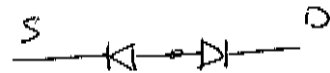
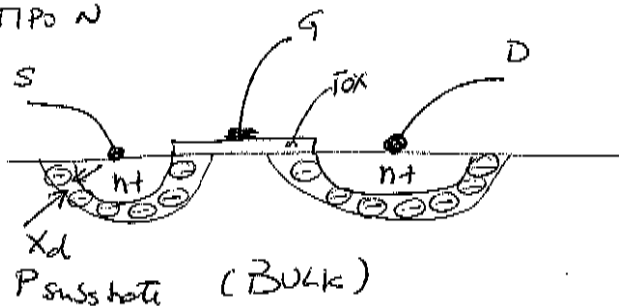


MODELOS ELÉCTRICOS PARA MOSFETS

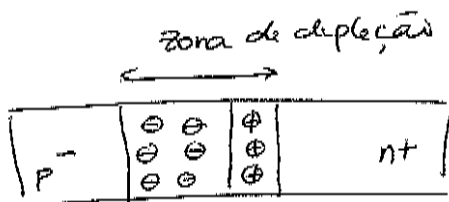
Derivação de V_T

MOSFET TIPO N

Allen
p 48
p 49
p 51



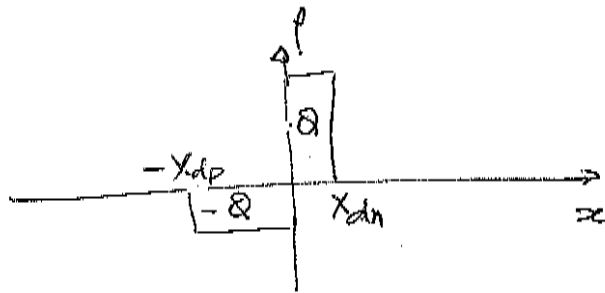
Junção pn



conservação de carga

$$X_{dp} N_A = X_{dn} N_D$$

Lei de Gauss



$$\iiint_V \nabla \cdot \vec{E} dV = Q = \iiint_V \frac{\rho}{\epsilon} dV$$

E_x Poisson

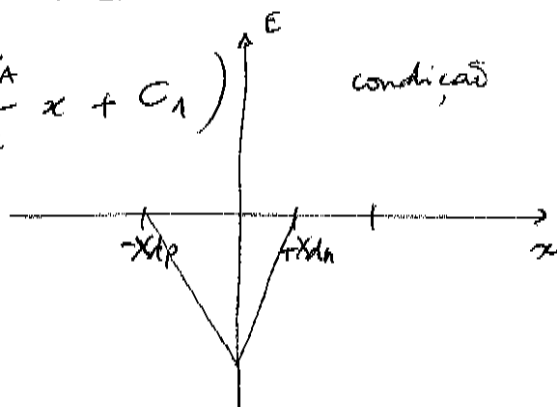
$$\frac{d^2V}{dx^2} = -\frac{\rho}{\epsilon} = -\frac{q N_A}{\epsilon}$$

charge density
concentração de aceitadores

permissividade elétrica

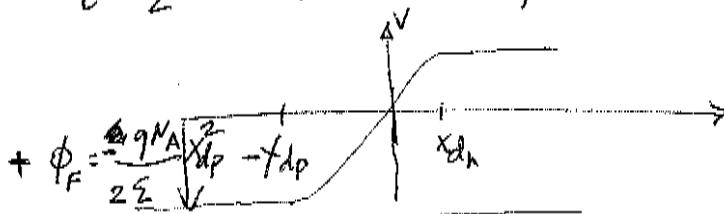
$$E = -\frac{dV}{dx} = -\left(\frac{q N_A}{\epsilon} x + C_1\right)$$

condição $E=0$ para $x = -X_{dp}$



$$V = \frac{q N_A}{\epsilon} \left(\frac{x^2}{2} + X_{dp} x \right) + C_2$$

condição $V=0$ para $x=0$



$$X_{dp} = \sqrt{\frac{2\epsilon |\phi_F|}{q N_A}} \quad | \quad -\phi_F \text{ potencial no substrato}$$

