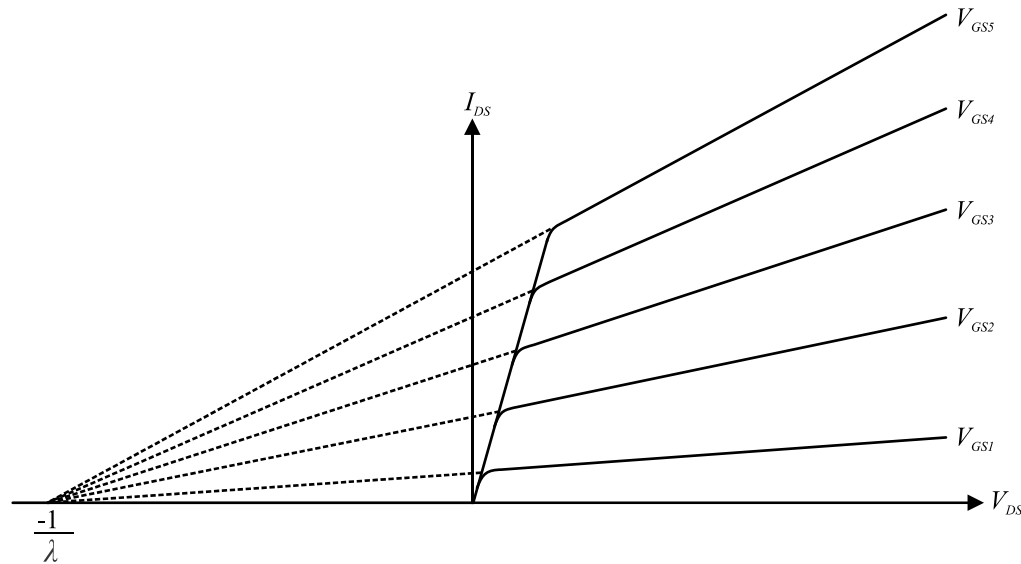


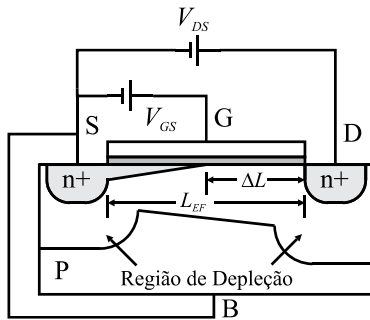
Efeitos de Segunda Ordem

Os modelos simplificados desprezam as influências de uma grande quantidade de parâmetros nos transistores. Porém podemos introduzir nos modelos simplificados a influências de maiores intensidades. Chamamos a isso de efeitos de segunda ordem.

Modulação de canal

É mais perceptível em canal curto, onde o ponto de tensão de *pinch-off* se desloca em sentido ao source, reduzindo a resistência do canal. Isto muda a característica de fonte de corrente ideal na região de saturação.





$$\Delta L = \sqrt{\frac{2\kappa\epsilon_s}{qN_A}(V_{DS} - V_{sat})}$$

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

$$I_{DS} = \frac{k_p}{2\alpha} \frac{W}{L_{EF} - \Delta L} (V_{GS} - V_T)^2 = \frac{k_p}{2\alpha} \frac{W}{L_{EF} \left(1 - \frac{\Delta L}{L_{EF}}\right)} (V_{GS} - V_T)^2 \approx \frac{k_p}{2\alpha} \frac{W}{L_{EF}} (V_{GS} - V_T)^2 \left(1 + \frac{\Delta L}{L_{EF}}\right)$$

I_{DS} na inversão forte e saturação $\longrightarrow I_{DS} = \frac{k_p}{2\alpha} \frac{W}{L_{EF}} (V_{GS} - V_T)^2 \left(1 + \sqrt{\frac{2\kappa\epsilon_s}{qN_A}} \frac{\sqrt{V_{DS} - V_{sat}}}{L_{EF}}\right)$

Uma aproximação muito usada para representar a dependência de I_{DS} com V_{DS} é a tensão de Early (V_A) e o parâmetro λ .

