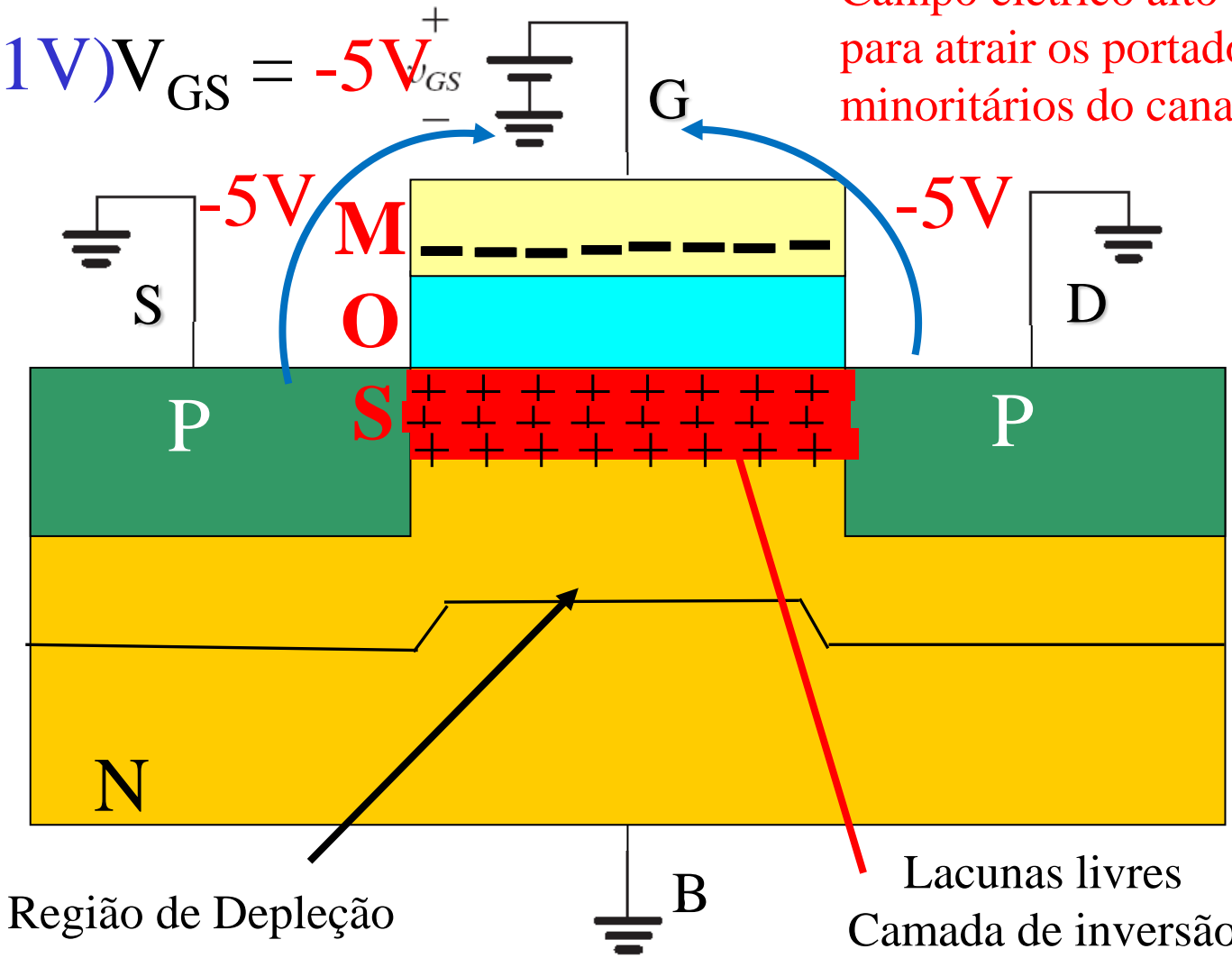


# Transistor PMOS

$V_{GS} \ll V_t$  (tensão de limiar) e  $V_{DS} = 0$

$(V_t \cong -1V) V_{GS} = -5V$

Campo elétrico alto o suficiente para atrair os portadores minoritários do canal (lacunas)

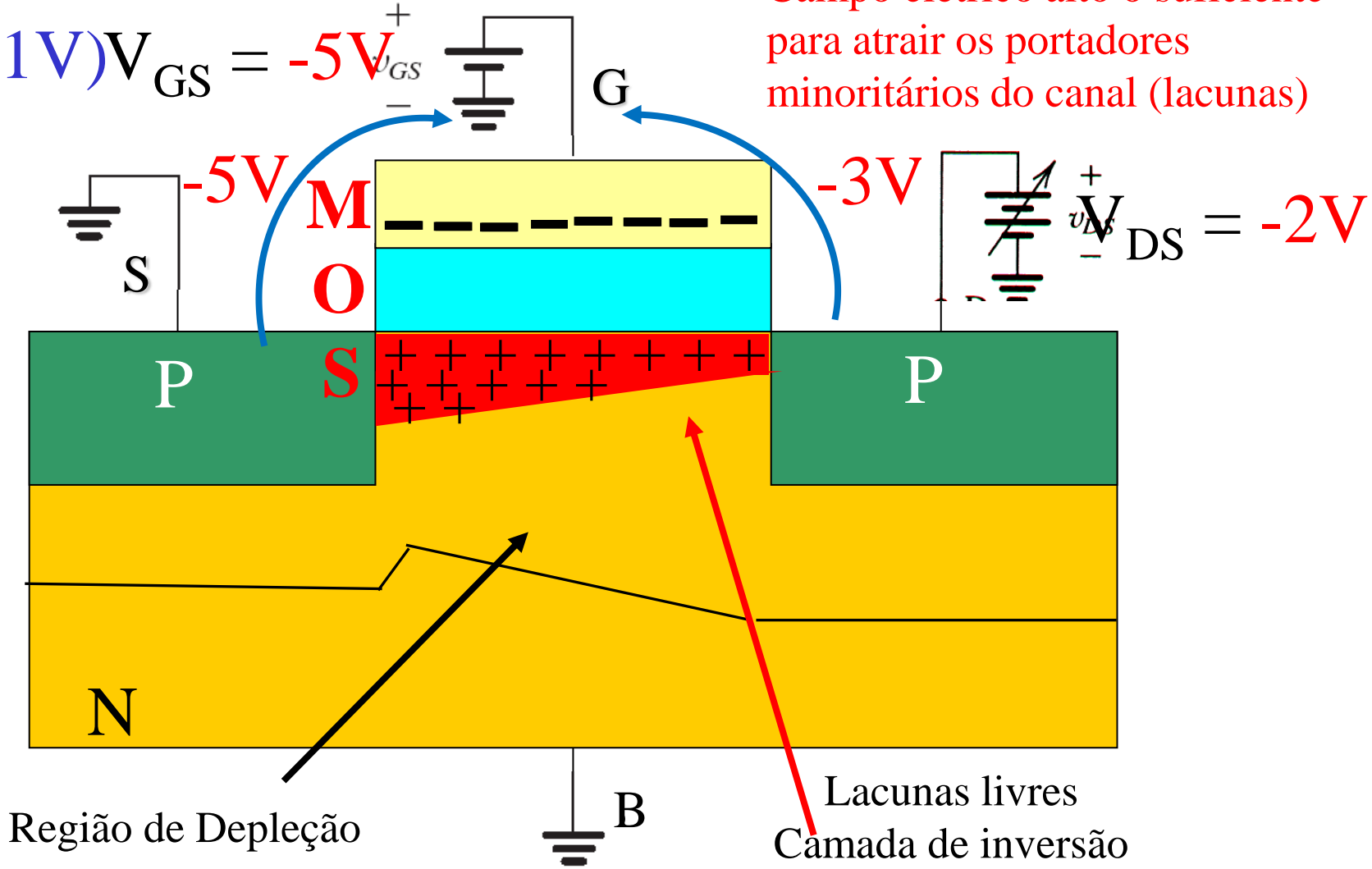


# Transistor PMOS

$$V_{DS} > V_{GS} - V_t \text{ (Região de triodo)}$$

$$(V_t \cong -1V) V_{GS} = -5V$$

Campo elétrico alto o suficiente para atrair os portadores minoritários do canal (lacunas)

