

Circuitos Integrados Analógicos

A microeletrônica hoje é basicamente fundamentada em circuitos integrados analógicos e digitais. A tecnologia de integração CMOS (*Complementary Metal-Oxide-Semiconductor*) é a mais usada, devido a, principalmente, sua alta densidade de integração de circuitos.

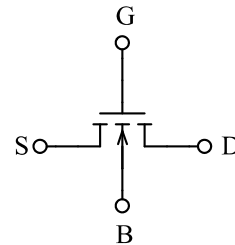
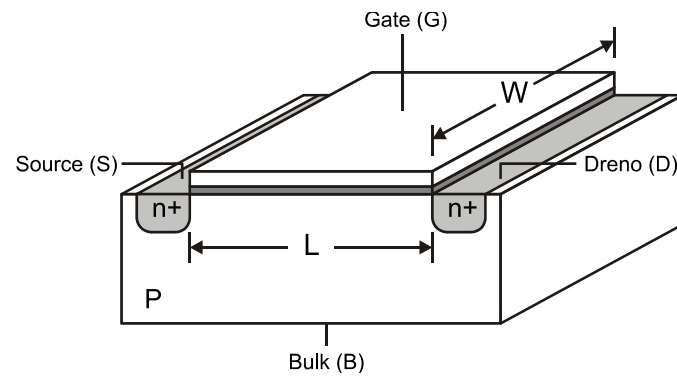
O objetivo desse curso é o estudo de circuitos analógicos para a fabricação de circuitos integrados CMOS. O estudo de técnicas e projeto de *layout* de circuitos integrados não é o foco dessa disciplina, apesar de que algumas topologias básicas de *layout* serão apresentadas em casos específicos.

Transistor MOSFET de Canal N

MOSFET \longrightarrow Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor

NMOS \longrightarrow MOSFET de canal N

NMOS



G \longrightarrow Gate

D \longrightarrow Drain

S \longrightarrow Source

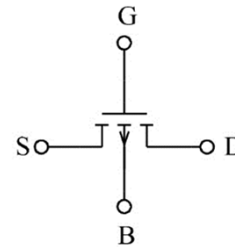
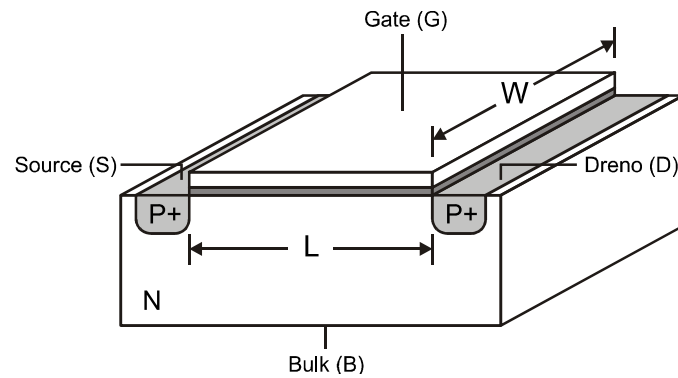
B \longrightarrow Bulk