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

I_{DS} na inversão
forte e saturação

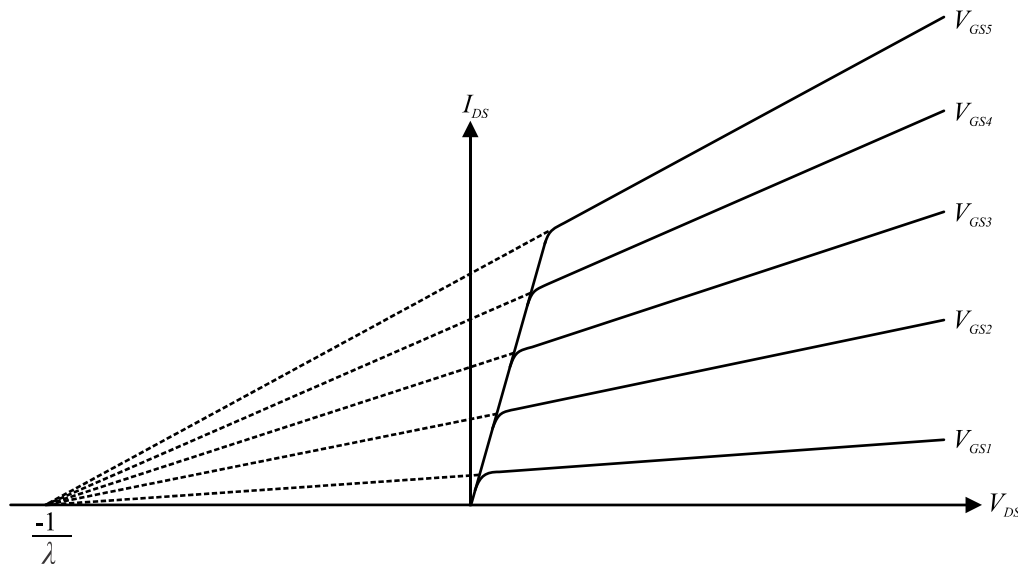
$$\rightarrow I_{DS} = \frac{k_p}{2\alpha} \frac{W}{L_{EF}} (V_{GS} - V_T)^2 (1 + \lambda V_{DS})$$

$$\left(1 + \sqrt{\frac{2\kappa\epsilon_s}{qN_A}} \frac{\sqrt{V_{DS} - V_{DSsat}}}{L_{EF}} \right)$$

I_{DS} na inversão
fraca e saturação

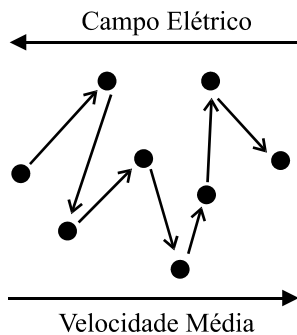
$$\rightarrow I_{DS} = I_{D0} e^{\frac{V_{GS} - V_T}{n\phi_T}} (1 + \lambda V_{DS})$$

Drain-induced barrier
lowering (DIBL)



Saturação de mobilidade

A corrente elétrica no canal está diretamente relacionada com a velocidade das cargas, que é determinada pelo campo elétrico e a mobilidade μ . Entretanto, as cargas interagem com as imperfeições da rede cristalina (impurezas, dopantes, etc...), provocando espalhamento e um movimento desordenado. Isto reduz a velocidade média das cargas e, conseqüentemente, a corrente.



Modelo matemático

$$\mu_s = \frac{\mu_{n,p}}{1 + \theta(V_{GS} - V_T)}$$

I_{DS} na inversão forte e saturação

$$\longrightarrow I_{DS} = \frac{k_p}{2\alpha} \frac{W}{L_{EF}} \frac{(V_{GS} - V_T)^2}{1 + \theta(V_{GS} - V_T)} (1 + \lambda V_{DS})$$

I_{DS} na inversão forte e triodo

$$\longrightarrow I_{DS} = \frac{k_p}{1 + \theta(V_{GS} - V_T)} \frac{W}{L_{EF}} \left[(V_{GS} - V_T) V_{DS} - \frac{\alpha}{2} V_{DS}^2 \right]$$

Saturação de velocidade

Outro efeito de redução da mobilidade é observado em transistores de canal muito curto, e é dependente da tensão V_{DS} . O campo elétrico no canal depende da tensão V_{DS} e do comprimento efetivo L_{EF} pela fórmula $E=V_{DS}/L_{EF}$. Consequentemente, a velocidade das cargas também dependerá da tensão V_{DS} , pois $|v|=\mu_s E$. Entretanto, existe uma distância média entre as interações da carga dentro da rede, e isto limita a máxima velocidade que a carga pode alcançar. Desta forma, existe uma saturação de velocidade, tal como a velocidade limite de um corpo em queda livre, que implica na redução da mobilidade.