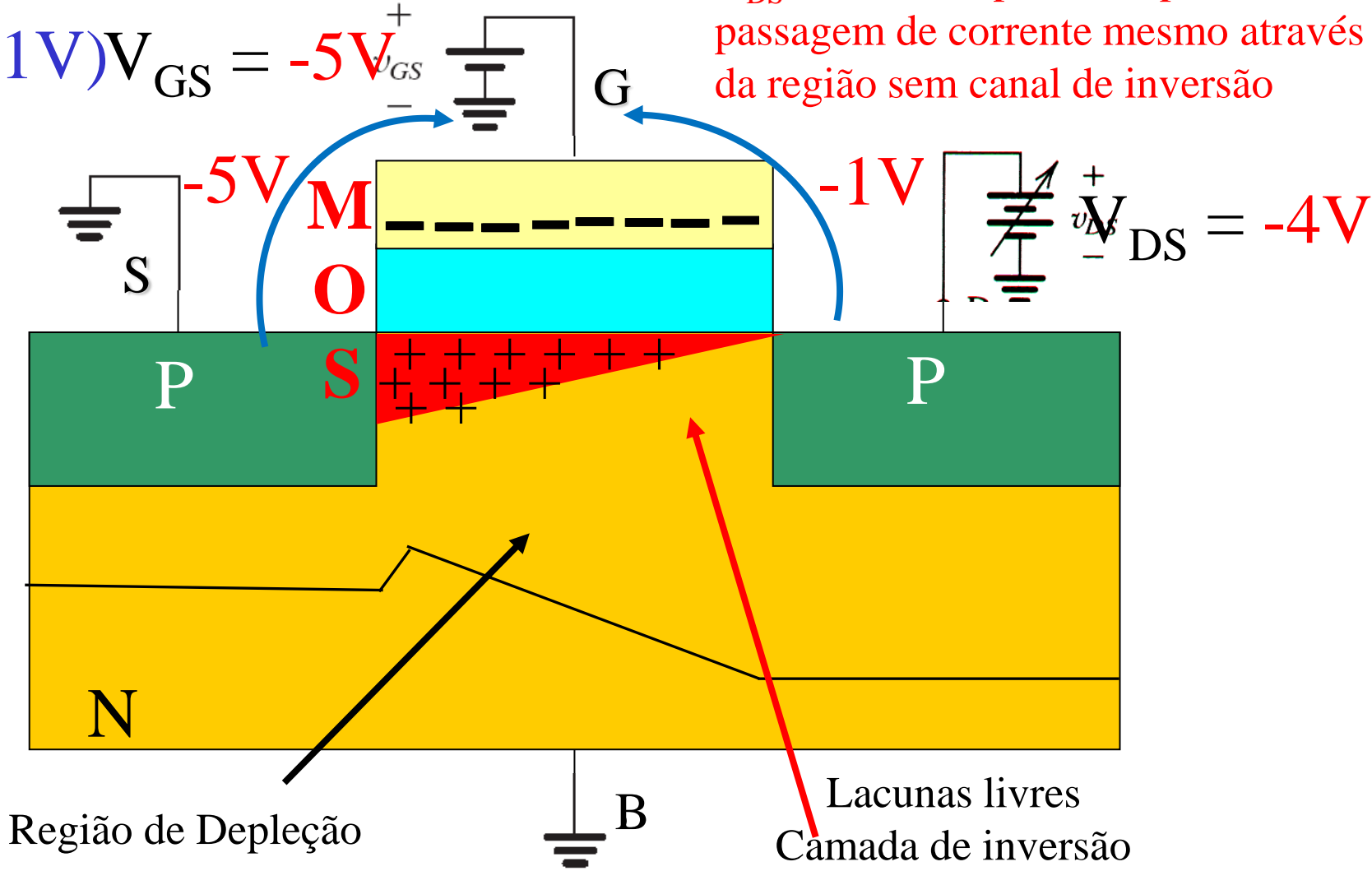


# Transistor PMOS

$$V_{DS} = V_{GS} - V_t \text{ (Triodo/Saturação)}$$

$$(V_t \cong -1V) V_{GS} = -5V$$

$V_{DS}$  elevado responsável pela passagem de corrente mesmo através da região sem canal de inversão