Transistor MOSFET de Canal P

MOSFET \longrightarrow Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor

PMOS \longrightarrow MOSFET de canal P

PMOS



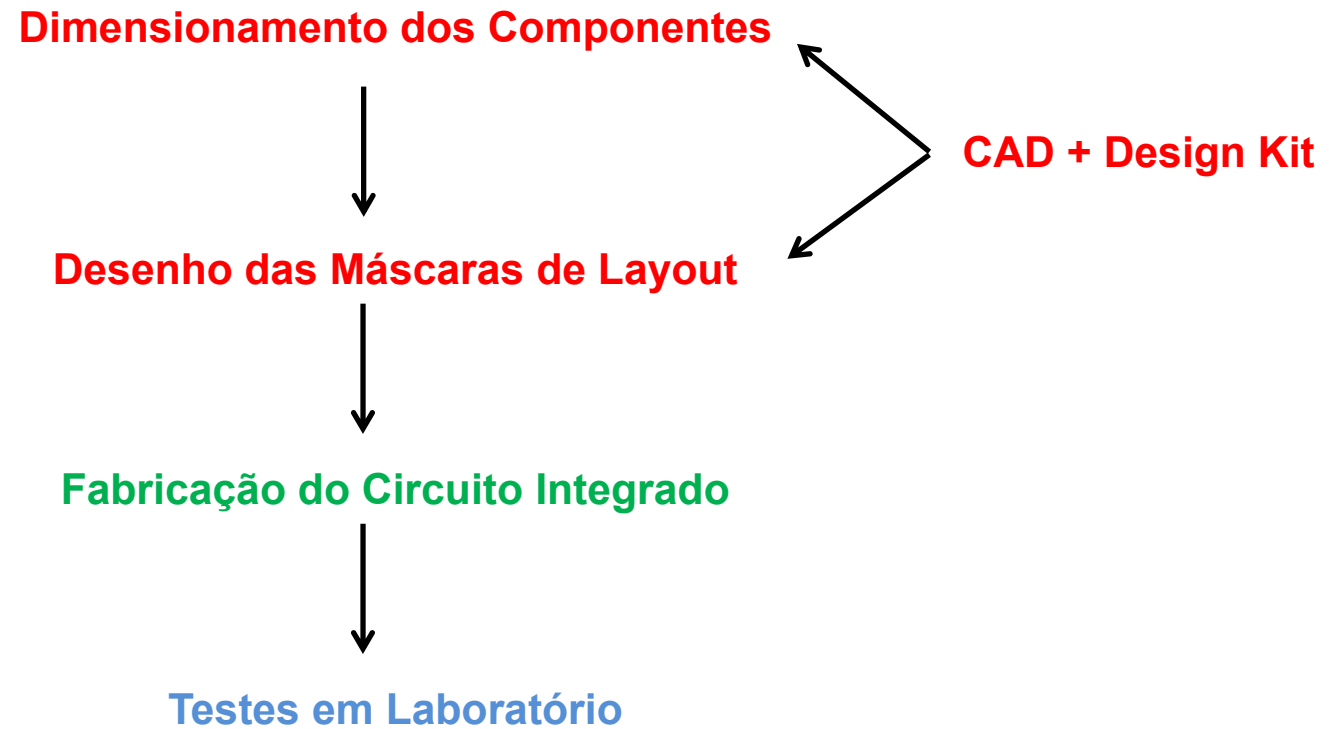
G \longrightarrow Gate

D \longrightarrow Drain

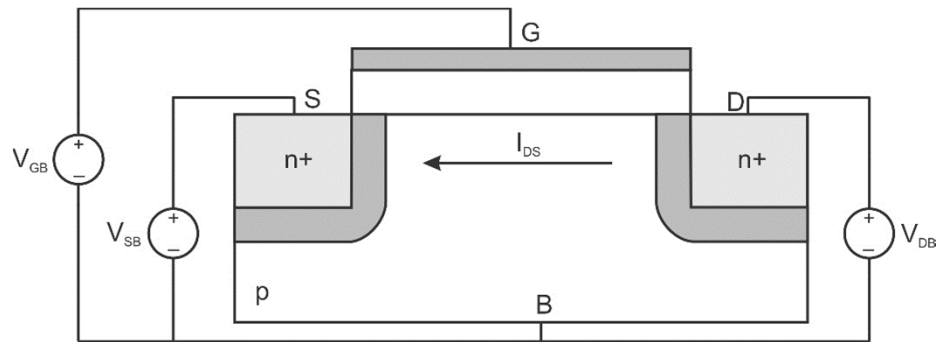
S \longrightarrow Source

B \longrightarrow Bulk

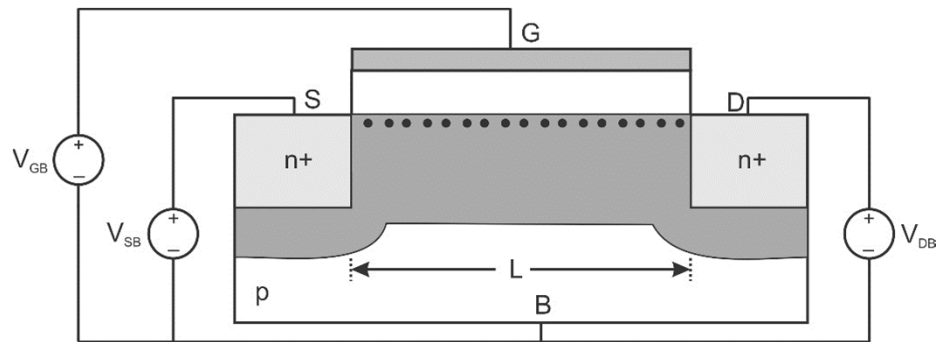
Fabricação do Circuito Integrado



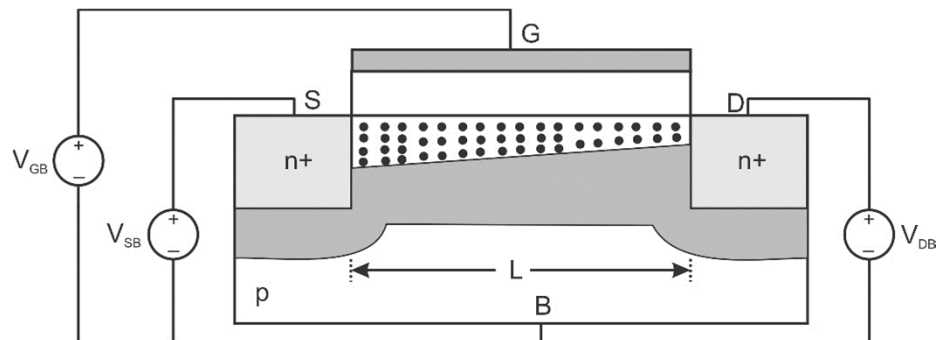
Regiões de operação – Modelo SPICE



Corte \rightarrow $V_{GS} \leq 0$
 $I_{DS} = 0$



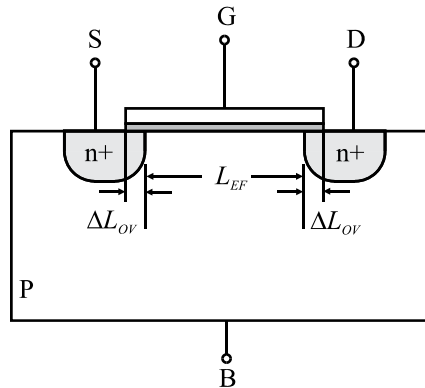
Inversão Fraca \rightarrow $0 \leq V_{GS} \leq V_T$



