



Elektronika a Mikroelektronika A4B34EM

5. přednáška

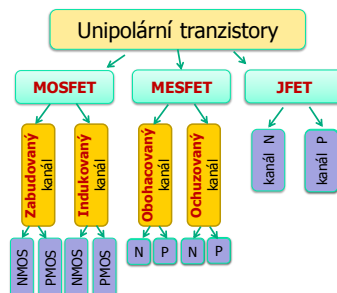
- Unipolární tranzistory
- JFET
- MESFET
- MOSFET



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



Tranzistory – základní rozdělení



MOSFET - metal oxide field effect transistor semiconductor

MESFET - Metal semiconductor field effect transistor

JFET - junction field effect transistor



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



Unipolární tranzistory Obecné vlastnosti

- Napětí na řídicí elektrodě (gate) ovládá proud mezi elektrodami drain (D) a source (S)
- U všech typů je mezi elektrodami D-S tenký vodivý kanál typu n nebo p , jehož vodivost se ovládá elektrickým napětím přiloženým na řídicí elektrodu G



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



FET (Field Effect Transistor)

Výhody unipolárních tranzistorů:

1. Funkce závisí pouze na jednom typu nosičů (*elektrony nebo díry*)
2. Součástka řízená napětím (napětí na řídicím hradle ovládá proud mezi D-S)
3. Velmi vysoká vstupní impedance ($\approx 10^9$ - $10^{14} \Omega$)
4. Source a Drain je zaměnitelný
5. Možnost funkce v tzv. Low Voltage Low Current módu
6. Menší šum ve srovnání s BJT
7. Žádná akumulace minoritních nosičů (Rychlé vypínání)
8. Velice malé rozměry, výhodné v integrovaných obvodech



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



Tranzistor JFET

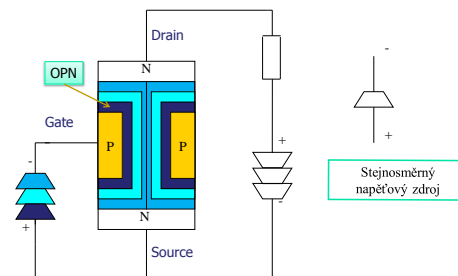
- U tranzistorů JFET je řídicí elektroda z polovodiče opačné vodivosti než kanál
- Od kanálu není elektricky oddělena a tvoří P-N přechod.
- Tento přechod je polarizován závěrně.
- Napětím na hradle se moduluje OPN (oblast prostorového náboje), čímž se řídí tloušťka kanálu a tudíž i jeho vodivost



