

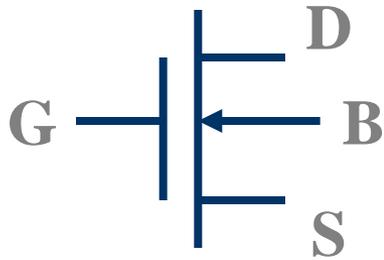
# MODELAGEM DO TRANSISTOR MOS

# Simbologia e terminais do MOSFET

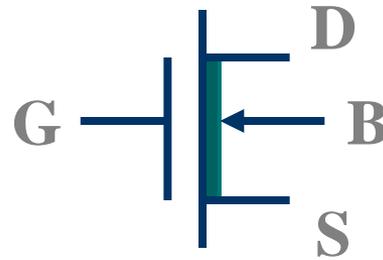
## MOSFET DE ENRIQUECIMENTO

## MOSFET DE DEPLEÇÃO

## TERMINAIS



canal N



canal N



canal P



canal P

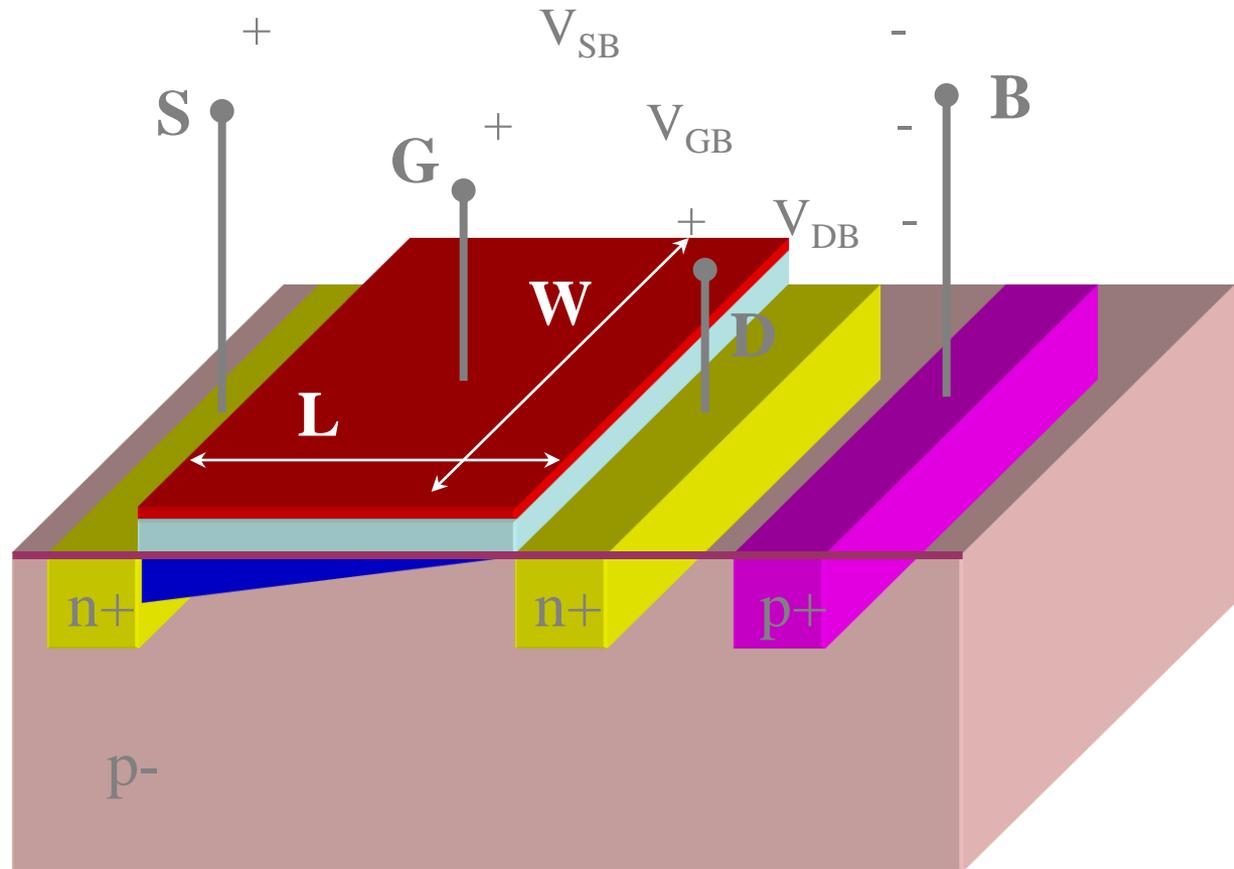
G: porta (gate)

S: fonte (source)

D: dreno (drain)

B: substrato (bulk)