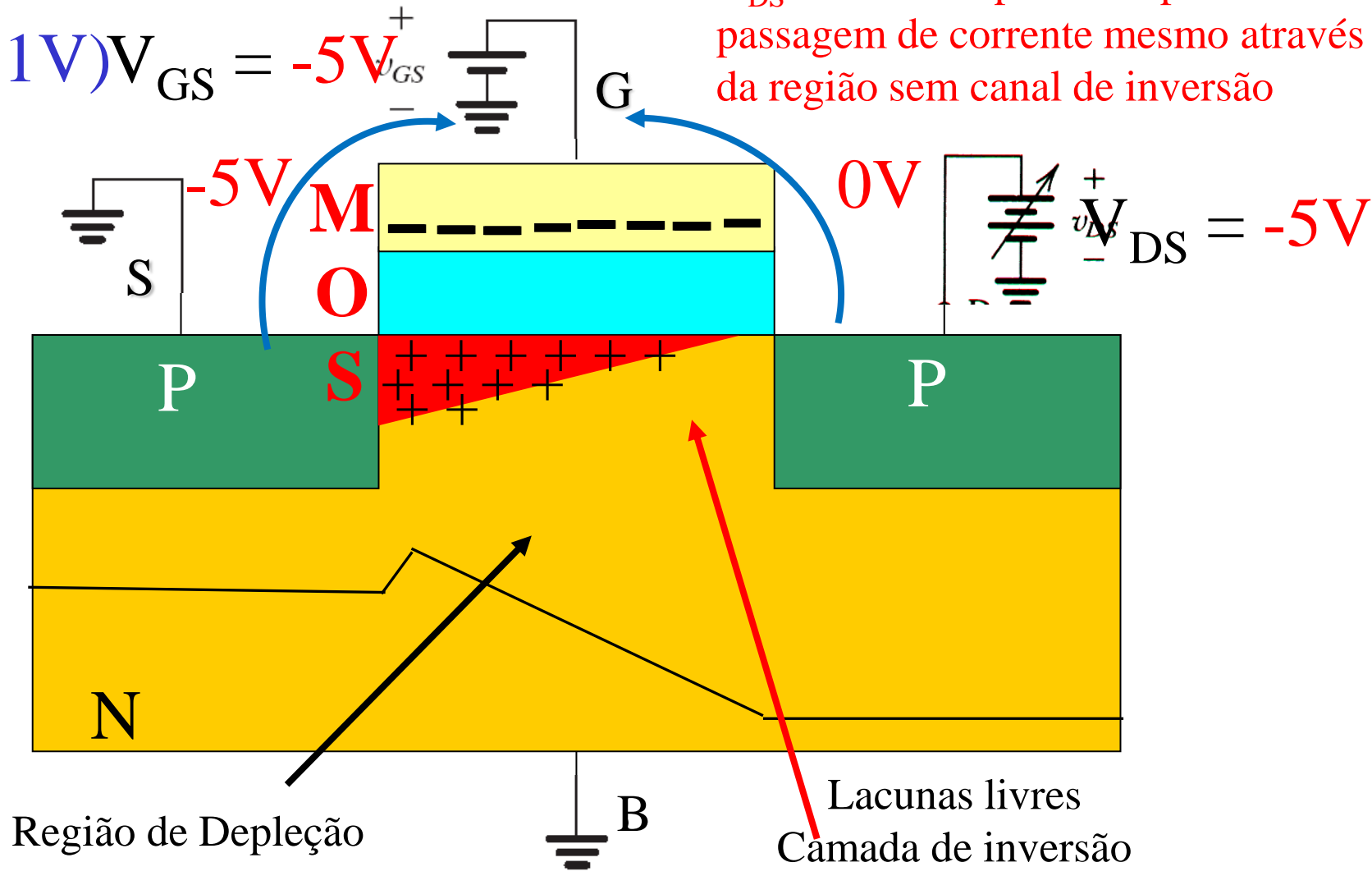


# Transistor PMOS

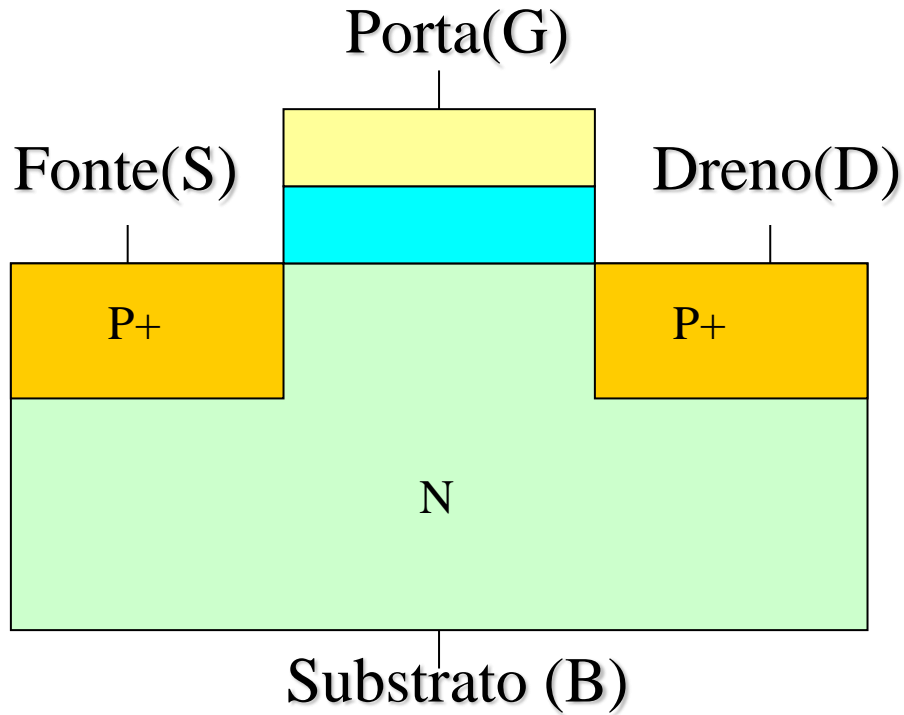
$$V_{DS} < V_{GS} - V_t \text{ (Região de Saturação)}$$

$$(V_t \cong -1V) V_{GS} = -5V$$

$V_{DS}$  elevado responsável pela passagem de corrente mesmo através da região sem canal de inversão



# PMOSFET



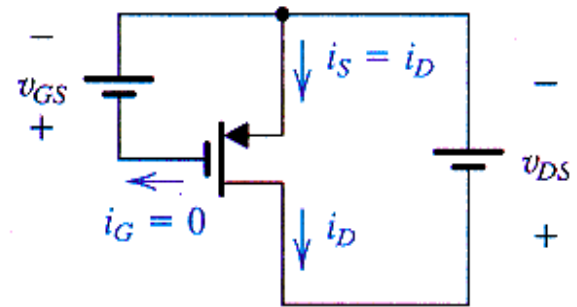
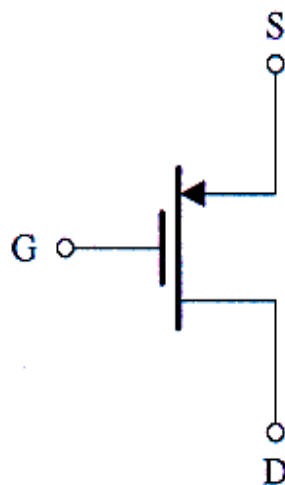
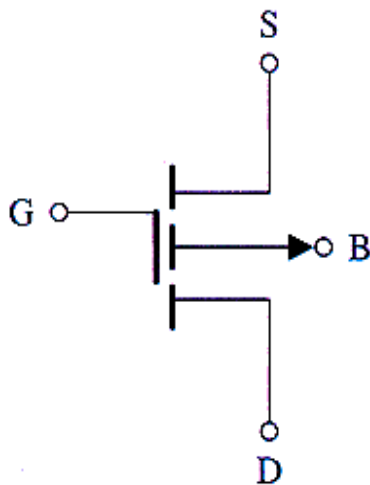
$$V_t < 0$$