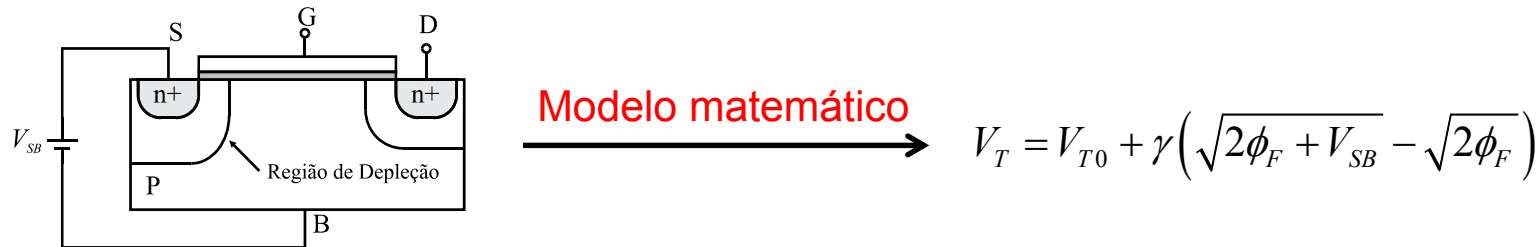
$$\mu_{eff} = \frac{\mu_s}{1 + \frac{\mu_s}{v_{max}} \frac{V_{DS}}{L_{EF}}} \longrightarrow \mu_s = \frac{\mu_{n,p}}{1 + \theta(V_{GS} - V_T)}$$

$$I_{DS} \text{ na inversão forte e saturação} \longrightarrow I_{DS} = \frac{k_p}{2\alpha(1 + \theta(V_{GS} - V_T)) \left(1 + \frac{\mu_s}{v_{max}} \frac{V_{DS}}{L_{EF}}\right)} \frac{W}{L_{EF}} (V_{GS} - V_T)^2 (1 + \lambda V_{DS})$$

$$I_{DS} \text{ na inversão forte e triodo} \longrightarrow I_{DS} = \frac{k_p}{(1 + \theta(V_{GS} - V_T)) \left(1 + \frac{\mu_s}{v_{max}} \frac{V_{DS}}{L_{EF}}\right)} \frac{W}{L_{EF}} \left[(V_{GS} - V_T) V_{DS} - \frac{\alpha}{2} V_{DS}^2 \right]$$

Efeito de corpo

Quando a tensão V_{SB} é maior que zero, o diodo source-substrato é polarizado reversamente, aumentando a profundidade da região de depleção. Desta forma, para alcançar a tensão de *threshold*, é necessária uma diferença de potencial maior entre o gate e o source, o que implica no aumento da tensão de *threshold*. Este fenômeno é conhecido como efeito de corpo.



Este efeito pode ser incorporado nas equações do MOSFET bastando trocar V_T pela equação acima.

Efeitos de segunda ordem no PMOS

Modulação de canal

I_{DS} na inversão forte e saturação

$$\longrightarrow I_{SD} = \frac{k_p}{2\alpha} \frac{W}{L_{EF}} (V_{SG} - |V_T|)^2 (1 + \lambda V_{SD})$$

I_{DS} na inversão fraca e saturação

$$\longrightarrow I_{SD} = I_{D0} e^{\frac{V_{SG} - |V_T|}{n\phi_T}} (1 + \lambda V_{SD}) \longleftarrow \text{DIBL}$$

Saturação de mobilidade

I_{DS} na inversão forte e saturação

$$\longrightarrow I_{SD} = \frac{k_p}{2\alpha} \frac{W}{L_{EF}} \frac{(V_{SG} - |V_T|)^2}{1 + \theta(V_{SG} - |V_T|)} (1 + \lambda V_{SD})$$

I_{DS} na inversão forte e triodo

$$\longrightarrow I_{SD} = \frac{k_p}{1 + \theta(V_{SG} - |V_T|)} \frac{W}{L_{EF}} \left[(V_{SG} - |V_T|) V_{SD} - \frac{\alpha}{2} V_{SD}^2 \right]$$

Saturação de velocidade

$$\mu_{eff} = \frac{\mu_s}{1 + \frac{\mu_s}{v_{max}} \frac{V_{SD}}{L_{EF}}} \longrightarrow \mu_s = \frac{\mu_0}{1 + \theta(V_{SG} - |V_T|)}$$

I_{DS} na inversão forte e saturação $\longrightarrow I_{SD} = \frac{k_p}{2\alpha} \frac{W}{L_{EF}} \frac{(V_{SG} - |V_T|)^2}{(1 + \theta(V_{SG} - |V_T|)) \left(1 + \frac{\mu_s}{v_{max}} \frac{V_{SD}}{L_{EF}}\right)} (1 + \lambda V_{SD})$

I_{DS} na inversão forte e triodo $\longrightarrow I_{SD} = \frac{k_p}{(1 + \theta(V_{SG} - |V_T|)) \left(1 + \frac{\mu_s}{v_{max}} \frac{V_{SD}}{L_{EF}}\right)} \frac{W}{L_{EF}} \left[(V_{SG} - |V_T|) V_{SD} - \frac{\alpha}{2} V_{SD}^2 \right]$

Efeito de corpo

$$V_T = V_{T0} - \gamma \left(\sqrt{2\phi_F + V_{BS}} - \sqrt{2\phi_F} \right) \rightarrow V_{T0} \text{ é negativo}$$

**Final deste
Tópico**