Carga no substrato:

$$Q = q N_A X_{dp} = q N_A \sqrt{\frac{2 \epsilon |\phi_F|}{q N_A}} = \sqrt{2 \epsilon q N_A |\phi_F|}$$

É possível provar (Física do Estado sólido) que

$$\phi_F = + \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A}{n_i}$$

(Quando a junção está inversamente polarizada com $+V_{SB}$)

Tensão que é necessária pos no gate G para inverter o canal

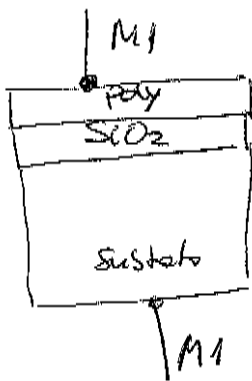
⇒ Tensão de threshold V_T

$$V_T = \frac{Q}{C_{ox}} = \frac{1}{C_{ox}} \sqrt{2 \epsilon q N_A |2\phi_F|} + 2\phi$$

Na prática há mais tensões envolvidas

→ carga "apoiada" no óxido (fixed oxide charge) Q_f

→ potencial de contacto metal gate e substrato metal



$$\begin{aligned} \phi_{ms} = \phi_G + \phi_{SUBST} &= \frac{kT}{q} \left(\ln \frac{N_{GATE}}{n_i} + \ln \frac{n_i}{N_{SUBS}} \right) \\ &= \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_{GATE} N_{SUBS}}{n_i^2} \right) \end{aligned}$$

$$V_T = \phi_{ms} + \frac{Q_f}{C_{ox}} + \frac{Q}{C_{ox}} + 2\phi + \frac{Q_I}{C_{ox}}$$

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{T_{ox}}$$

Quando a junção está inversamente polarizada com $+V_{SB}$:

$$V_T = \phi_{ms} + \frac{Q_f}{C_{ox}} + \frac{1}{C_{ox}} \sqrt{2 \epsilon q N_A (V_{SB} + 2\phi_F)}$$

É conveniente definir

$$V_T = V_{T\phi} + \gamma (\sqrt{2\phi + V_{SB}} - \sqrt{2\phi})$$

em que $V_{T\phi} = V_T (V_{SB} = 0)$ com $\gamma = \sqrt{2 \epsilon q N_A} / C_{ox}$

DERIVAÇÃO DE I_D

$(V_{GS} > V_T)$

linear region

$V_{DS} < V_{GS} - V_T$

$$I_D = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} \left((V_{GS} - V_T) V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right)$$

active region

$(V_{GS} < V_T)$

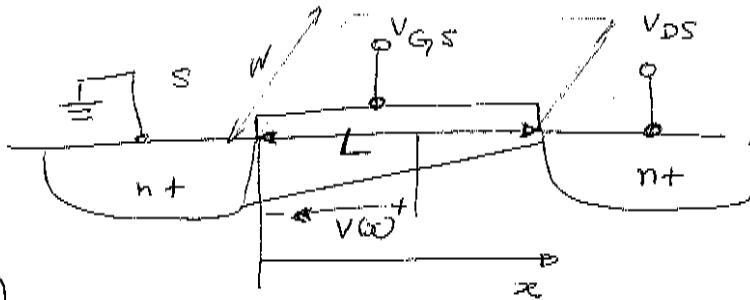
(saturation region)

$V_{DS} > V_{GS} - V_T$

$$I_D = \frac{\mu_n C_{ox}}{2} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T)^2 (1 + \lambda V_{DS})$$

Com

$$V_T = V_{T0} + \gamma \left(\sqrt{V_{SB} + 2\phi} - \sqrt{2\phi} \right)$$



$(V_{GS} > V_T)$

$$Q_i(x) = + C_{ox} (V_{GS} - V_T - V(x))$$

$$I_D = v(x) Q_i(x) W$$

↑ velocidade dos electrões
↑ largura do canal

$$v(x) = - \mu_n E(x)$$

↑ constante de proporcionalidade entre a velocidade dos portadores e o campo eléctrico

