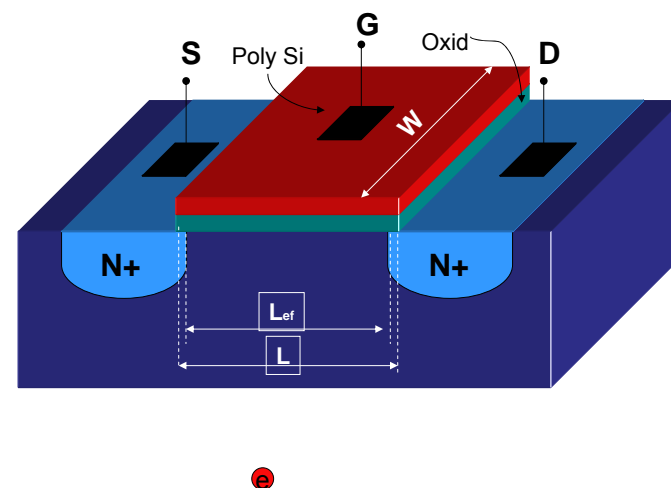
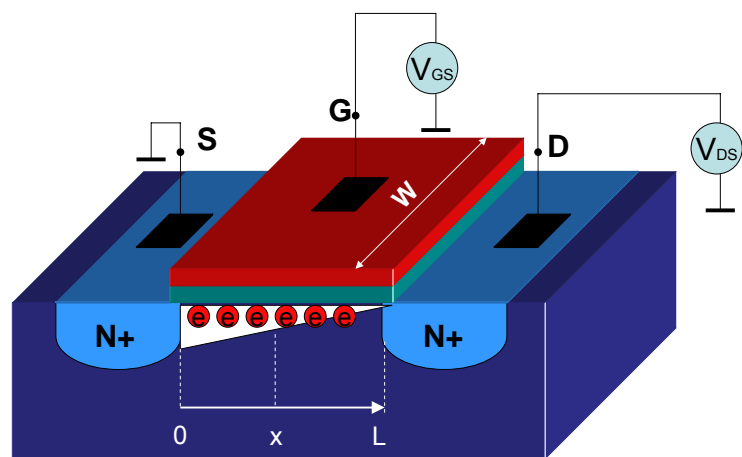
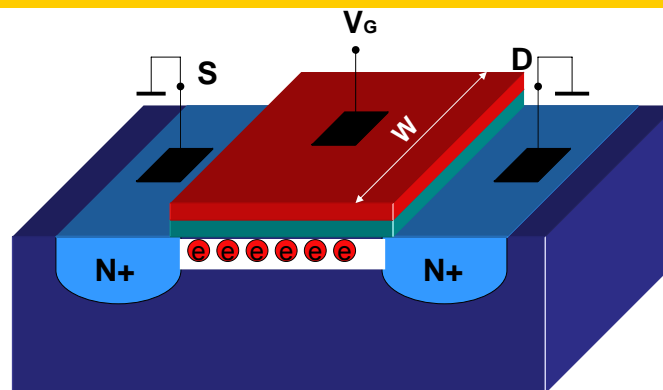
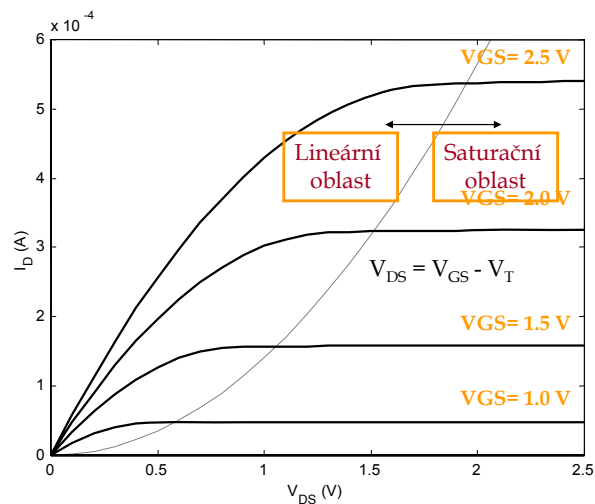


Tranzistor MOSFET

Odvození výstupních charakteristik



Základní vztahy pro transistor NMOS

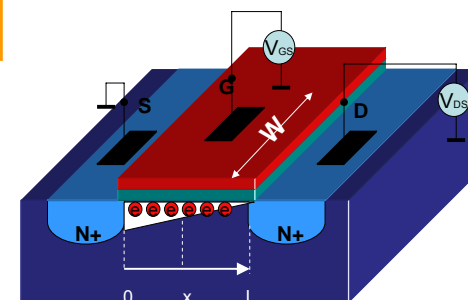
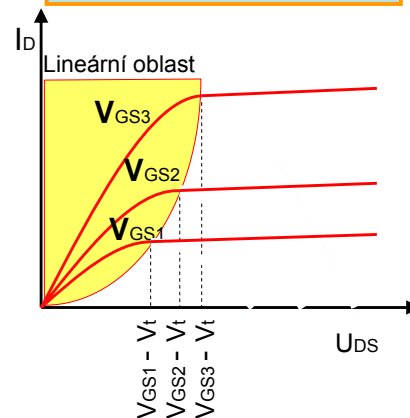