$$V_{GS} < 0$$

$$V_{DS} < 0$$

$$V_A < 0$$

$$\mu_p \sim \mu_n/3$$





# PMOS (análogo ao NMOS)

## Modelo de $i_D = f(v_{GS}, v_{DS})$

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

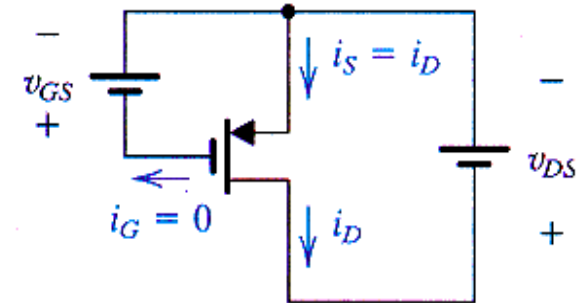
$$i_D = 0$$

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

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

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

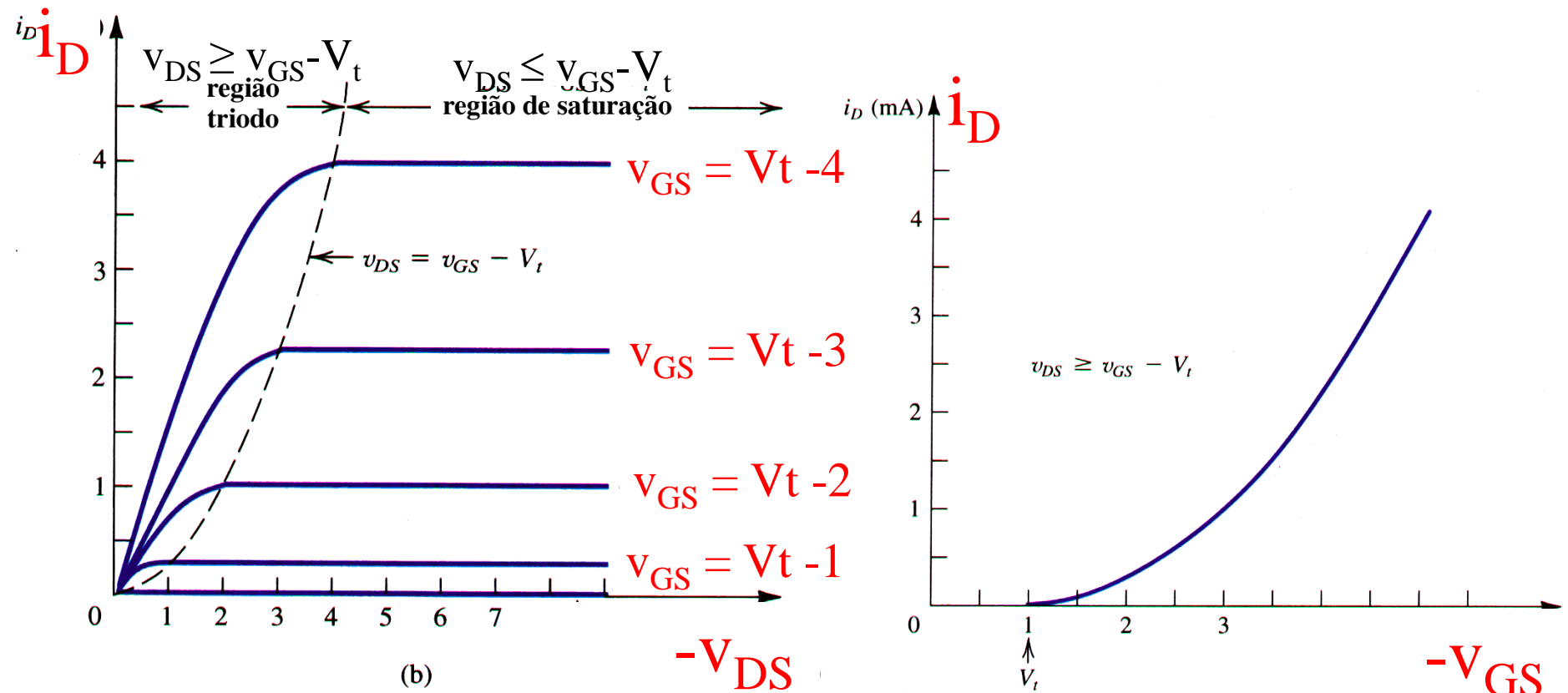
$$i_D = k'_p \frac{W}{L} \frac{(v_{GS} - V_t)^2}{2} \cdot (1 + \lambda \cdot v_{DS})$$



$$\begin{aligned} V_t &< 0 \\ V_{GS} &< 0 \\ V_{DS} &< 0 \\ V_A &< 0 \end{aligned}$$

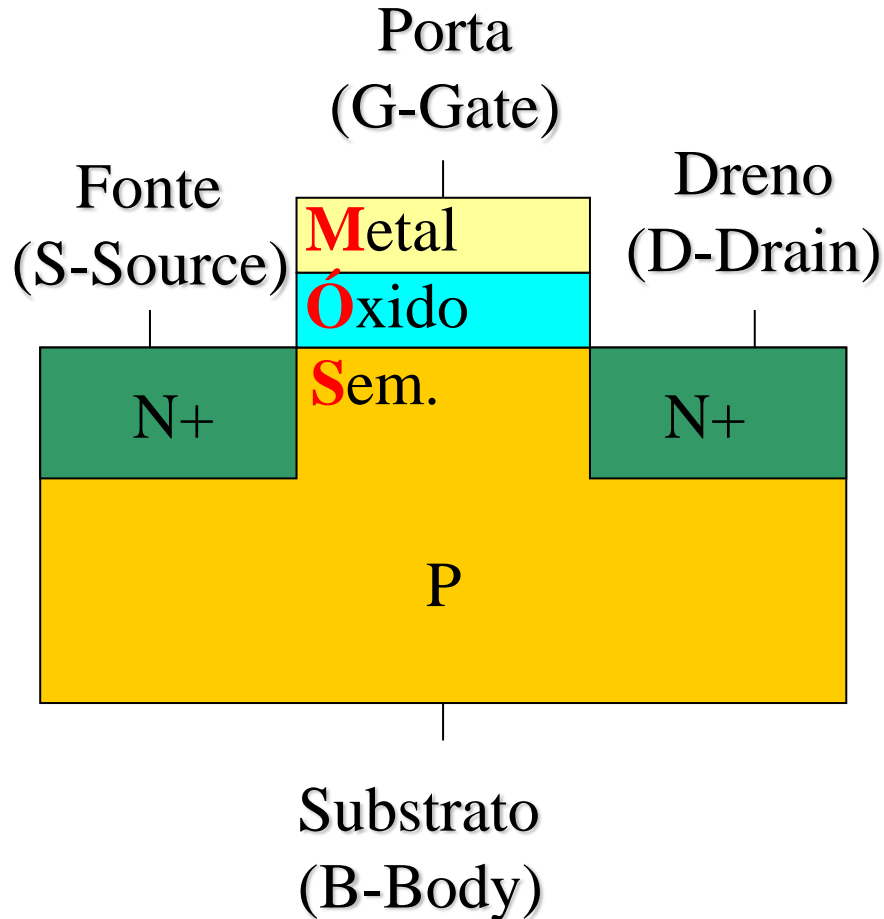
onde  $k'_p = \frac{\mu_p \epsilon_{OX}}{t_{OX}} = \mu_p \cdot C_{OX}$        $\lambda = \frac{1}{V_A}$        $V_A =$  tensão Early

# Características de Corrente-Tensão de um PMOSFET desprezando a modulação de canal (ou seja $\lambda = 0$ pois $V_A \rightarrow \infty$ )

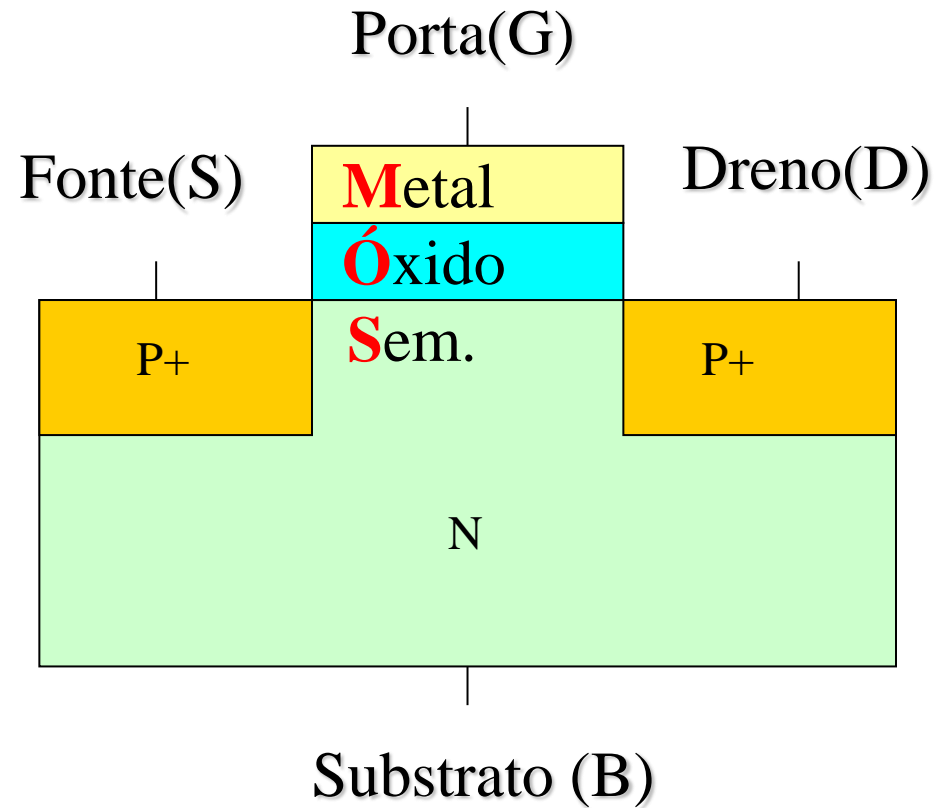


# Tecnologia CMOS (Complementar MOS)

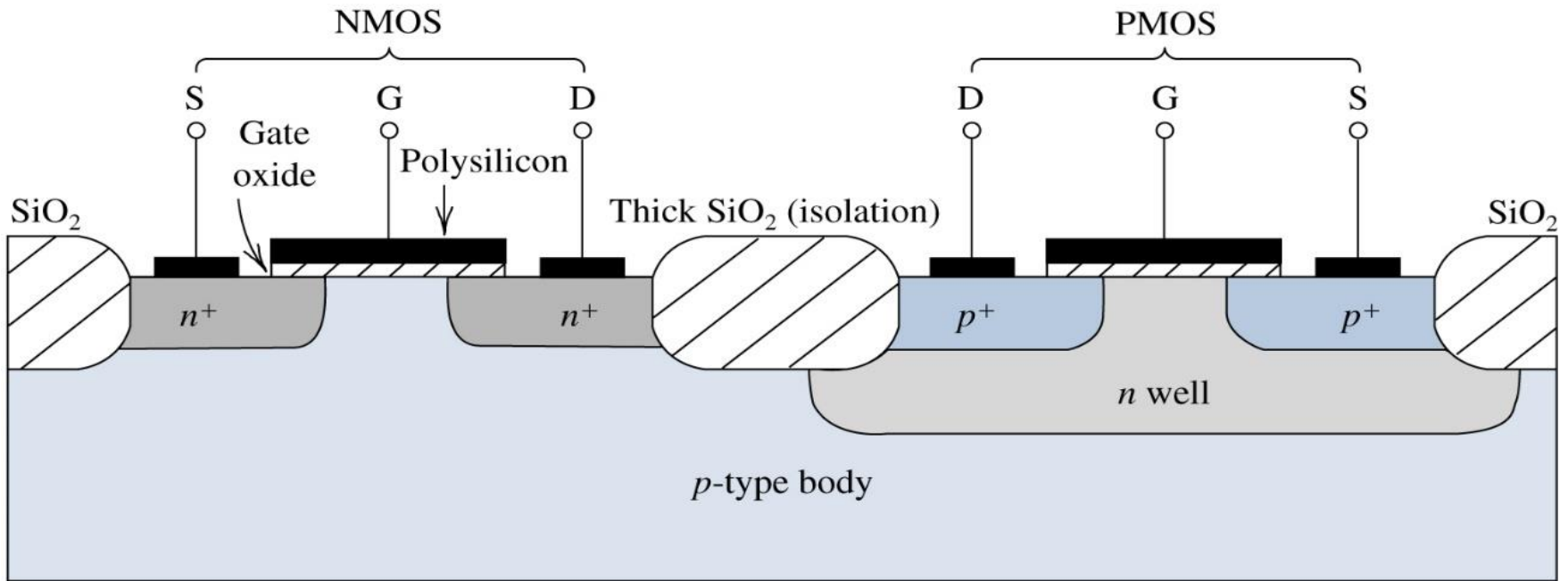
## NMOSFET



## PMOSFET

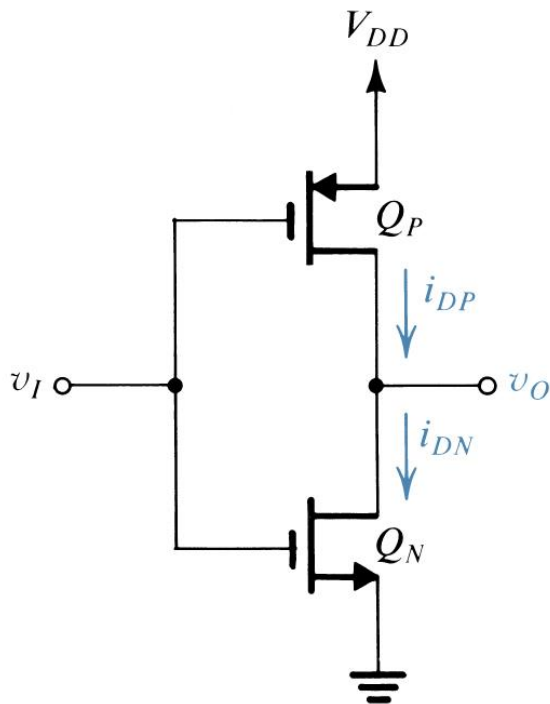


# Perfil de um Circuito Integrado CMOS

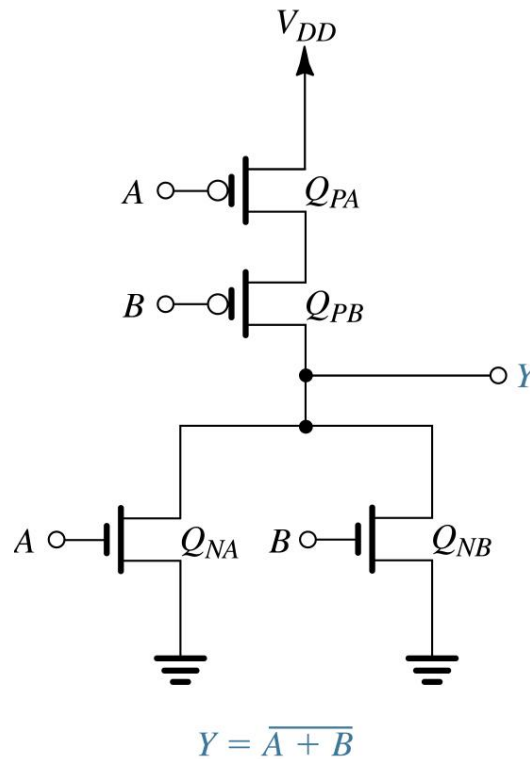