$E = - \frac{dV(x)}{dx}$ ($E = -\nabla\phi$)

$$I_D dx = \mu_n W C_{ox} (V_{GS} - V_T - V(x)) dV(x)$$

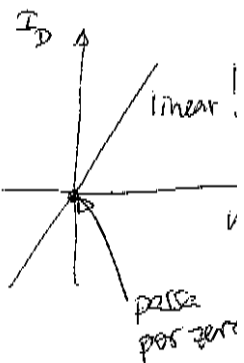
$$\int_0^L I_D dx = \mu_n W C_{ox} \int_0^{V_{DS}} (V_{GS} - V_T - V) dV$$

ZONA LINEAR

$$I_D L = \mu_n W C_{ox} \left[(V_{GS} - V_T) V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right]$$

$$I_D = \underbrace{\mu_n C_{ox}}_{K_n} \frac{W}{L} \left[(V_{GS} - V_T) V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right]$$

K_n parâmetro de transcondutância



Aumentando V_{DS} , quando $V_{GD} < V_T$

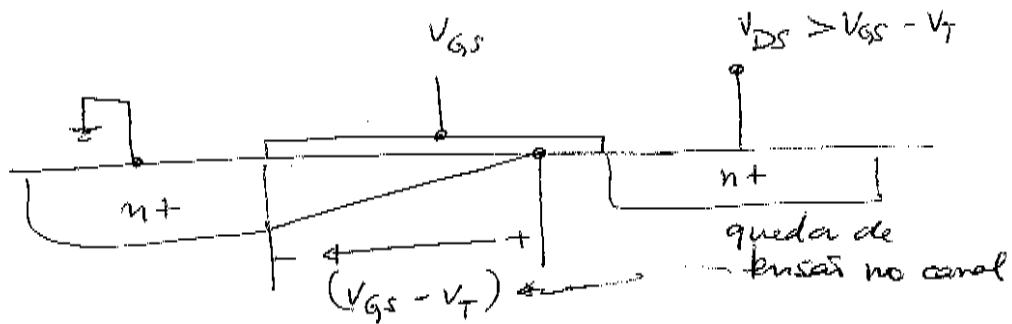
$$V_{GS} - V_D < V_T$$

$$V_D > V_{GS} - V_T$$

$$V_D - V_S > V_{GS} - V_S - V_T$$

$$V_{DS} > V_{GS} - V_T$$

não há canal junto ao dreno — o canal está cortado
"pinch-off"



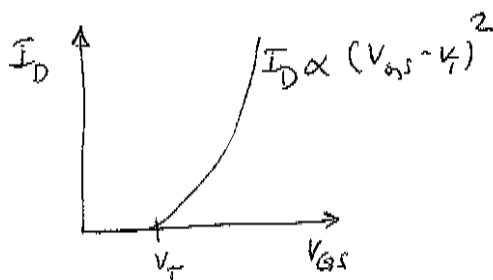
A tensão máxima no canal é $V_{GS} - V_T$. Substituindo V_{DS} (o limite de integração) por $V_{GS} - V_T$ obtém-se

$$\boxed{V_{DS} > V_{GS} - V_T} \quad I_D = \frac{\mu_n C_{ox}}{2} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T)^2 \quad \text{SATURAÇÃO}$$

Notar que o comprimento efetivo do canal diminui quando se aumenta V_{DS} — logo há modulação do comprimento do canal — e a corrente I_D aumenta. Este efeito é modelizado introduzindo o parâmetro LAMBDA no modelo:

$$I_D = \frac{\mu_n C_{ox}}{2} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T)^2 (1 + \lambda V_{DS})$$

$\frac{1}{\lambda} = V_E$ — equivalente ao efeito Early do transistor bipolar



MOSFET - FUNCIONAMENTO EM "WEAK INVERSION"

Quando $V_{GS} < V_T$ a corrente de dreno não é zero; É muito pequena ($< 1 \mu A$) e existe uma relação exponencial com a tensão porta-fonte V_{GS}

$$I_D \approx \frac{W}{L} I_{D0} e^{\frac{qV_{GS}}{nk_B T}}$$