Inversão Forte \rightarrow $V_{GS} > V_T$

Comprimento efetivo de canal

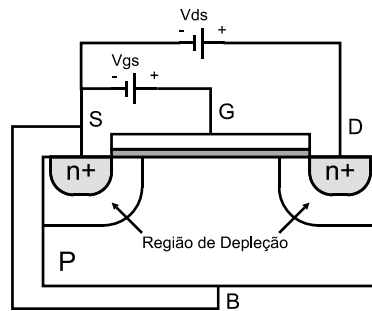
Durante a fabricação do MOSFET, as difusões de source e dreno penetram por debaixo da área do gate, reduzindo o comprimento do canal em $2\Delta L_{ov}$. Desta forma, o comprimento real do canal não é mais equivalente ao comprimento L do gate, mas ao valor efetivo $L_{EF}=L-2\Delta L_{ov}$.



Modelo DC SPICE simplificado

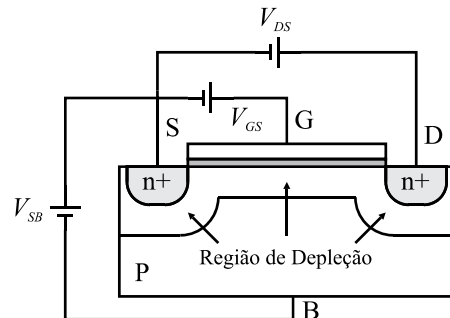
Regiões de operação

Corte



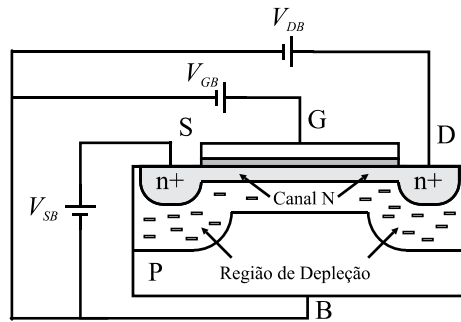
$$\begin{cases} V_{GS} \leq 0 \\ I_{DS} = 0 \end{cases}$$

Inversão fraca



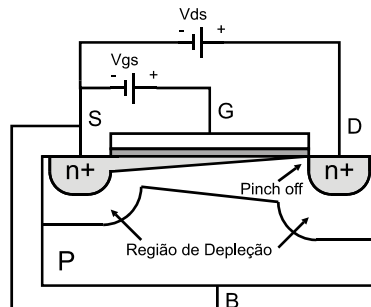
$$\begin{cases} 0 \leq V_{GS} \leq V_T \\ I_{DS} = I_{D0} e^{\frac{V_{GS} - V_T}{n\phi_T}} \left(1 - e^{-V_{DS}/\phi_T} \right) \\ I_{D0} = \phi_T^2 k_p \frac{W}{L_{EF}} (n - 1) \\ n = 1 + \frac{\gamma}{2\sqrt{2\phi_F + V_{SB}}} \\ \phi_T = \frac{k_B T}{q} \\ k_p = \mu_n C_{ox} \end{cases}$$

Triodo - inversão forte



$$\left\{ \begin{array}{l} V_{GS} > V_T \\ I_{DS} = k_p \frac{W}{L_{EF}} \left[(V_{GS} - V_T) V_{DS} - \frac{\alpha}{2} V_{DS}^2 \right] \\ V_{DS} \leq V_{sat} \\ V_{sat} = \frac{V_{GS} - V_T}{\alpha} \end{array} \right.$$

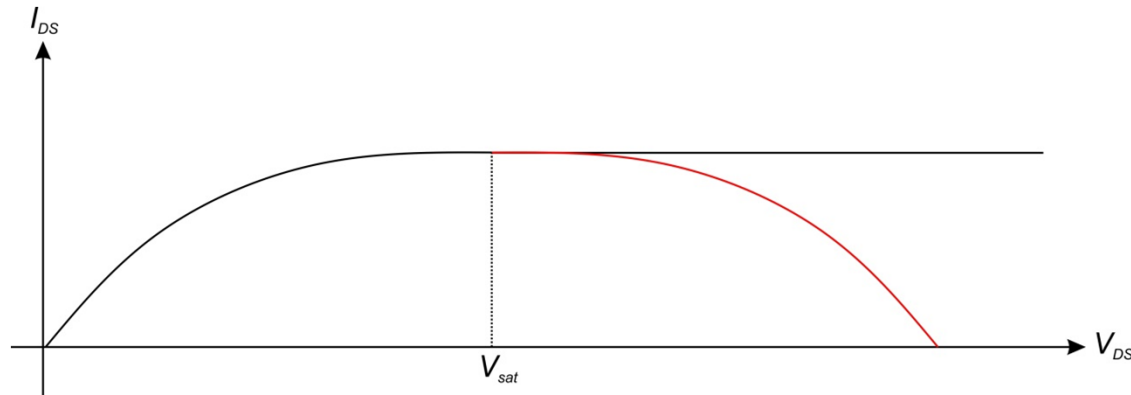
Saturação - inversão forte



$$\left\{ \begin{array}{l} V_{GS} > V_T \\ I_{DS} = \frac{k_p}{2\alpha} \frac{W}{L_{EF}} (V_{GS} - V_T)^2 \\ V_{DS} > V_{sat} \\ V_{sat} = \frac{V_{GS} - V_T}{\alpha} \end{array} \right.$$

Saturação na inversão forte

$$I_{DS} = k_p \frac{W}{L_{EF}} \left[(V_{GS} - V_T) V_{DS} - \frac{\alpha}{2} V_{DS}^2 \right] \longrightarrow \text{Curva do segundo grau com um ponto de máximo}$$