# Circuitos Digitais CMOS

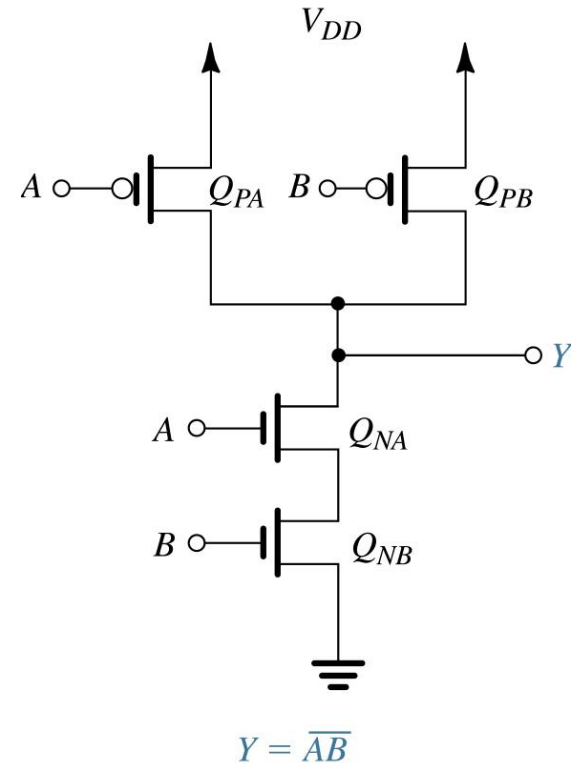
## Inversor CMOS



## Porta NOR CMOS

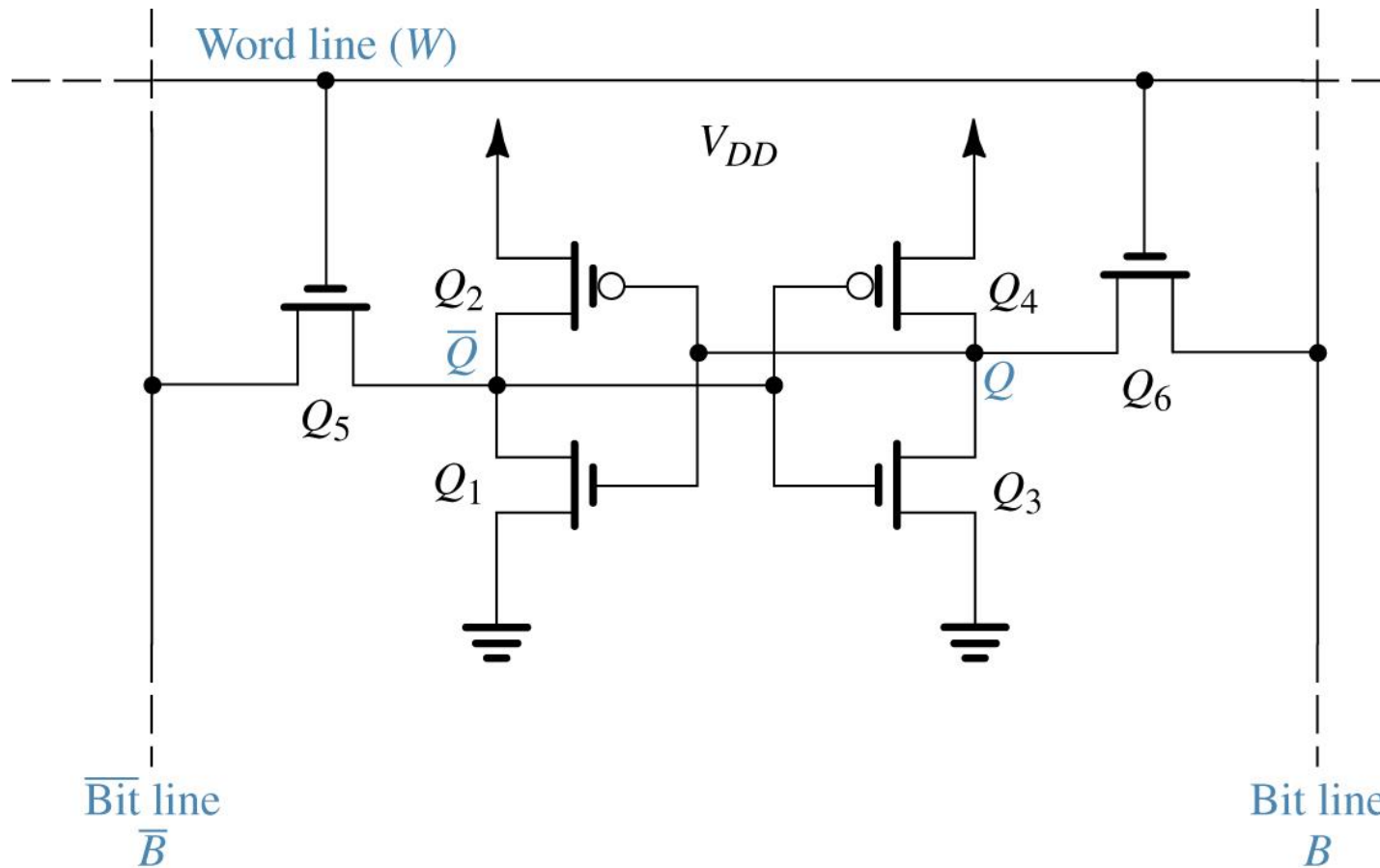


## Porta NAND CMOS



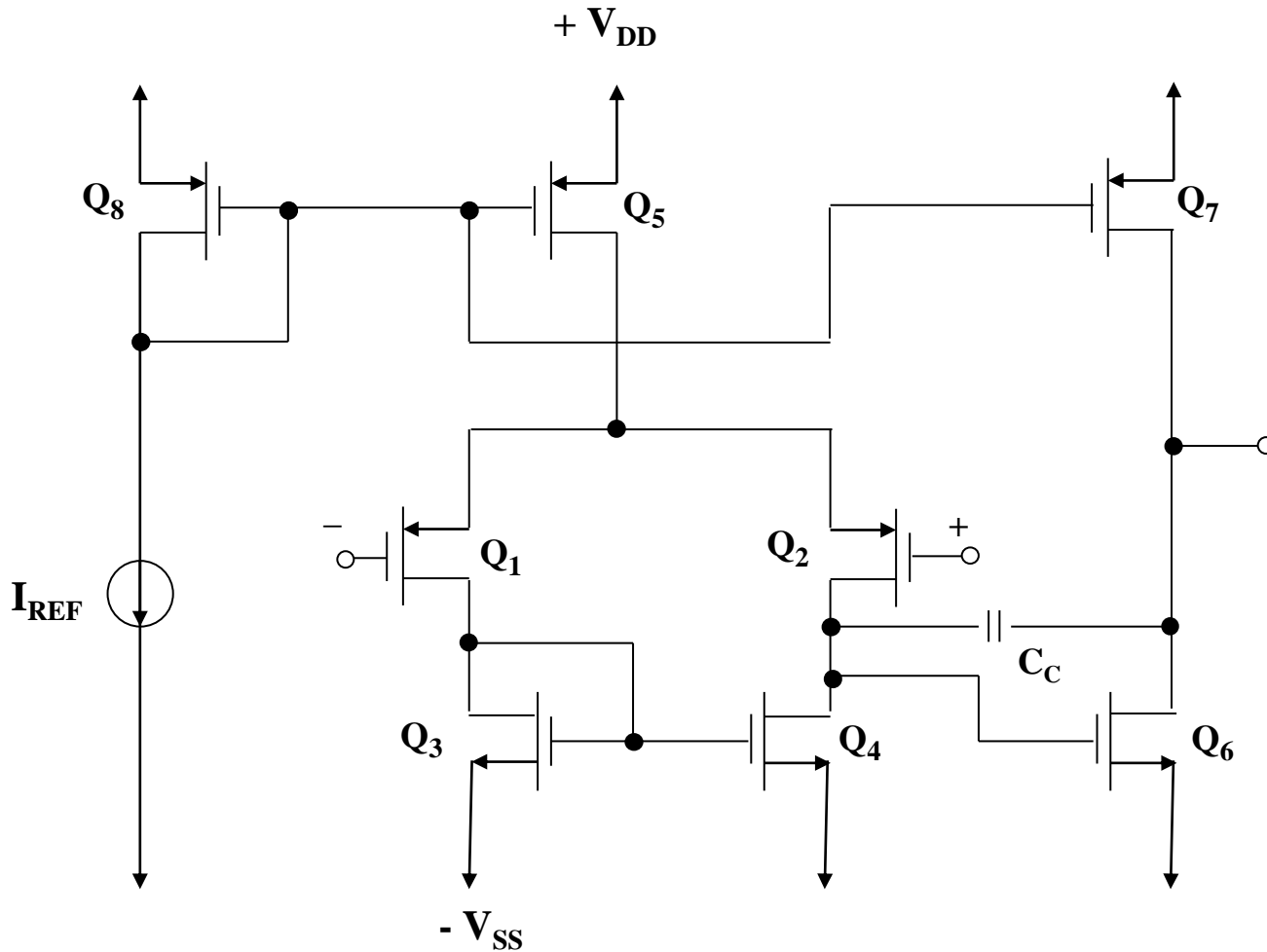
# Circuitos Digitais CMOS

## Célula de memória estática (SRAM)



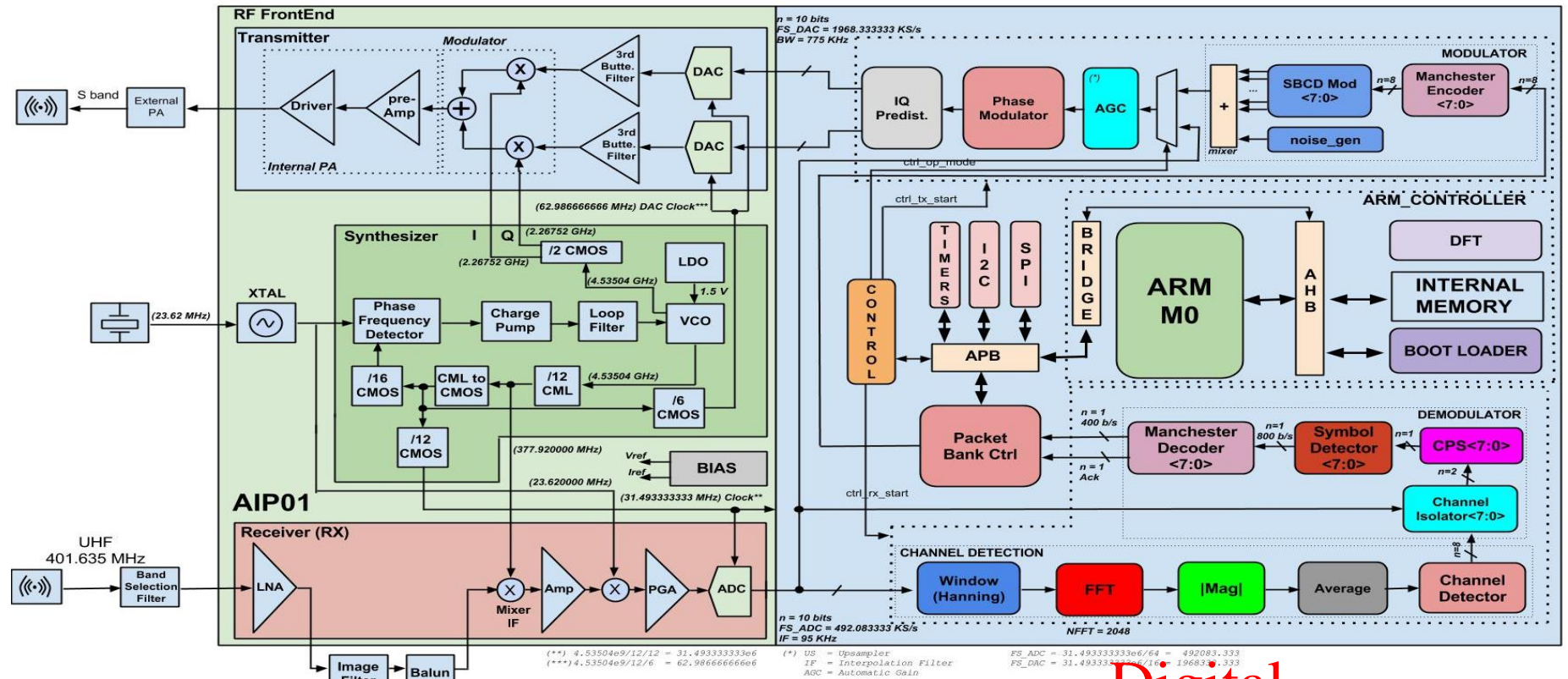
# Circuitos Analógicos CMOS

## Amplificador Operacional



# Circuitos Integrados Mistos

Transponder para o sistema de coleta de dados brasileiro na tecnologia CMOS  
 (Centro de Formação de Projetistas de Circuitos Integrados da Escola Politécnica da USP)

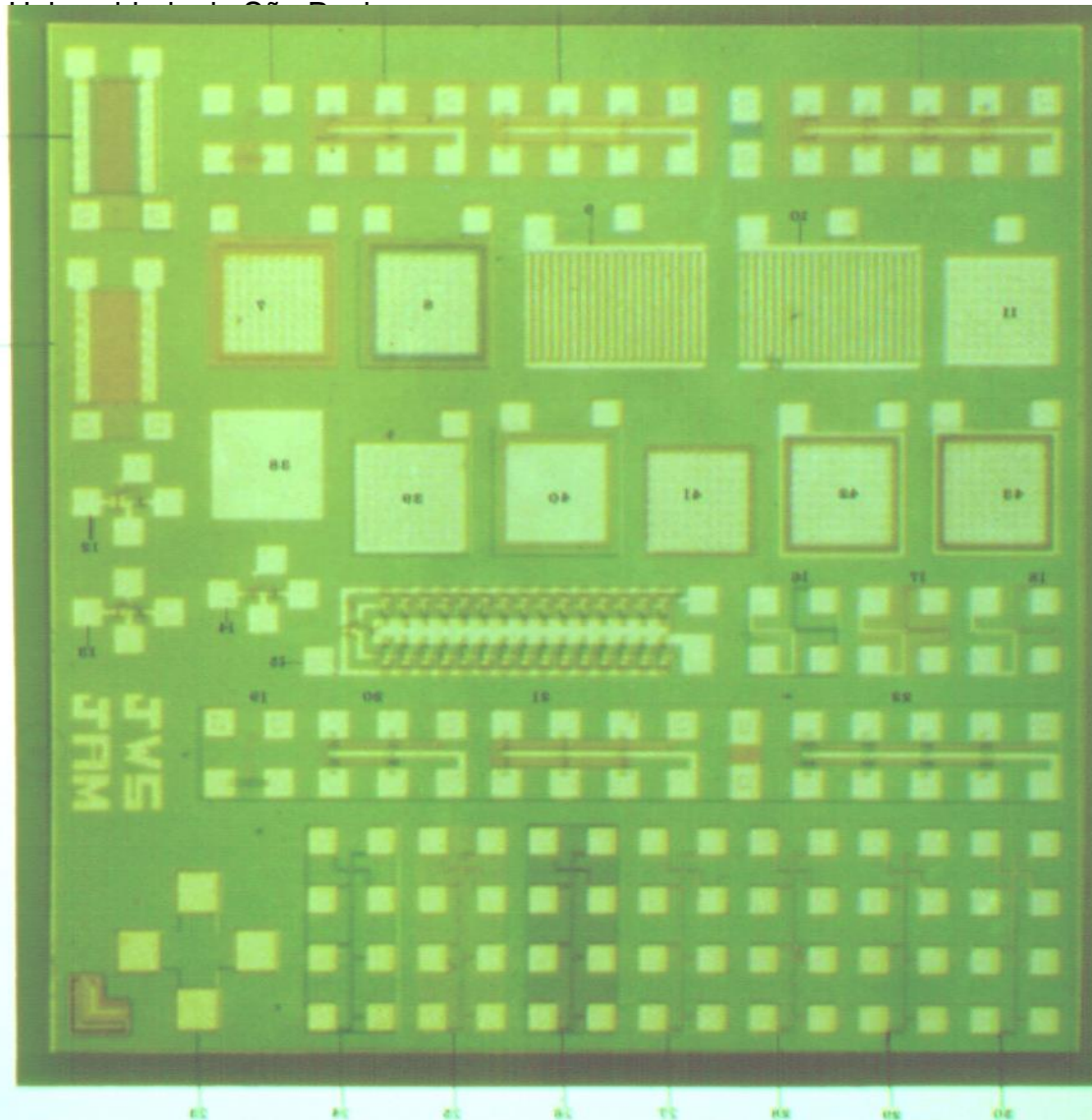


Analogica

Digital



# Tecnologia CMOS projetada e fabricada na Escola Politécnica da USP



Dimensões: 3mm x 3mm

7 Estruturas Van der Pauw  
e 2 Resistores

3 Estruturas Kelvin

5 Capacitores

20 Transistores nMOS

20 Transistores pMOS

6 Diodos

1 Oscilador em Anel  
(31 estágios)

3 Inversores

# Robôs existem graças aos circuitos integrados (compostos por transistores MOSFET)

Da ficção para a realidade...

Perdidos no espaço (1965-1968)

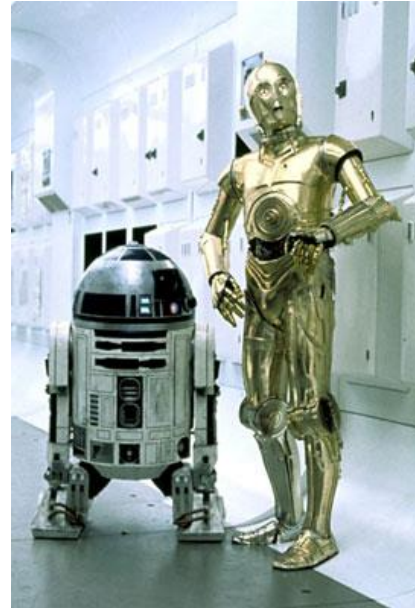




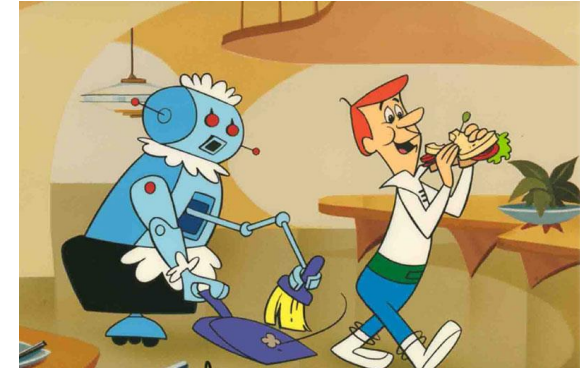
**Robôs existem graças aos circuitos integrados  
(compostos por transistores MOSFET)  
Da ficção para a realidade...**



B9 Robot: Perdidos no espaço (1965)



R2-D2 e C-3PO (Star Wars -1977)



Rosie – JETSONS (1962)



Wall-E (2009)



Sonny do “Eu Robot” (2004)



BB-8 (Star-Wars – 2015)

# Robôs existem graças aos circuitos integrados (compostos por transistores MOSFET)

Da ficção para a realidade...





**Robôs existem graças aos circuitos integrados  
(compostos por transistores MOSFET)  
Da ficção para a **realidade**...**



Robo do Joãozinho...



# PMOS (análogo ao NMOS)

## Modelo de $i_D = f(v_{GS}, v_{DS})$

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

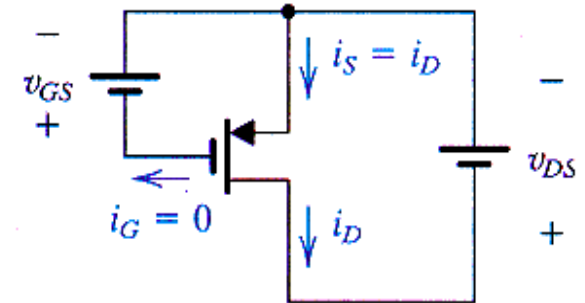
$$i_D = 0$$

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

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

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

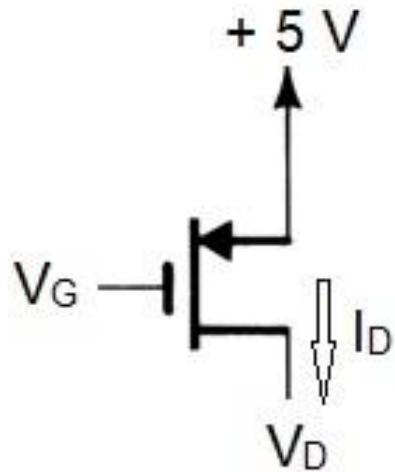
$$i_D = k'_p \frac{W}{L} \frac{(v_{GS} - V_t)^2}{2} \cdot (1 + \lambda \cdot v_{DS})$$



$$\begin{aligned} V_t &< 0 \\ V_{GS} &< 0 \\ V_{DS} &< 0 \\ V_A &< 0 \end{aligned}$$

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

## Ex. 4.8 (pag. 156 do Livro texto)



Ex 4.8 – O transistor PMOS mostrado na figura abaixo tem  $V_t = -1\text{V}$ ,  $k_p' = 60\mu\text{A}/\text{V}^2$ ,  $W/L = 10$ .

- Obtenha a faixa de  $V_G$  para que o transistor conduza.
- Obtenha a faixa de  $V_D = f(V_G) \rightarrow$  Região de Triodo.
- Obtenha a faixa de  $V_D = f(V_G) \rightarrow$  Saturação.
- Determine  $V_G$ ,  $|V_{OV}|$  e a faixa de  $V_D$  para que o transistor opere em saturação com  $I_D = 75\mu\text{A}$  (adote  $\lambda = 0$ ).
- Se  $\lambda = -0,02\text{ V}^{-1}$ , encontre  $r_o$  para o mesmo  $V_{OV}$  do item (d).
- Para  $\lambda = -0,02\text{ V}^{-1}$  e  $V_{OV}$  do item (d), obtenha  $I_D$ , para  $V_D = 3\text{V}$  e para  $V_D = 0\text{V}$

## Exercícios de fixação

- 1) Desenhe a secção transversal de um transistor PMOS indicando na figura:  $V_D$ ,  $V_S$ ,  $V_G$ ,  $V_B$ ,  $t_{ox}$  e  $L$ . Indique também o perfil de cargas no canal para o transistor funcionando em regime triodo.
- 2) Esboce as curvas características  $I_D \times V_D$  de um PMOS para  $V_{GS} = 0, -2$  e  $-5V$ . Considere que a tensão de limiar para este transistor é  $-1V$ . Indique nas curvas as regiões de corte, triodo e saturação.
- 3) Fazer também os exercícios do livro (capítulo 4 da aula e do fim do capítulo) e da lista de exercícios do eDisciplinas