# Estrutura do MOSFET canal N



polissilício de porta

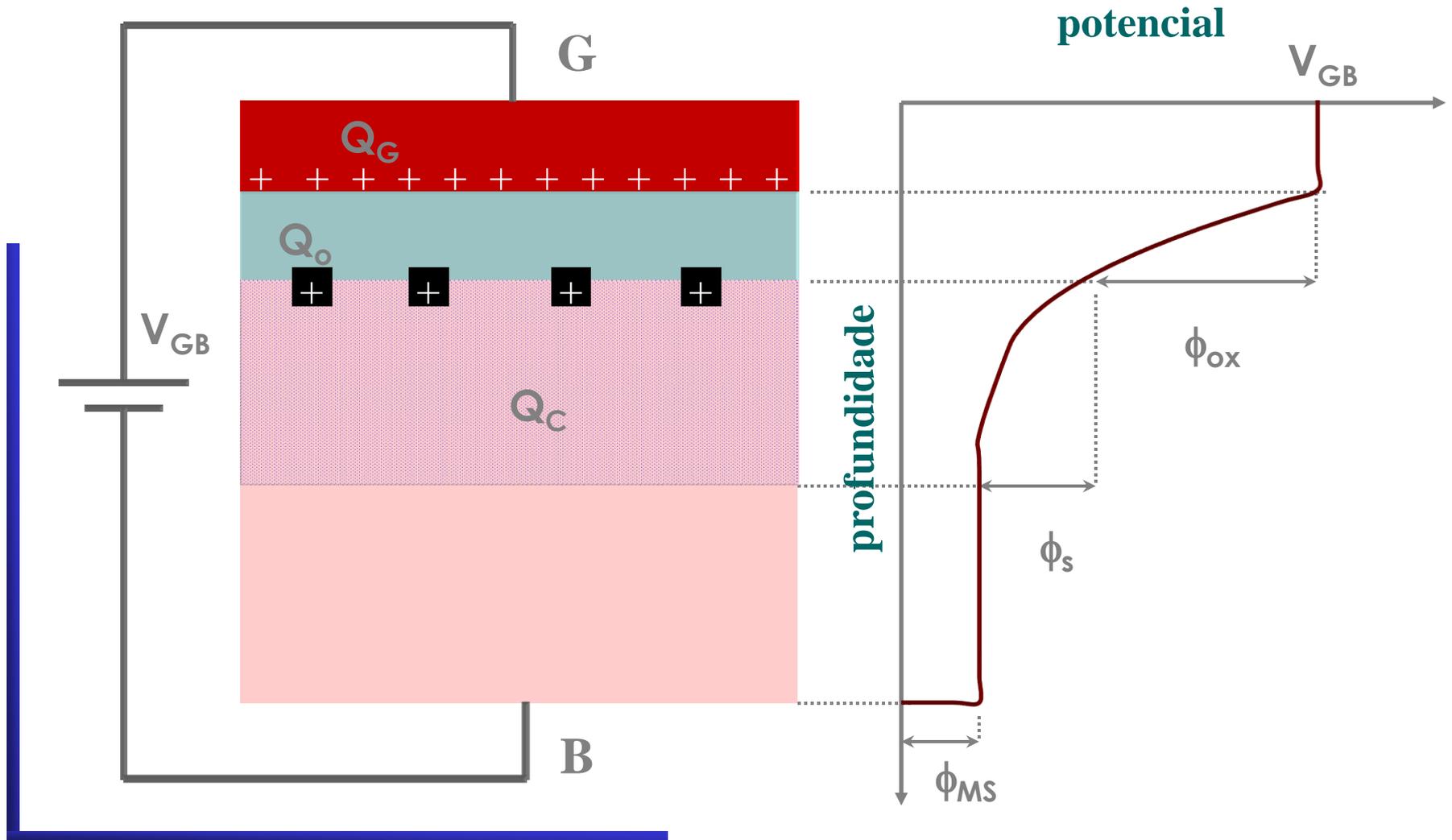
óxido SiO<sub>2</sub>

substrato

difusão de fonte ou dreno

canal de inversão

# Balço de tensões na estrutura capacitiva MOS



# Balanço de tensões na estrutura capacitiva MOS

$$V_{GB} = \phi_{ox} + \phi_s + \phi_{MS}$$

$$Q'_G + Q'_C + Q'_o = 0$$

$$\phi_{ox} = \frac{Q'_G}{C'_{ox}} = -\frac{Q'_C + Q'_o}{C'_{ox}}$$

$C'_{ox}$ : capacitância por unidade de área

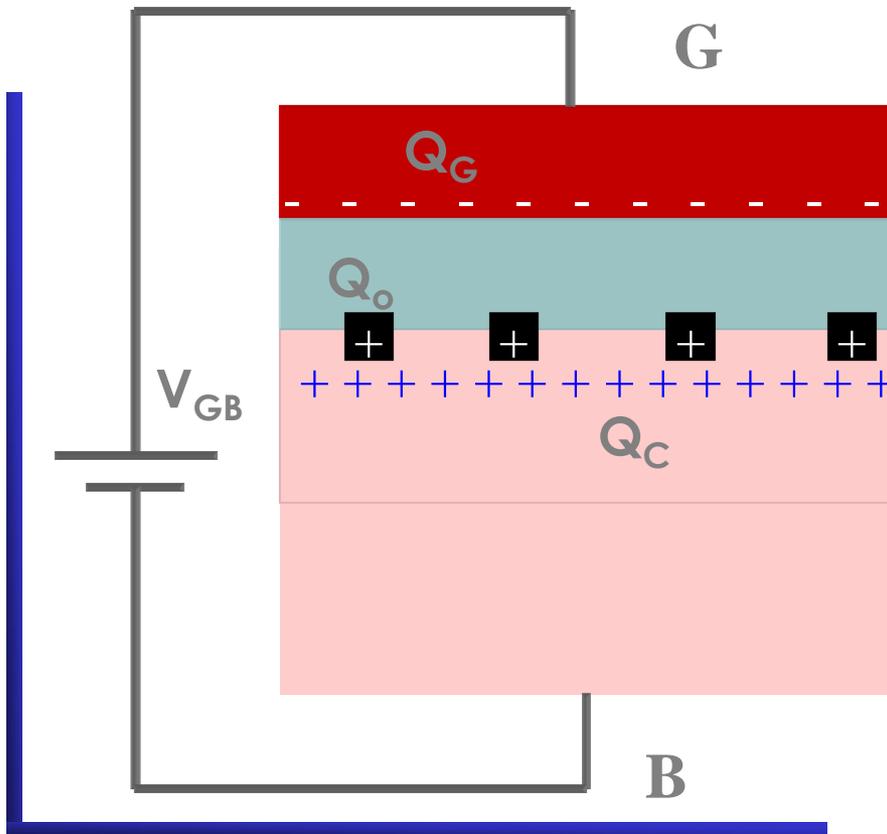
$Q'_{G,C,ox}$  : densidades de carga de porta, do semiconductor e efetiva da interface

**Definindo:**  $V_{FB} = \phi_{MS} - \frac{Q'_o}{C'_{ox}}$  **tensão de banda plana**

$$V_{GB} - V_{FB} = -\frac{Q'_C}{C'_{ox}} + \phi_s$$

# Regimes de operação do capacitor MOS

## Acumulação



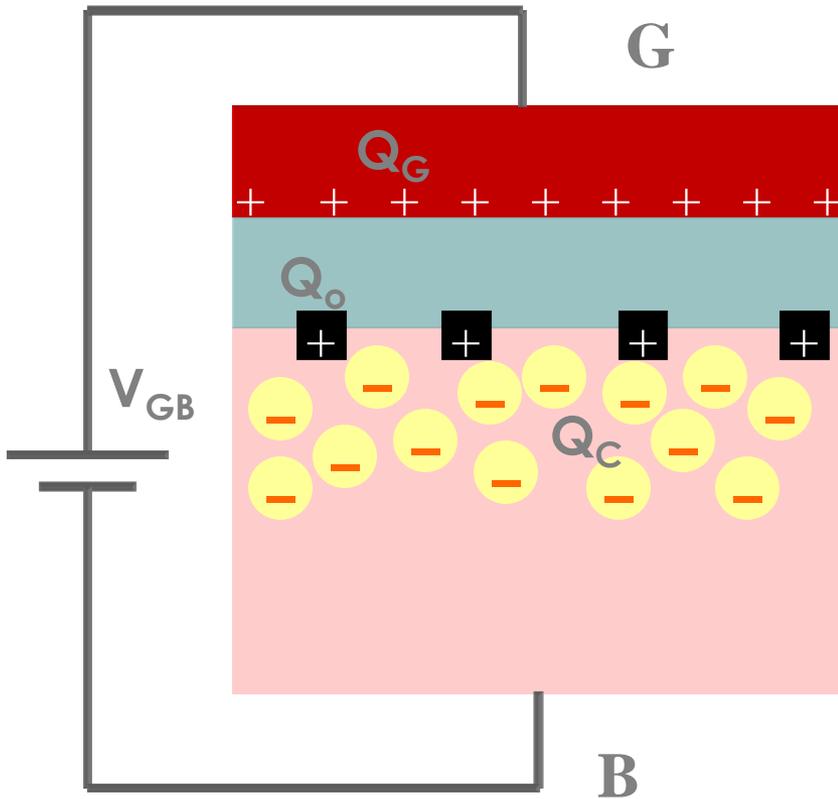
$$V_{GB} < V_{FB}$$

$$Q'_C > 0$$

$$\phi_s < 0$$

Lacunas **+** se acumulam na superfície do semiconductor tipo P

# Depleção



$$V_{GB} > V_{FB}$$

$$Q'_C < 0$$

$$0 < \phi_s < \phi_F$$

Lacunas se afastam da superfície do semiconductor tipo P e cargas das impurezas  $-$  ficam descobertas

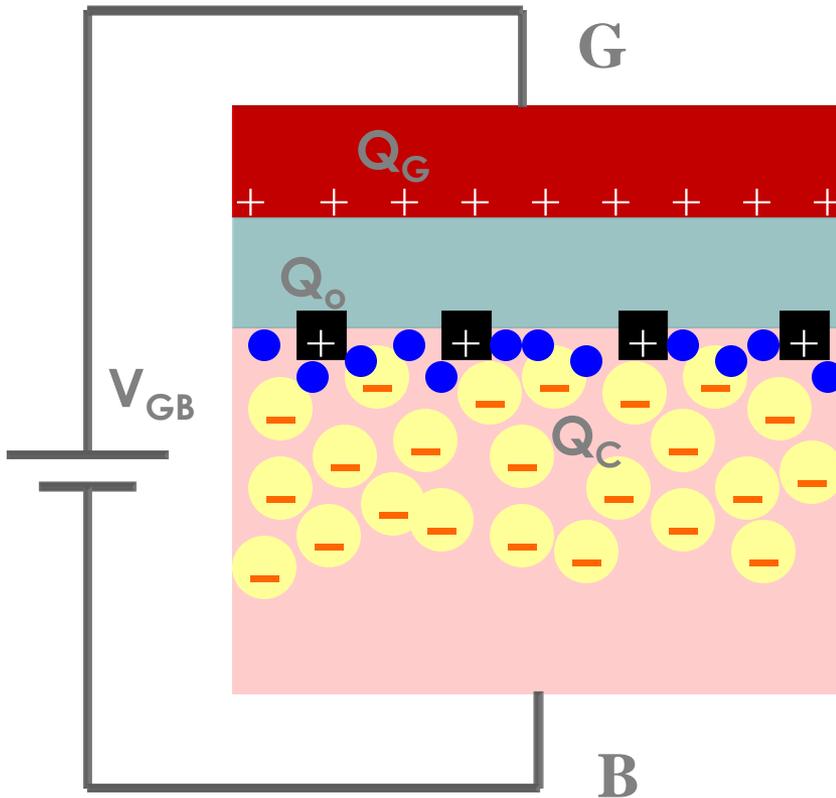
$$\phi_F = \text{potencial de Fermi} \cong \phi_t \cdot \ln(N_A/n_i)$$

$N_A$  = concentração de impurezas

$n_i$  = concentração intrínseca

$\phi_t$  = potencial termodinâmico

# Inversão



$$V_{GB} > V_{FB}$$

$$Q'_C < 0$$

$$\phi_s > \phi_F$$

Lacunas se afastam da superfície do semiconductor tipo P e elétrons ● se aproximam!