Mikroelektronika ČVUT-FEL Jiří Jakovenko

Lineární oblast: ($V_{GS} > V_t$, $V_{DS} < V_{GS} - V_t$) (Triode region)

➤ Kolektorový proud (Drain Current):

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



Mikroelektronika ČVUT-FEL Jiří Jakovenko

Prahové napětí (Threshold voltage):

$$V_{t0} = \Phi_{MS} + \Phi_F + \frac{Q_{dep}}{C_{ox}}$$

$$V_{t0} = V_{FB} + \gamma \sqrt{2|\Phi_F|} + 2\Phi_F$$

➤ Prahové napětí + body efekt:

$$V_t = V_{t0} + \gamma \left[\sqrt{2\Phi_f + V_{SB}} - \sqrt{2\Phi_f} \right]$$

Mikroelektronika ČVUT-FEL Jiří Jakovenko

Lineární oblast: ($V_{GS} > V_t$, $V_{DS} < V_{GS} - V_t$) (Triode region)

➤ Fermiho potenciál (Fermi level):

$$\Phi_f = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_A}{N_i} \right)$$

➤ Parametr prahového napětí (V_t parameter):

$$\gamma = \frac{\sqrt{2q\epsilon_r\epsilon_0 N_A}}{C_{ox}}$$

➤ Kapacita hradlového oxidu (Oxide capacitance):

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

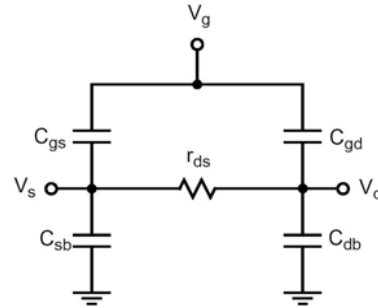
Mikroelektronika ČVUT-FEL Jiří Jakovenko

Lineární oblast:
Pro $V_{DS} \ll 2(V_{GS} - V_t)$ (deep triode region)

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

$$r_{ds} = \frac{1}{\mu_n C_{ox} \left(\frac{W}{L} \right) (V_{GS} - V_t)}$$

Model pro malé signály v lineární oblasti



Mikroelektronika ČVUT-FEL Jiří Jakovenko

Aktivní oblast ($V_{GS} > V_t$, $V_{DS} \geq V_{GS} - V_t$)
(Active region)

➤ Kolektorový proud (Drain Current):

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

➤ Proud I_D s modulací délky kanálu - Drain current (with channel length modulation):

$$I_D \approx \mu_n C_{ox} \left(\frac{W}{L} \right) (V_{GS} - V_t)^2 [1 - \lambda V_{DS}]$$

➤ Transkonduktance (Transconductance):

$$g_m = \mu_n C_{ox} \left(\frac{W}{L} \right) (V_{GS} - V_t) = \sqrt{2\mu_n C_{ox} \left(\frac{W}{L} \right) \cdot I_D} = \frac{2I_D}{V_{GS} - V_t}$$

Mikroelektronika ČVUT-FEL Jiří Jakovenko

Aktivní oblast ($V_{GS} > V_t$, $V_{DS} \geq V_{GS} - V_t$)
(Active region)

➤ Parametr modulační délky kanálu (Channel length modulation parameter):

$$L' = L - \Delta L \quad \frac{\Delta L}{L} = \lambda V_{DS}$$

➤ Výstupní odpor (Output resistivity):

$$r_o \approx \frac{1}{\lambda I_D}$$

➤ Substrátová transkonduktance (Body (bulk) transconductance):

$$g_s = \frac{g_m}{2\sqrt{V_{SB} + 2\Phi_f}} \quad \frac{g_s}{g_m} = \chi \quad (\text{typicky } 0.1 \div 0.3)$$

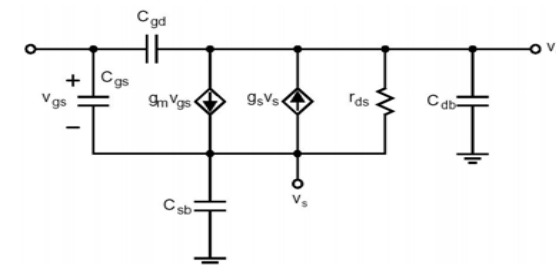
Mikroelektronika ČVUT-FEL Jiří Jakovenko

Aktivní oblast ($V_{GS} > V_t$, $V_{DS} \geq V_{GS} - V_t$)
(Active region)

➤ Mezní frekvence (Transition frequency):

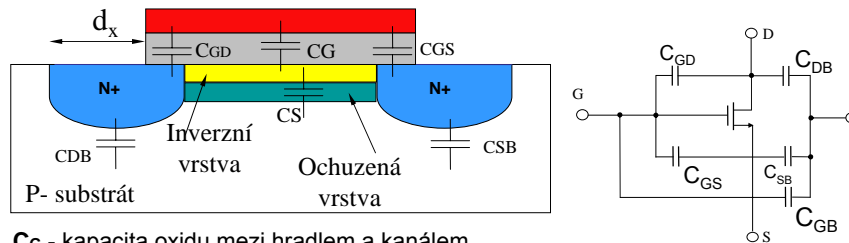
$$f_T = \frac{g_m}{2\pi(C_{GS} + C_{GD} + C_{GS})}$$

➤ Model pro malé signály v aktivní oblasti (Small-signal model in active region)



Mikroelektronika ČVUT-FEL Jiří Jakovenko

Kapacity MOS tranzistoru (MOS Device Capacitances)



C_G - kapacita oxidu mezi hradlem a kanálem

$$C_G = WLC_{ox}$$

C_S - kapacita vyprázdněné vrty mezi kanálem a substrátem

$$C_S = WL \sqrt{q \epsilon_r \epsilon_0 N_A} / (4 \Phi_f)$$

$C_{GS,GD}$ - kapacita přesahu hradla do oblasti kolektoru a emitoru

$C_{DB,SB}$ - kapacita prechodu mezi oblastí kolektoru (emitoru) a substrátem. Většinou se rozděluje na kapacitu spodni strany C_j a boční kapacitu C_{jsw} (velikost se udává na jednotku plochy, délky).

$$C_j = \frac{C_{j0}}{[1 + V_R / \Phi_B]^m}$$

$$C_{DB} = C_{SB} = Wd_x C_j + 2(W + d_x) C_{jsw}$$

Kapacity tranzistoru MOS (MOS Device Capacitances)

MOS vypnutý

$$C_{GD} = C_{GS} = C_{ov} W$$

$$C_{GB} = \frac{WLC_{ox} C_2}{WLC_{ox} + C_2}$$

MOS v lineární oblasti a $V_{DS} \ll 2(V_{GS} - V_t)$

$$C_{GD} = C_{GS} = WLC_{ox} / 2 + WC_{ov}$$

Důležité konstanty

$q = 1.602e^{-19} C$	$k = 1.38e^{-23} JK^{-1}$
$n_i = 1.1e^{16} \text{ nosičů/m}^3$ at $T = 300^\circ K$	$\epsilon_0 = 8.854e^{-12} F/m$
Oxid $\epsilon_r = 3.9$	Křemík $\epsilon_r = 11.8$

MOS v saturaci

$$C_{GS} = \frac{2}{3} WL_{eff} C_{ox} + WC_{ov}$$

Tabulka režimů tranzistoru MOS

	Podprahová oblast $U_{GS} < U_t$	Oblast saturace rychlosti $U_{DS} / (LE_c) \gg 1$
I_D	$I_{D0} \frac{W}{L} \exp\left(\frac{V_{GS}}{nkt/q}\right) \left[1 - \exp\left(\frac{V_{DS}}{nkt/q}\right)\right]$	$WC_{ox} v_{sat} (V_{GS} - V_t)(1 + \lambda U_{DS})$
g_m	$\frac{I_D}{nkt/q}$	$WC_{ox} v_{sat}$
g_{ds}		λI_D
	Lineární (nesaturační) oblast $U_{GS} > U_t, U_{DS} < U_{DSsat}$	Saturační oblast $U_{GS} > U_t, U_{DS} > U_{DSsat}$
I_D	$\beta \left[(V_{GS} - V_t) V_{DS} - \frac{1}{2} (1 + \delta) V_{DS}^2 \right] (1 + \lambda U_{DS})$	$\frac{\beta}{2(1 + \delta)} (V_{GS} - V_t)^2 (1 + \lambda U_{DS})$
g_m	βU_{DS}	$\frac{\beta (U_{GS} - U_t)}{1 + \delta}$
g_{ds}		$\frac{\sqrt{2 \beta I_D}}{\sqrt{1 + \delta}}$
		λI_D

CMOS Invertor - layout