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



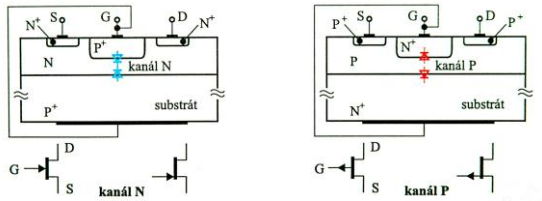
Základní princip modulace kanálu JFETu





Reálná struktura JFETu

■ Průřez tranzistoru JFET

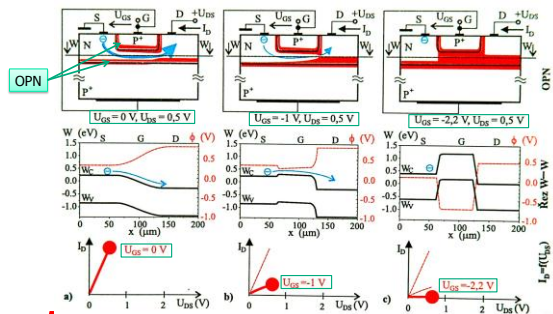


Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



Princip činnosti

■ Při malém napětí U_{DS}

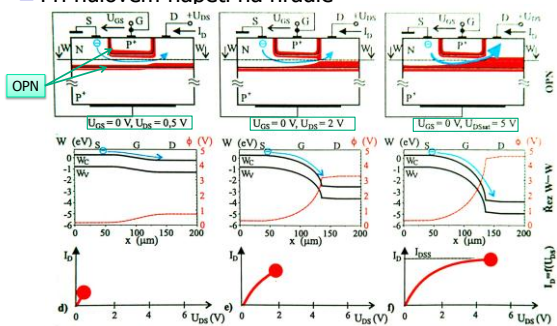


Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



Princip činnosti

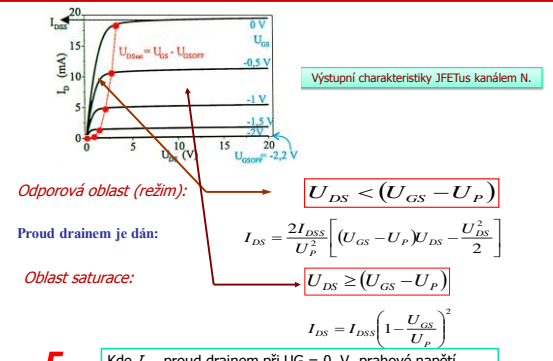
■ Při nulovém napětí na hradle



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



Výstupní charakteristiky a režimy JFET

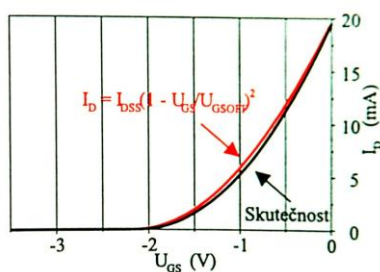


Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



Převodní charakteristika

■ JFET s kanálem N pro $U_{DS} = 10V$

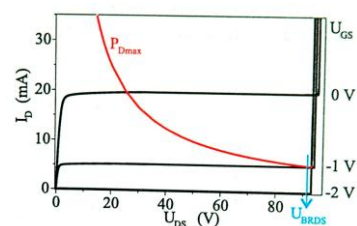


Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



Mezní parametry JFETu

- Průrazné napětí U_{DS}
- maximální ztrátový výkon P_{Dmax}
- Maximální proud I_G

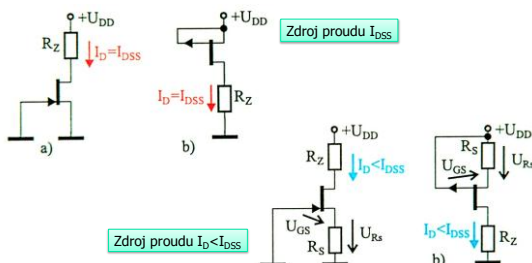


Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



Základní zapojení JFET

■ Zdroj proudu

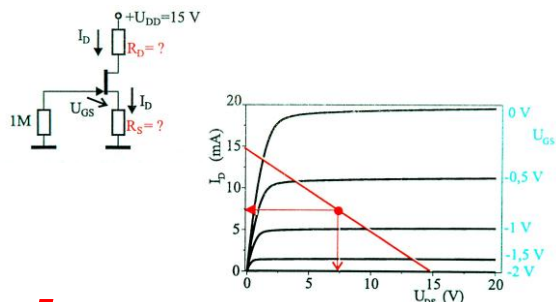


Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



Základní zapojení JFET

■ Nastavení pracovního bodu ve třídě A

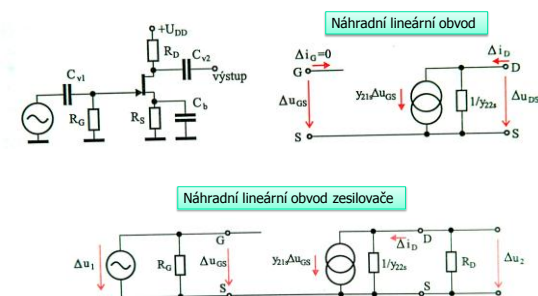


Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



JFET jako zesilovač malého signálu

■ Zesilovač se společným sourcem:

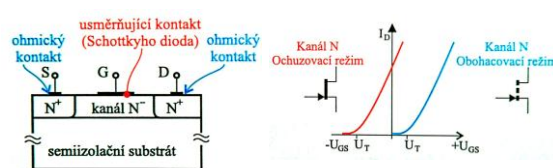


Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



Tranzistor MESFET

- PN přechod G-S tvoří Schottkyho dioda
- Typicky se vyrábějí na GaAs
- Využití v vf zesilovačích, přepínačích, atd.



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



Tranzistor MOSFET

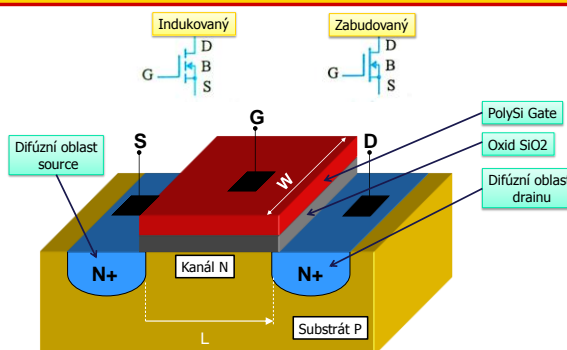
- Tranzistor řízený elektrickým polem
- Struktura Kov (Metal **M**) – oxid (Oxide **O**) – polovodič (Semiconductor **S**)
- Kov je dnes většinou nahrazen PolySi, oxid tvoří SiO₂
- Velký vstupní odpor řídící elektrody, až 10¹⁴ ·
- Tranzistor může být velmi malý ~ 32 nm
- Obrovská hustota integrace ~ 1 000 000 000 na čip
- Malý odběr ve statickém režimu
- Existuje-li vodivý kanál při U_GS = 0, jedná se o MOSFET se zbudovaným kanálem