# Carga do semiconductor no capacitor MOS

$$Q'_C = \pm \gamma C'_{ox} \sqrt{\phi_t \left[ e^{-\phi_s/\phi_t} - 1 \right] + \phi_s + \phi_t \left[ e^{(\phi_s - 2\phi_F)/\phi_t} - e^{-2\phi_F/\phi_t} \right]}$$

lacunas

cargas fixas

elétrons livres

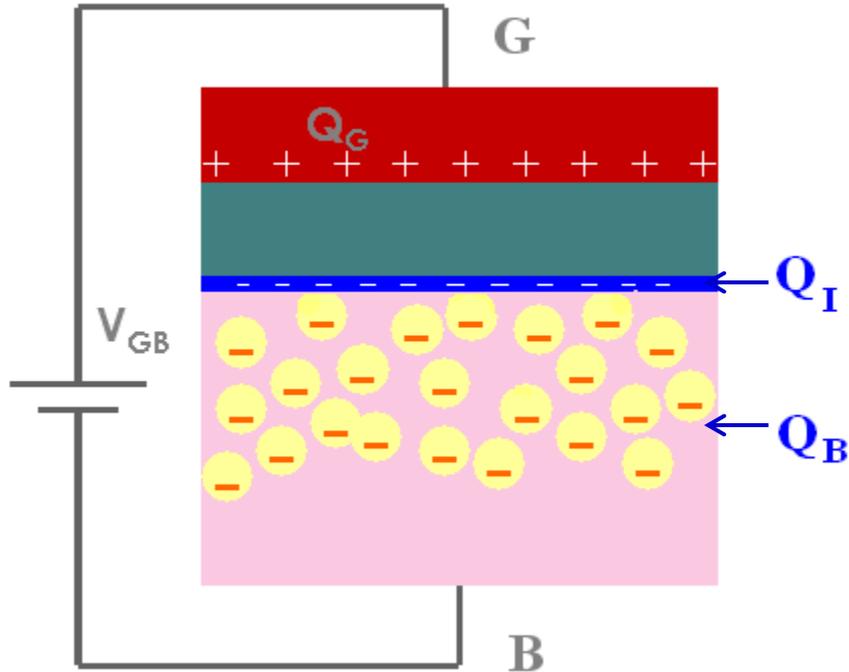
$$\gamma = \frac{\sqrt{2qN_A\epsilon_s}}{C'_{ox}} : \text{fator de corpo}$$

Acumulação ( $\phi_s < 0$ ): predomina a parcela das lacunas

Depleção ( $0 < \phi_s < \phi_F$ ): predomina a parcela das cargas fixas

Inversão ( $\phi_s > \phi_F$ ): a parcela dos elétrons livres tem influência

# Inversão



$$Q'_C = -\gamma C'_{ox} \sqrt{\phi_s + \phi_t} e^{(\phi_s - 2\phi_F)/\phi_t}$$

$$Q'_c = Q'_I + Q'_B$$

Duas aproximações:

**DEPLEÇÃO**

**FOLHA DE CARGA**

$$Q'_B = -\gamma C'_{ox} \sqrt{\phi_s - \phi_t}$$

$$Q'_I = -\gamma C'_{ox} \left( \sqrt{\phi_s + \phi_t} e^{(\phi_s - 2\phi_F)/\phi_t} - \sqrt{\phi_s - \phi_t} \right)$$

$$V_{GB} = \phi_{ox} + \phi_s + \phi_{MS}$$

$$Q'_G + Q'_C + Q'_O = 0$$

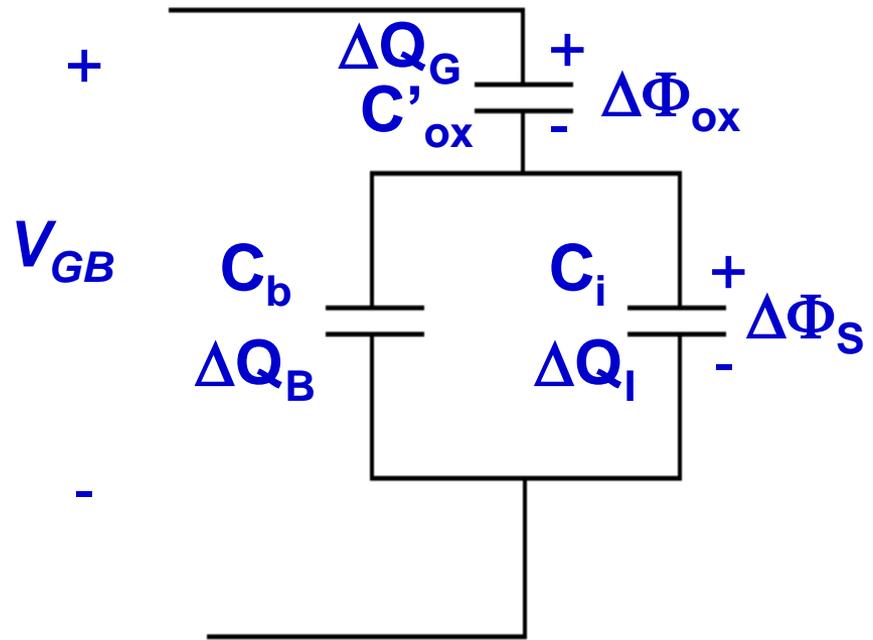
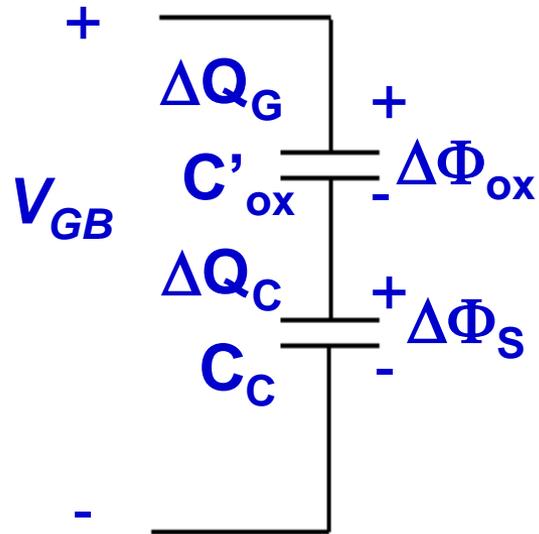
$$\phi_{ox} = \frac{Q'_G}{C'_{ox}} = -\frac{Q'_C + Q'_O}{C'_{ox}}$$

$$Q'_C = Q'_I + Q'_B$$

$$Q'_B = -\gamma C'_{ox} \sqrt{\phi_s}$$

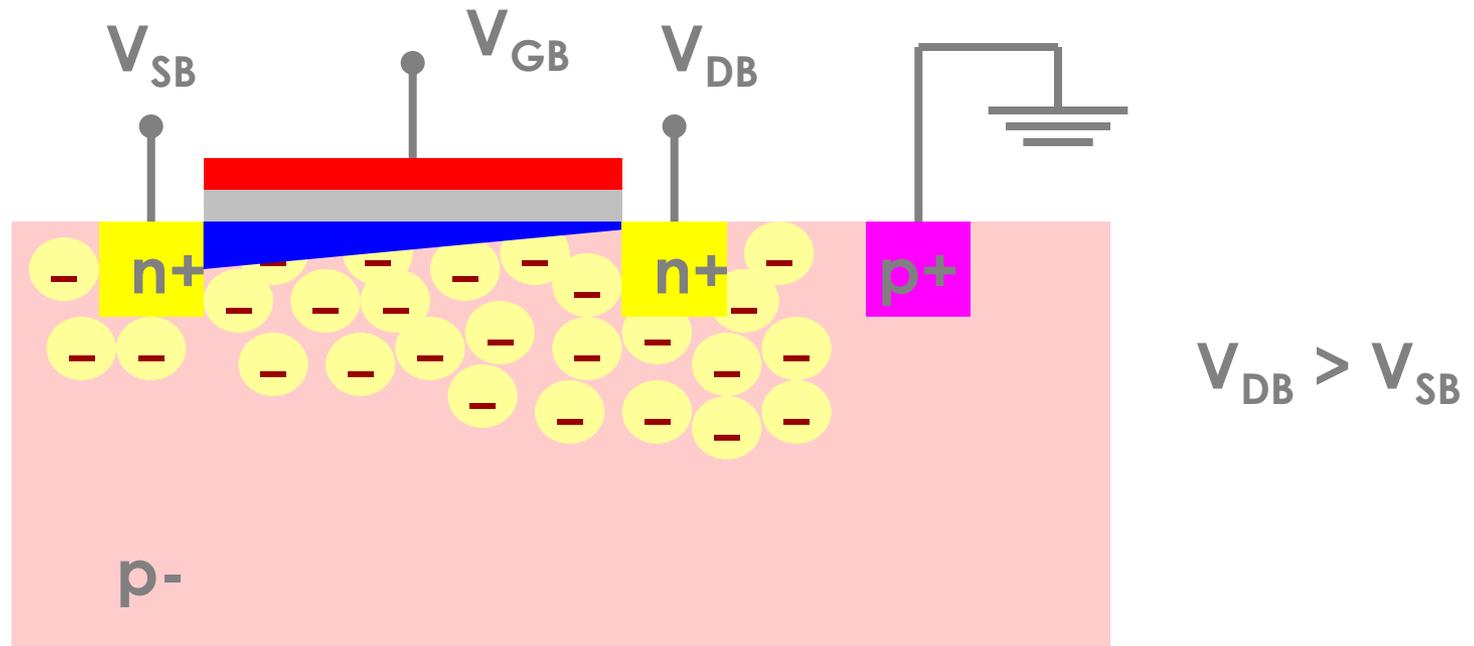
$$Q'_I = -C'_{ox} \left( V_{GB} - V_{FB} - \phi_s - \gamma \sqrt{\phi_s - \phi_t} \right)$$

# Modelo Capacitivo de Pequenos Sinais



# Transistor MOS

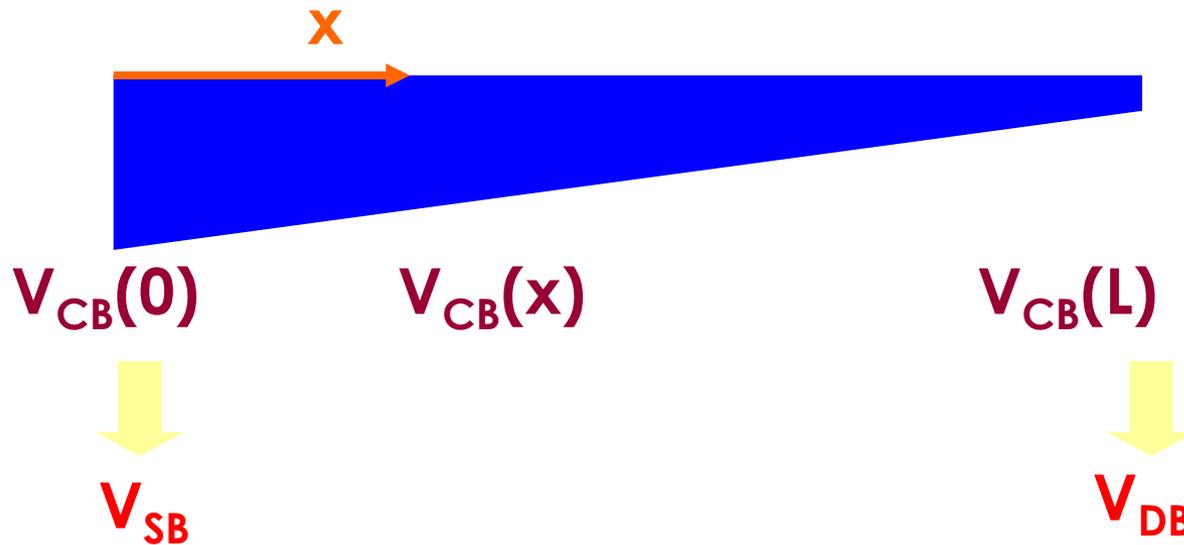
## Regime normal de operação: INVERSÃO



A ddp entre dreno e fonte influencia a distribuição de cargas

$V_{CB}(x)$  (tensão do canal):

desequilíbrio  
energético no ponto  
 $x$  do canal devido a  
 $V_{DB}$  e  $V_{SB}$



Em inversão e depleção, num ponto  $x$  arbitrário:

$$Q'_C = -\gamma C'_{ox} \sqrt{\phi_s + \phi_t} e^{(\phi_s - 2\phi_F - V_{CB})/\phi_t}$$

$$Q'_C = Q'_I + Q'_B$$



densidade de carga do canal de inversão

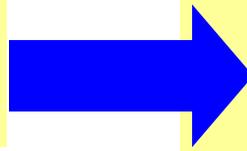


densidade de carga da região de depleção

Balanço de tensões:  $Q'_C = -C'_{ox} (V_{GB} - V_{FB} - \phi_s)$

Aproximação de **DEPLEÇÃO** e de **FOLHA DE CARGA**:

$$Q'_B = -\gamma C'_{ox} \sqrt{\phi_s - \phi_t}$$

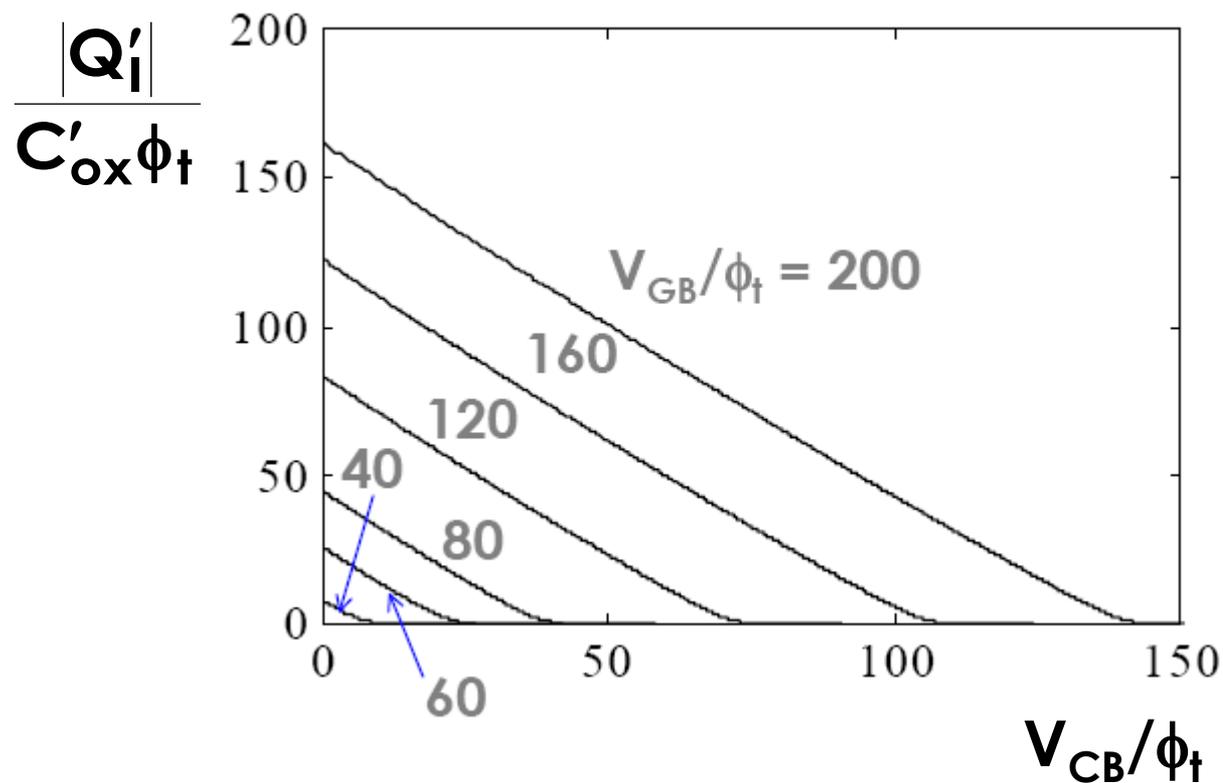


$$Q'_I = -C'_{ox} (V_{GB} - V_{FB} - \phi_s - \gamma \sqrt{\phi_s})$$

# Densidade de carga de inversão no transistor MOS

$$Q'_I = -C'_{ox} (V_{GB} - V_{FB} - \phi_s - \gamma \sqrt{\phi_s - \phi_t})$$

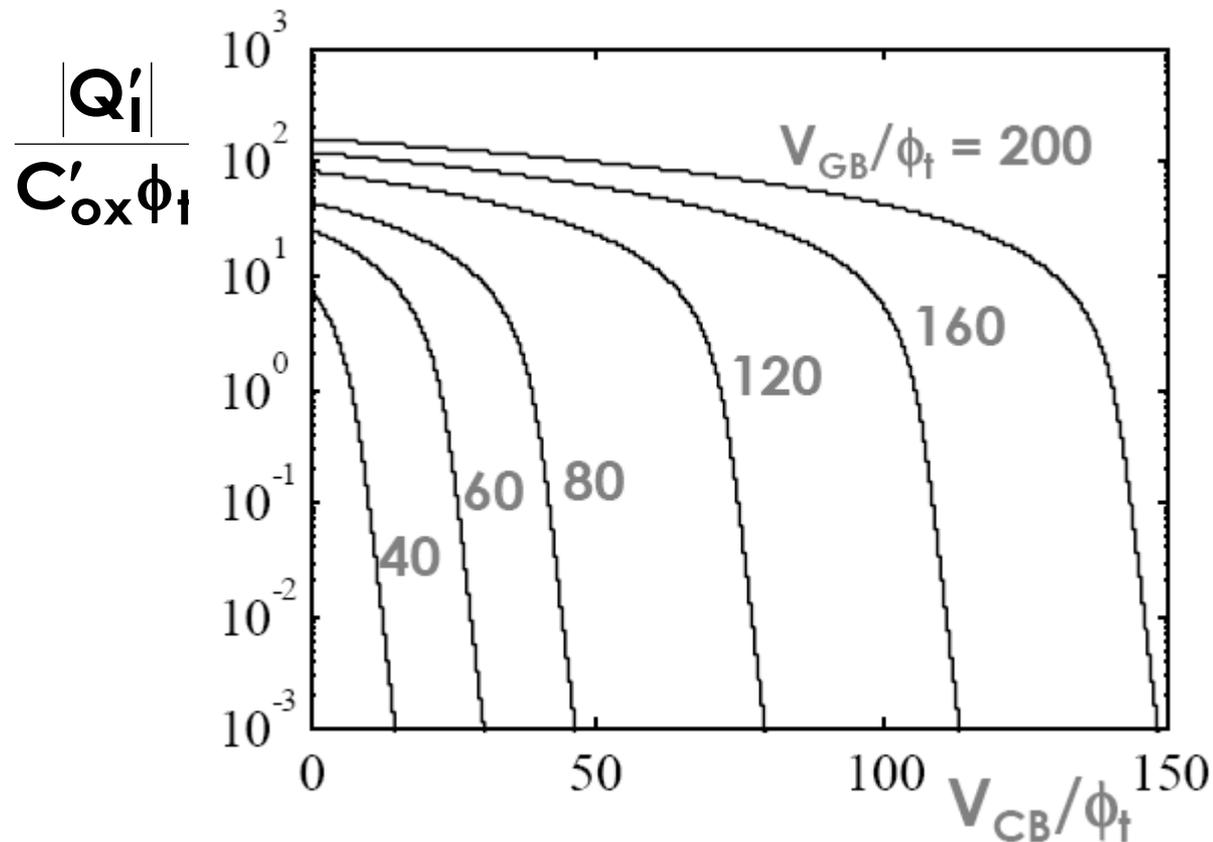
Inversão Forte: comportamento retilíneo



# Densidade de carga de inversão no transistor MOS

$$Q'_I = -C'_{ox} (V_{GB} - V_{FB} - \phi_s - \gamma \sqrt{\phi_s - \phi_t})$$

Inversão Fraca: comportamento exponencial



## Linearização da carga de inversão

$$Q'_I \cong C'_{ox} n (\phi_s - \phi_{sa})$$

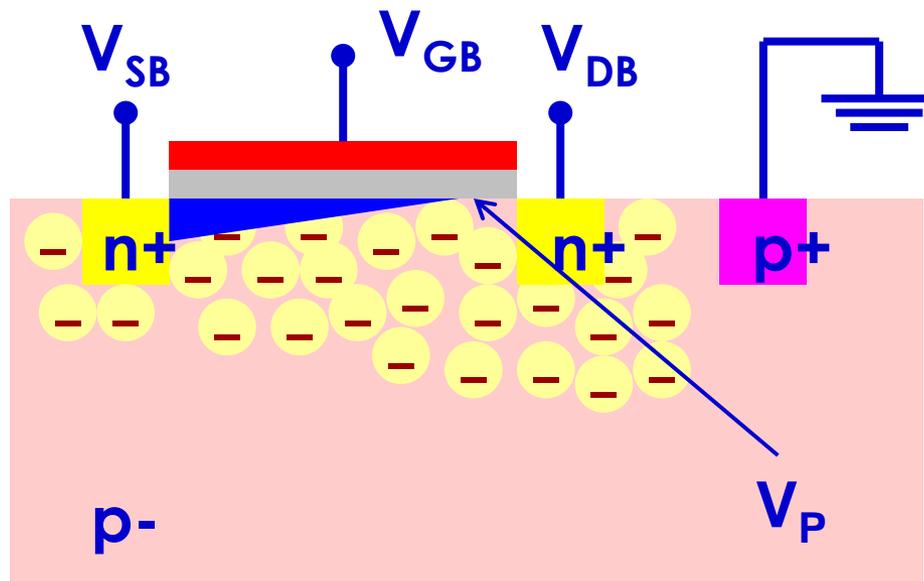
$$\phi_{sa} = \phi_s \Big|_{Q'_I=0} \quad n = \frac{dQ'_I}{d\phi_s} \Big|_{\phi_s=\phi_{sa}} = 1 + \frac{\gamma}{2\sqrt{\phi_{sa} - \phi_t}}$$

A partir da equação do balanço de potencial

$$\sqrt{\phi_{sa} - \phi_t} = \sqrt{V_G - V_{FB} - \phi_t + \frac{\gamma^2}{4}} - \frac{\gamma}{2}$$

Tensão de pinch-off ( $V_p$ ): tensão no canal correspondente a uma certa quantidade de portadores no canal (pequena)

$$Q'_I = Q'_{IP} = -nC'_{ox}\phi_t$$



$$\phi_{sa} \cong \left( \sqrt{V_{GB} - V_{FB} + \frac{\gamma^2}{4}} - \frac{\gamma}{2} \right)^2$$

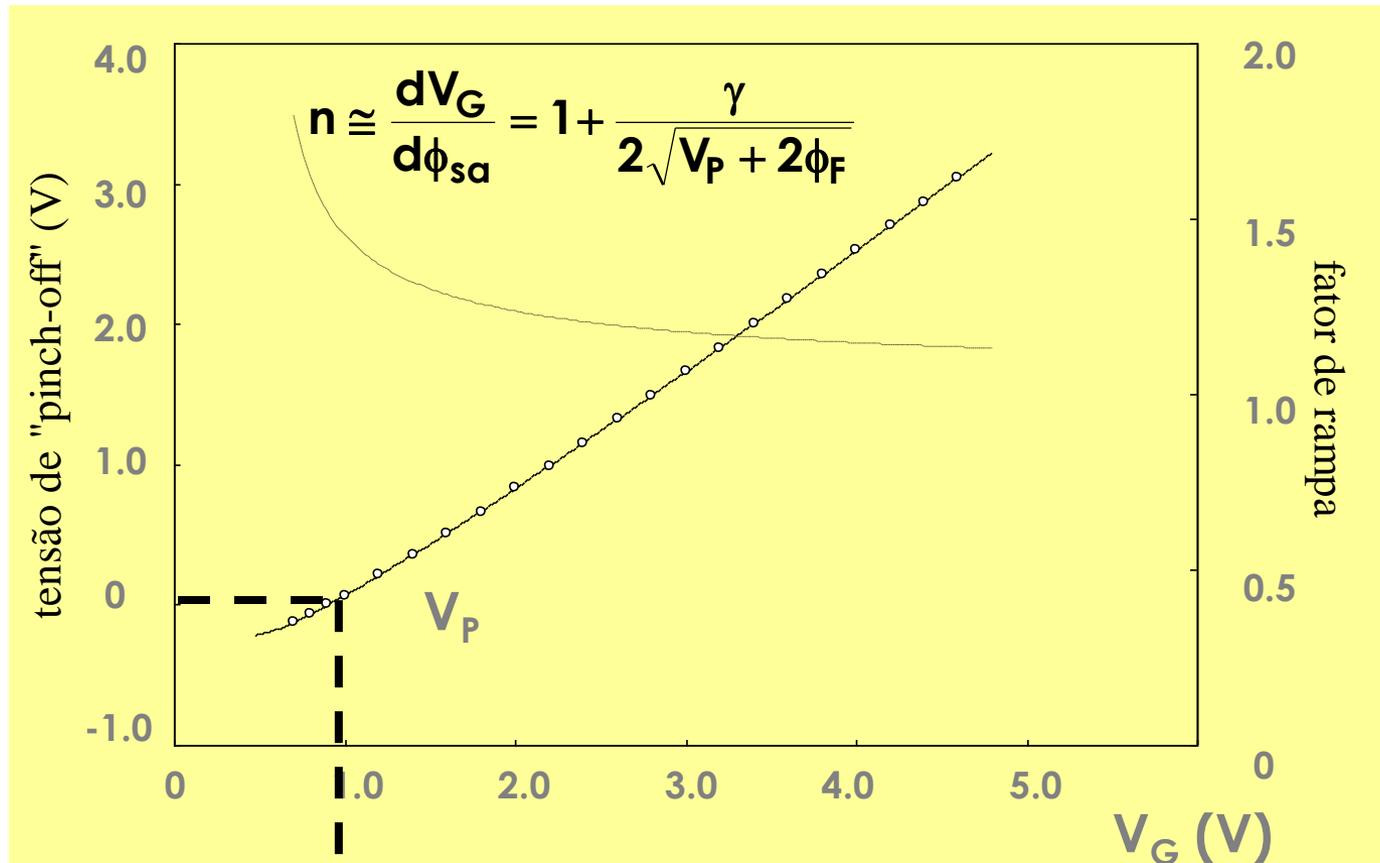
$$V_P = \phi_{sa} - 2\phi_F$$

Tensão de limiar no equilíbrio

$$V_{T0} = V_G|_{V_P=0}$$

$$V_{T0} = V_{FB} + 2\phi_F + \gamma\sqrt{2\phi_F}$$

# Tensão de “pinch-off” x tensão de porta



**$V_{T0}$  (tensão de limiar no equilíbrio)**

Aproximação útil: 
$$V_P \cong \frac{V_{GB} - V_{T0}}{n}$$