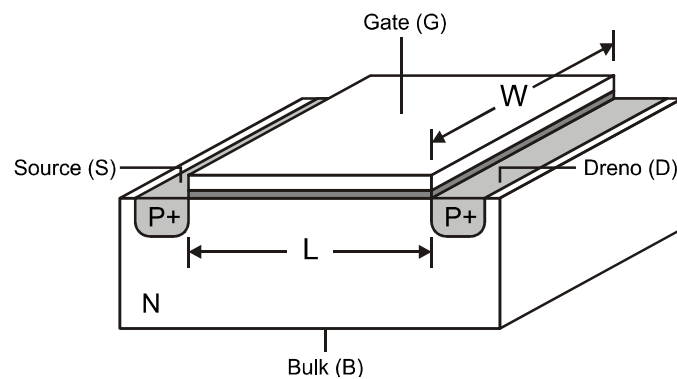
Tensão de saturação $\longrightarrow \frac{dI_{DS}}{dV_{DS}} = 0 \Rightarrow V_{sat} = \frac{V_{GS} - V_T}{\alpha}$

$$\downarrow$$
$$I_{DS} = k_p \frac{W}{L_{EF}} \left[(V_{GS} - V_T) V_{DS} - \frac{\alpha}{2} V_{DS}^2 \right]$$

$$\downarrow$$
$$I_{DS} = \frac{k_p}{2\alpha} \frac{W}{L_{EF}} (V_{GS} - V_T)^2$$

Equações do PMOS

As equações do PMOS são as mesmas do NMOS, bastando fazer a mudança de variáveis:



$$I_{DS} \rightarrow I_{SD}$$

$$V_{GS} \rightarrow V_{SG}$$

$$V_{DS} \rightarrow V_{SD}$$

$$V_{SB} \rightarrow V_{BS}$$

$$V_T \rightarrow |V_T| \rightarrow \text{atensão de treshold é negativa}$$

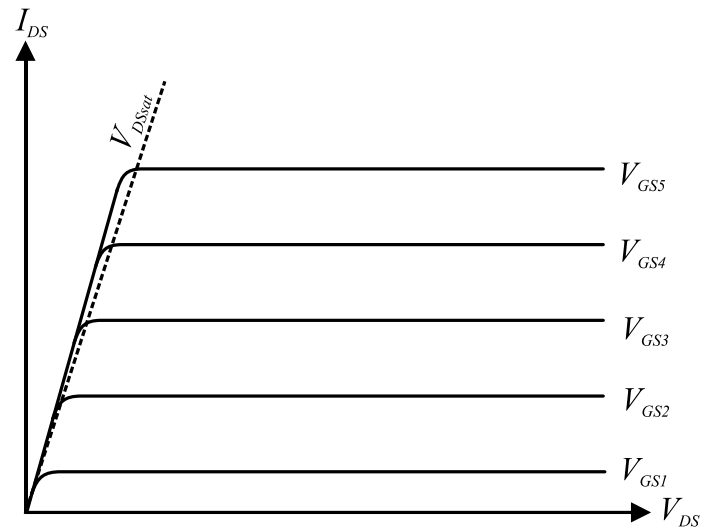
$$\text{Corte} \longrightarrow \begin{cases} V_{SG} \leq 0 \\ I_{SD} = 0 \end{cases}$$

$$\text{Inversão fraca} \longrightarrow \begin{cases} 0 \leq V_{SG} \leq |V_T| \\ I_{SD} = I_{D0} e^{\frac{V_{SG} - |V_T|}{n\phi_T}} \left(1 - e^{-V_{SD}/\phi_T} \right) \\ I_{D0} = \phi_T^2 k_p \frac{W}{L_{EF}} (n - 1) \\ n = 1 + \frac{\gamma}{2\sqrt{2\phi_F + V_{BS}}} \\ \phi_T = \frac{k_B T}{q} \\ k_p = \mu_p C_{ox} \end{cases}$$

Triodo - inversão forte \longrightarrow
$$\left\{ \begin{array}{l} V_{SG} > |V_T| \\ I_{SD} = k_p \frac{W}{L_{EF}} \left[(V_{SG} - |V_T|) V_{SD} - \frac{\alpha}{2} V_{SD}^2 \right] \\ V_{SD} \leq V_{sat} \\ V_{sat} = \frac{V_{SD} - |V_T|}{\alpha} \end{array} \right.$$

Saturação - inversão forte \longrightarrow
$$\left\{ \begin{array}{l} V_{SG} > |V_T| \\ I_{SD} = \frac{k_p}{2\alpha} \frac{W}{L_{EF}} (V_{SG} - |V_T|)^2 \\ V_{SD} > V_{sat} \\ V_{sat} = \frac{V_{SG} - |V_T|}{\alpha} \end{array} \right.$$

Curvas características



Fonte de corrente ideal
na região de saturação

**Final deste
Tópico**