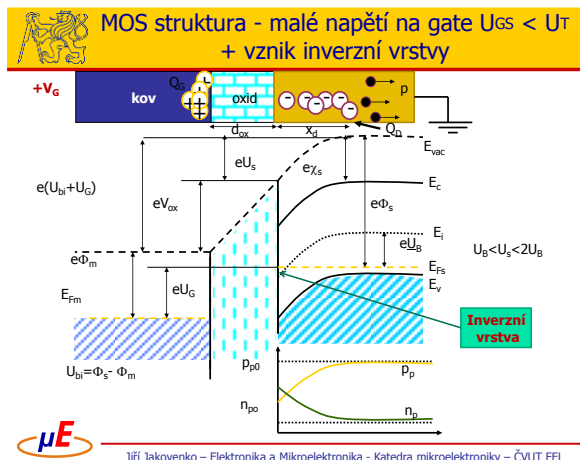
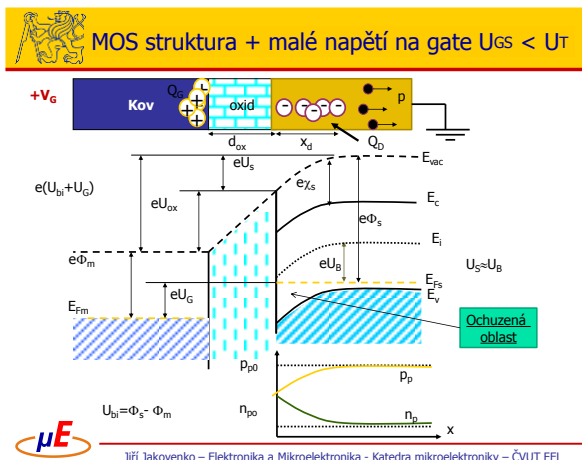
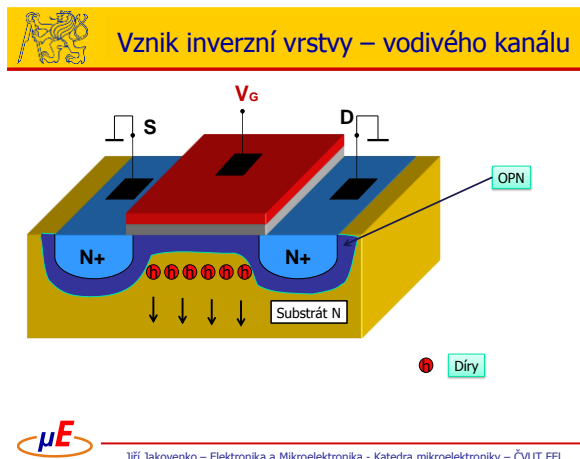
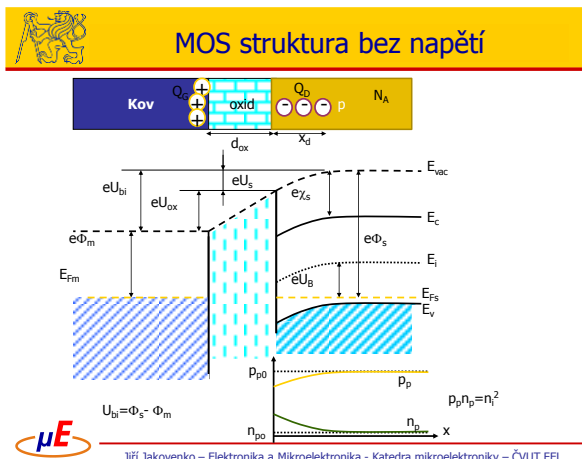
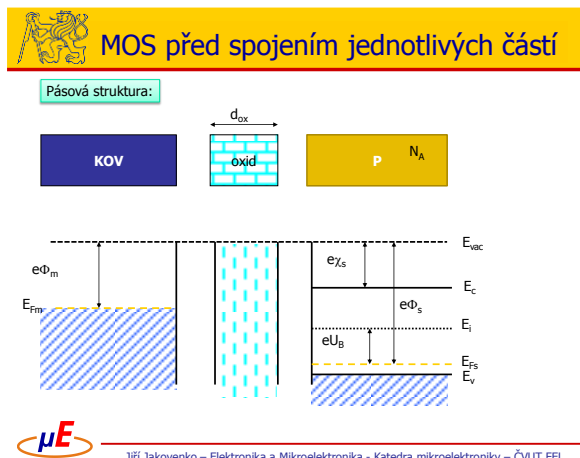
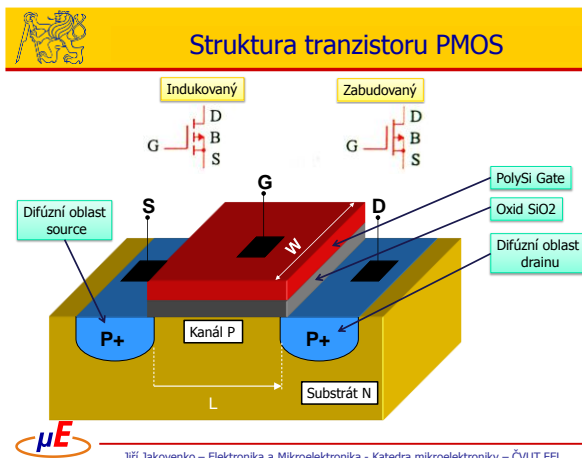
Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL

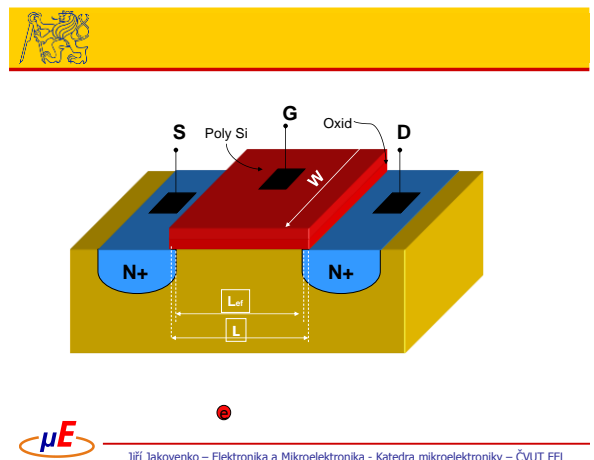
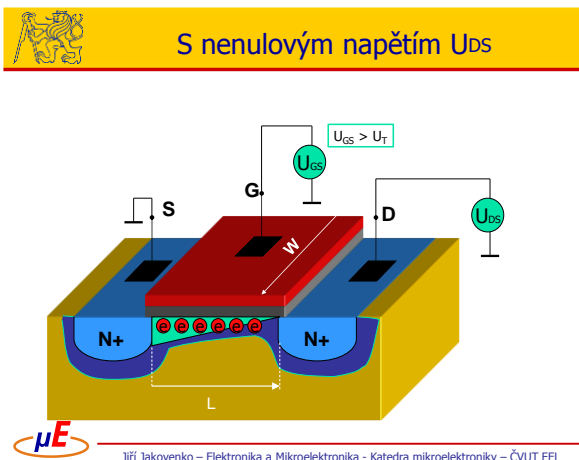
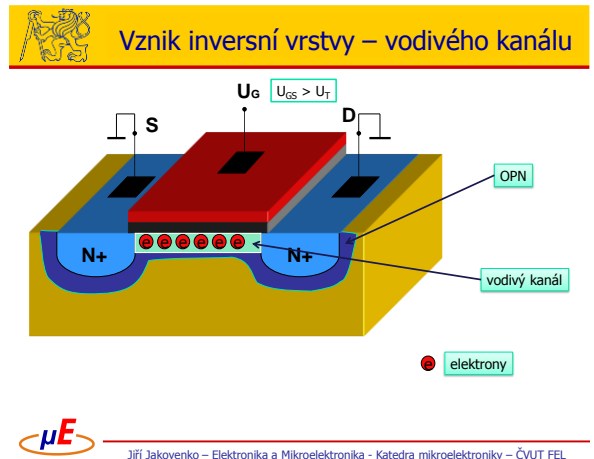
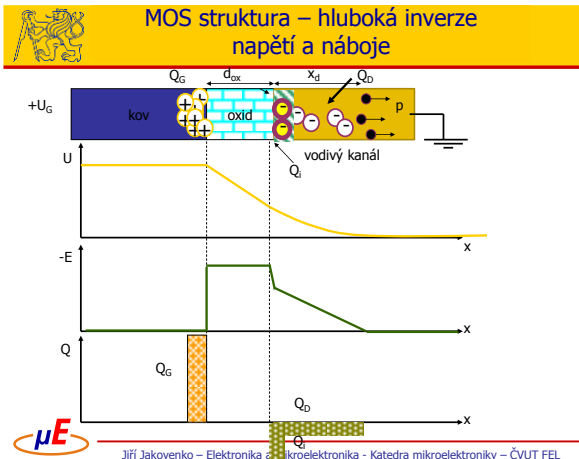
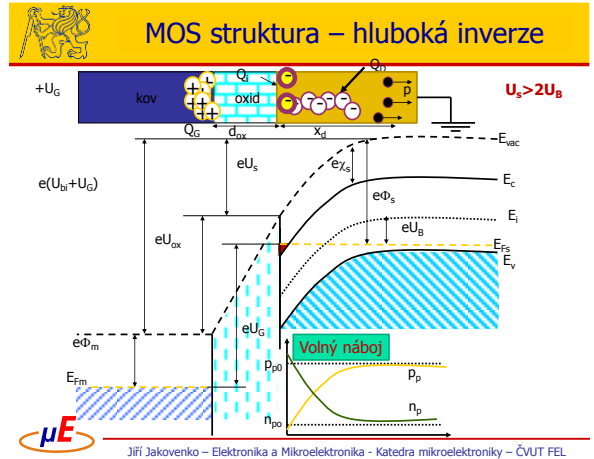
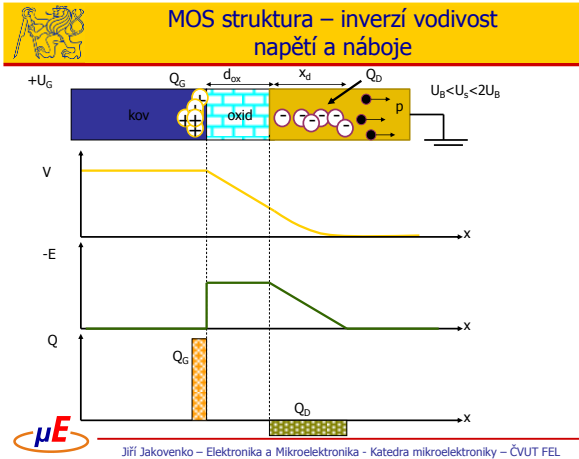


Struktura tranzistoru NMOS



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



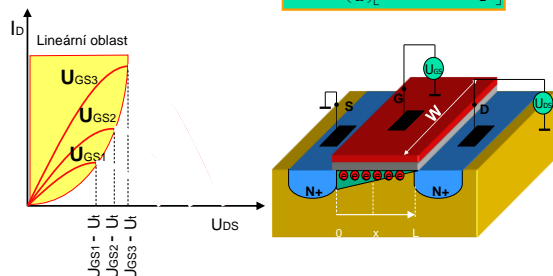




Lineární oblast: ($U_{GS} > U_t$, $U_{DS} < U_{GS} - U_t$) (Triode region)

- Kolektorový proud (Drain Current):

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



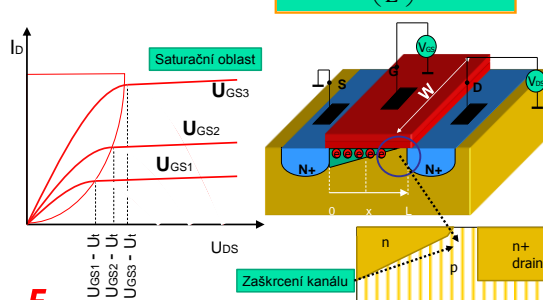
Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



Saturační oblast: ($U_{GS} > U_t$, $U_{DS} > U_{GS} - U_t$) (Active region)

- Kolektorový proud (Drain Current):

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



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



Saturační oblast: ($U_{GS} > U_t$, $U_{DS} > U_{GS} - U_t$)

- Kolektorový proud (Drain Current):

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

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

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

- Transkonduktance (Transconductance):

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



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



Saturační oblast: ($U_{GS} > U_t$, $U_{DS} > U_{GS} - U_t$)

- Parametr modulace 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):

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



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL

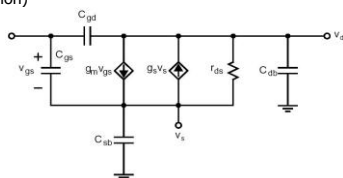


Saturační oblast: ($U_{GS} > U_t$, $U_{DS} > U_{GS} - U_t$)

- Mezní frekvence (Transition frequency):

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

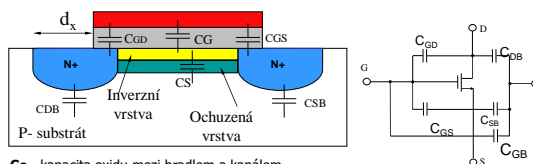
- Model pro malé signály v aktivní oblasti (Small-signal model in active region)



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



Kapacity MOS tranzistoru (MOS Device Capacitances)



C_G - kapacita oxidu mezi hradlem a kanálem

$$C_G = WLC_{ox}$$

C_S - kapacita vyprázdněné vrstvy mezi kanálem a substrátem

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

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

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

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

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



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



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 $V_{DS} \ll 2(V_{GS} - V_{T0})$

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

Důležité konstanty

MOS v saturaci

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

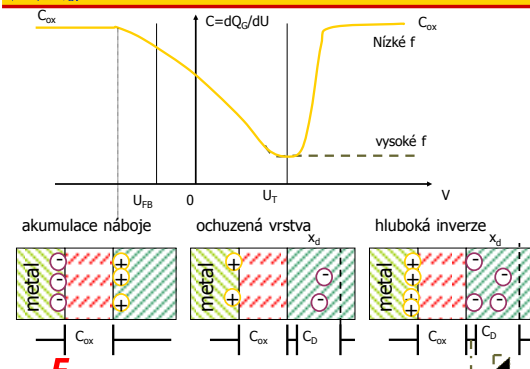
$q = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$	$k = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$
$n_i = 1.1 \cdot 10^{16} \text{ nosičů/m}^3 \text{ at } T=300^\circ \text{ K}$	$\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$
Oxid $\epsilon_r = 3.9$	Křemík $\epsilon_r = 11.8$



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



C-V charakteristika MOSFETu

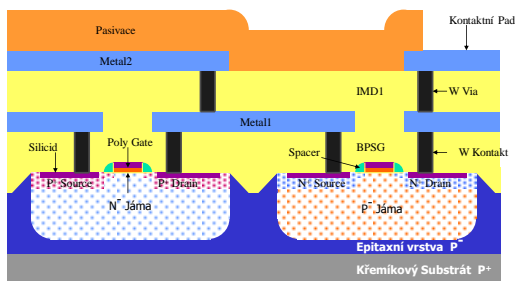


Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



Struktura CMOS

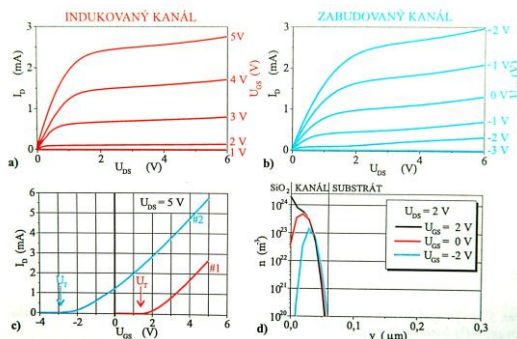
Complementary MOS



Jiří Jakovenko – Struktury Integrovaných Systémů - A2M34SIS



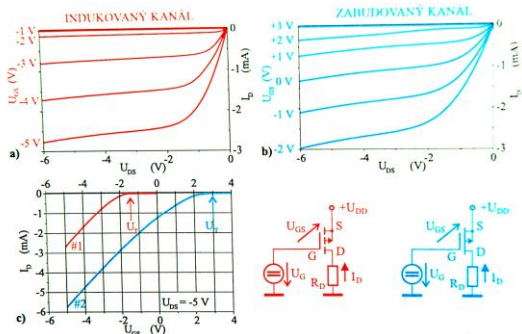
Indukovaný a zabudovaný kanál NMOS



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



Indukovaný a zabudovaný kanál PMOS

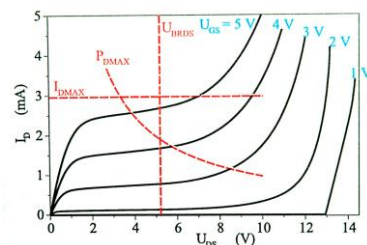


Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



Mezní parametry MOSFETu

- Průrazné napětí U_{DS}
- maximální ztrátový výkon P_{Dmax}
- Maximální proud I_D



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL