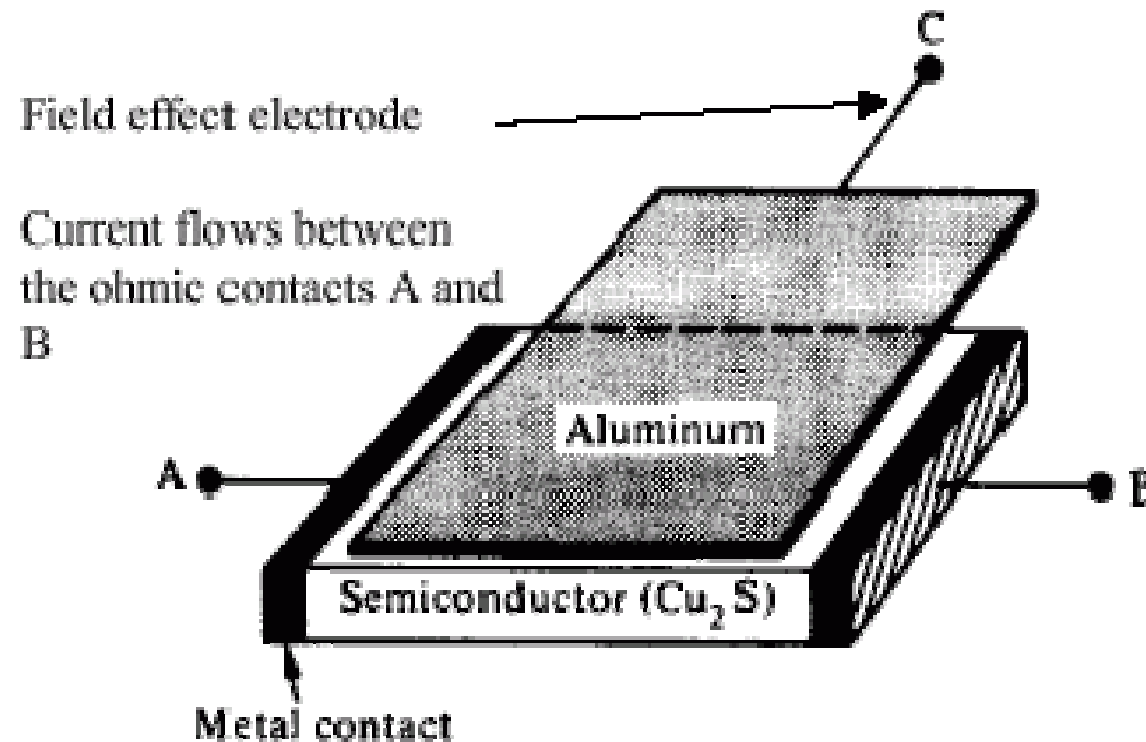


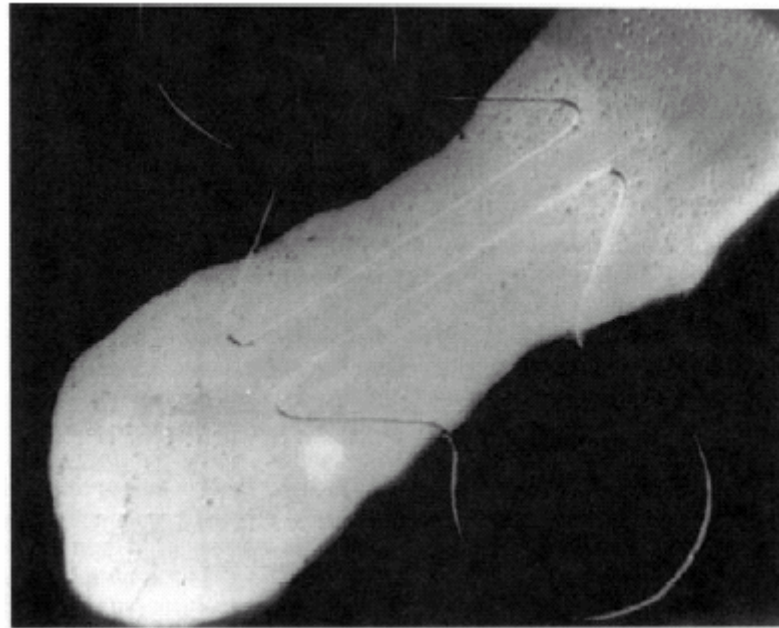
MOSFET Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor

Julius Edgar Lilienfeld, U.S. Patent 1,745,175 (1930)

Lilienfeld transistor (1930s)

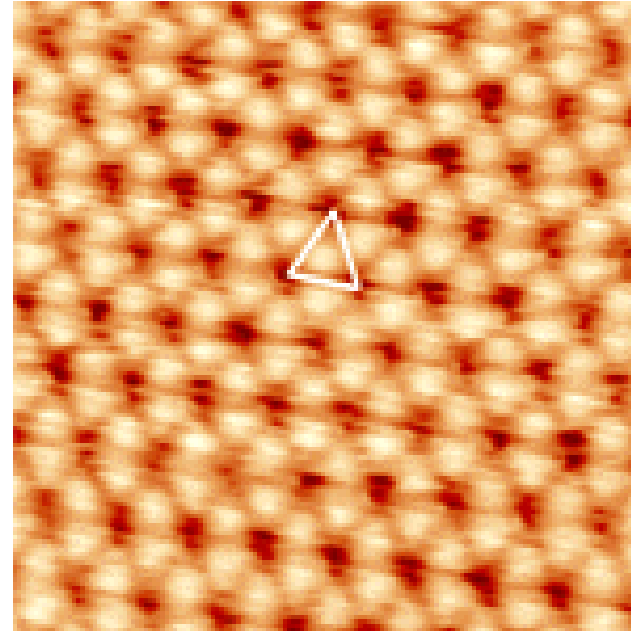
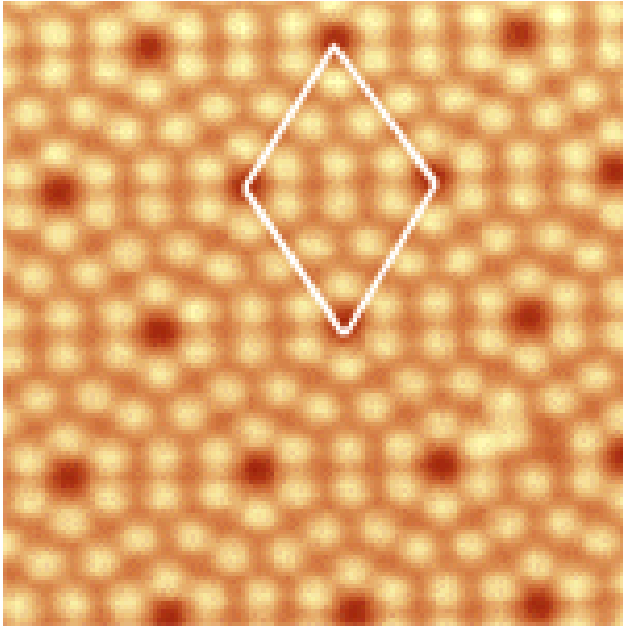


MOSFET Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor



1960 – ovládnutí povrchových stavů:
D. Kahng, J. M. Atalla (Bell Labs.)

Si <111> **Povrchové stavy** *Surface States*



**Atomy Si na povrchu se uspořádají oproti objemu jinak,
aby měly minimální povrchovou energii**

**\Rightarrow jiná pásová struktura,
 \Rightarrow jiná krystalová struktura.**

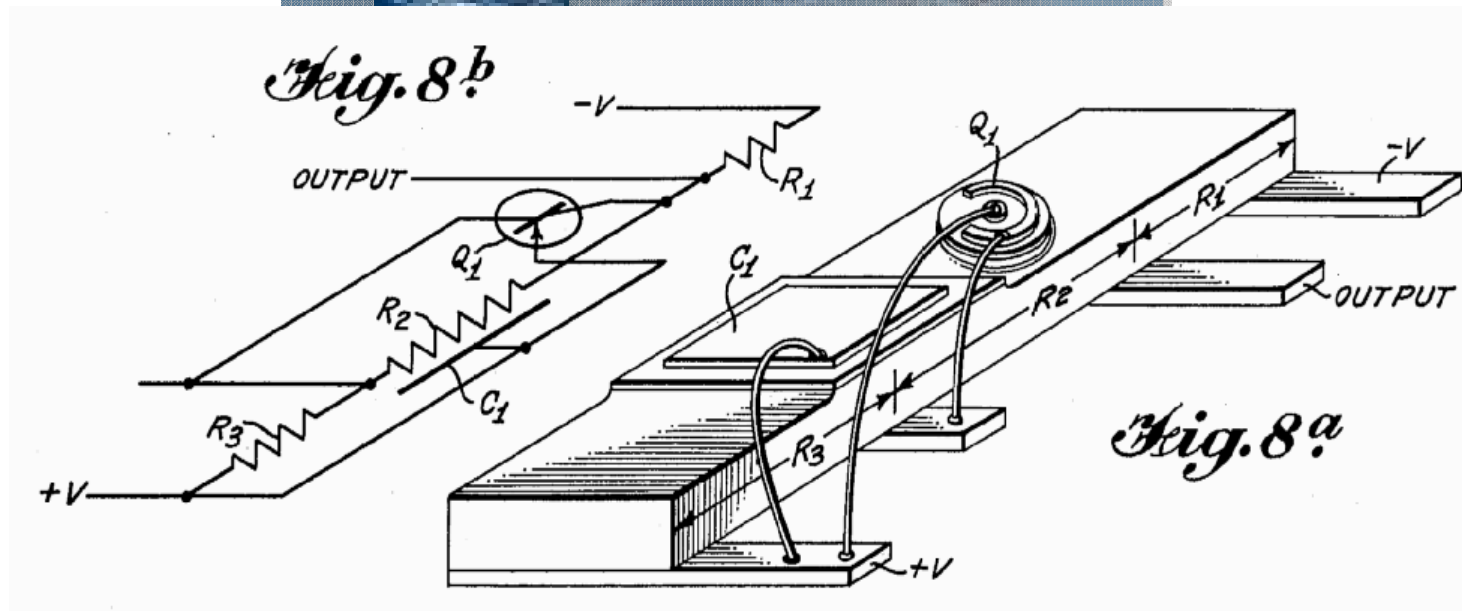
Tranzistor – integrovaný obvod *bipolární tranzistor*



Jack Kilby

Si

1958: Texas Instruments



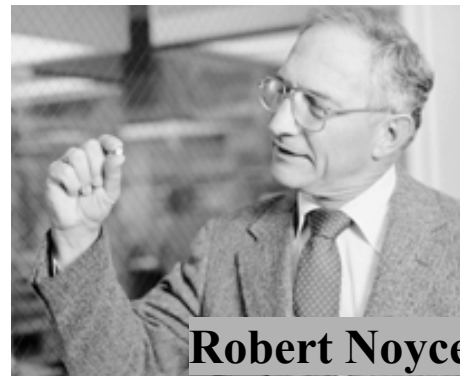
Tranzistor – integrovaný obvod *bipolární tranzistor*



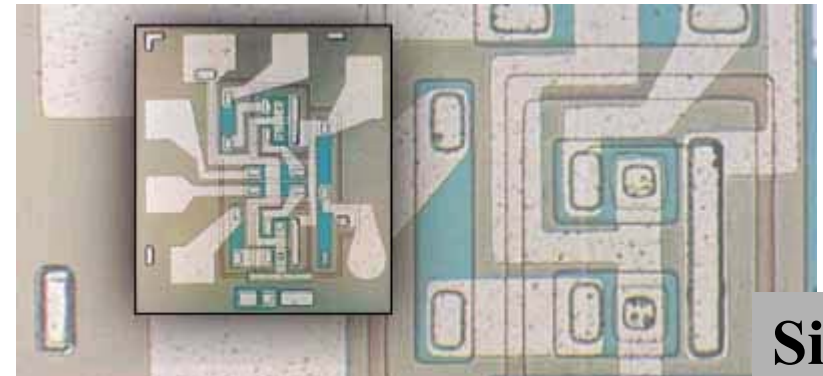
Jack Kilby



1958: planární tranzistor

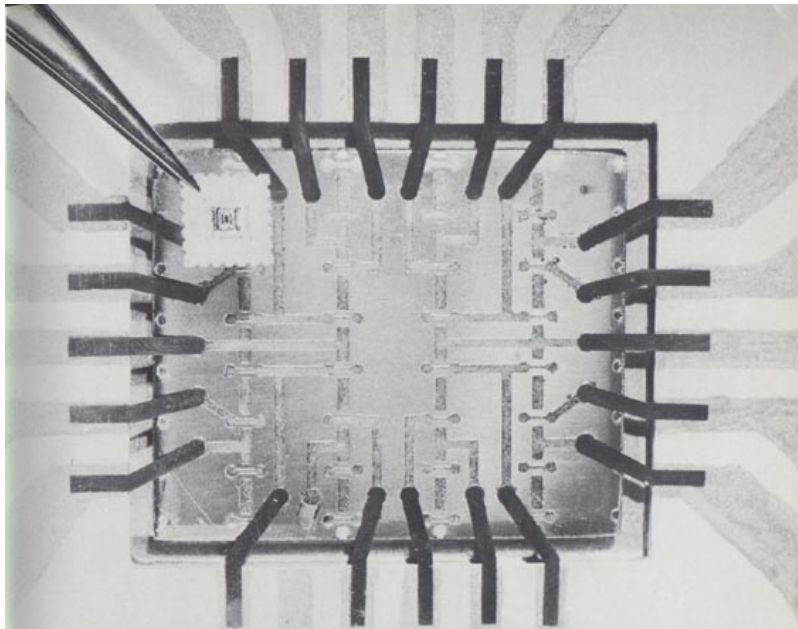


1959: Fairchild - první planární integrovaný obvod (Si BJT)



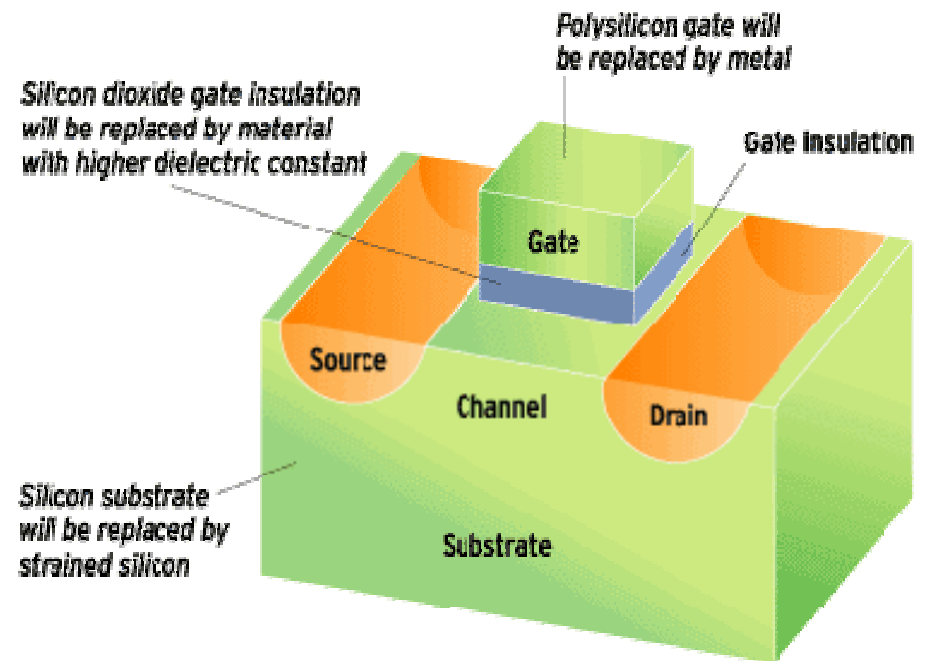
MOSFET

1962: RCA, Fairchild - první MOSFET



RCA: 16-tranzistorový MOSFET I0

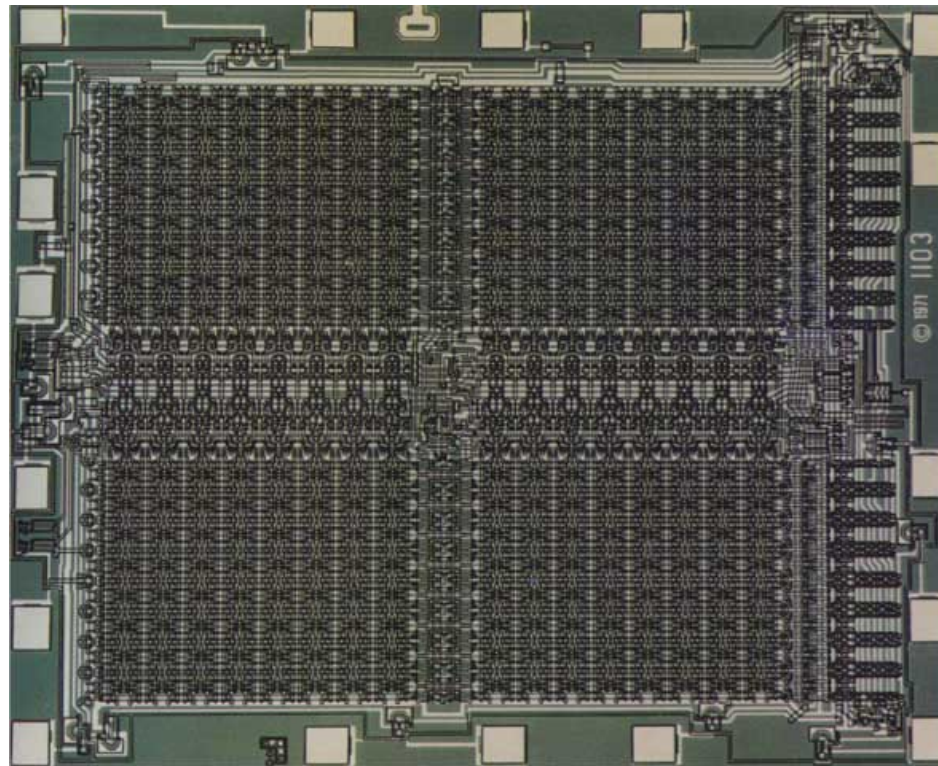
Steve Hofstein, Fred Heiman (H^+ ,... Na^+)



1964: CMOS - RCA

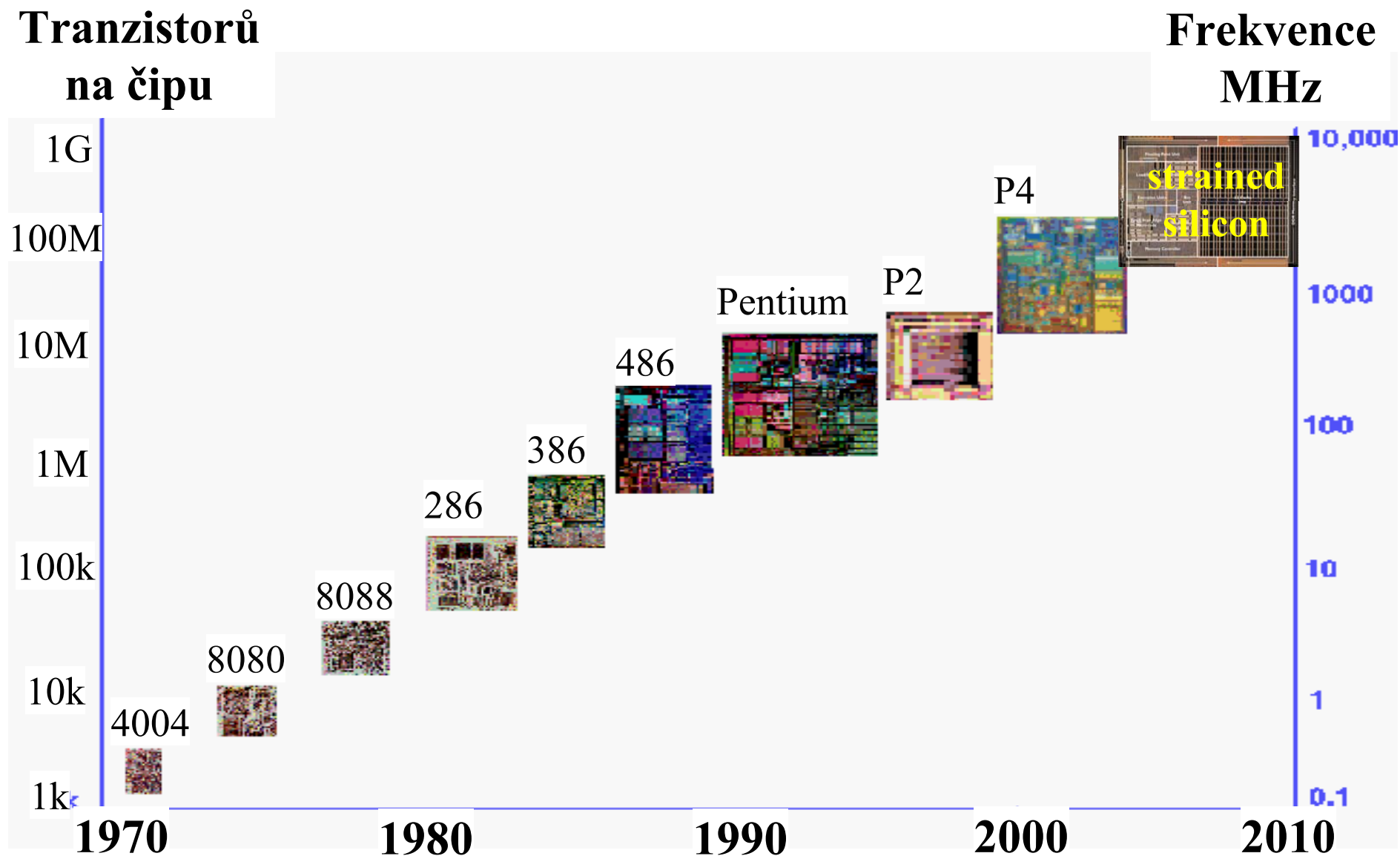
Tranzistor – *bipolární nebo unipolární?*

1970: Intel - výroba 1kbit Dynamic RAM

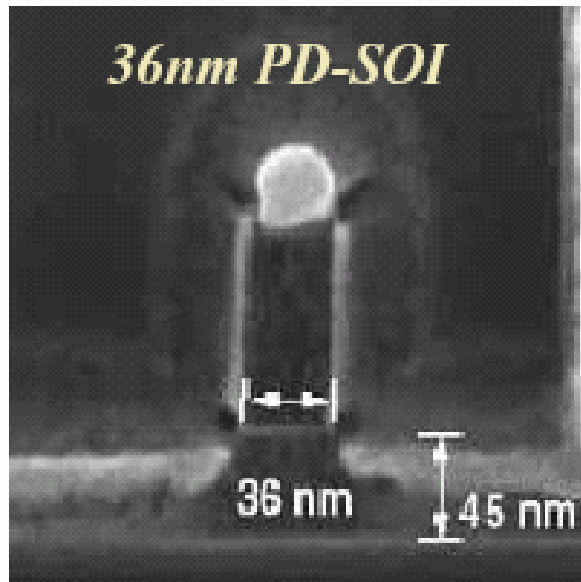


Intel 1103 1K-bit DRAM

Tranzistory unipolární

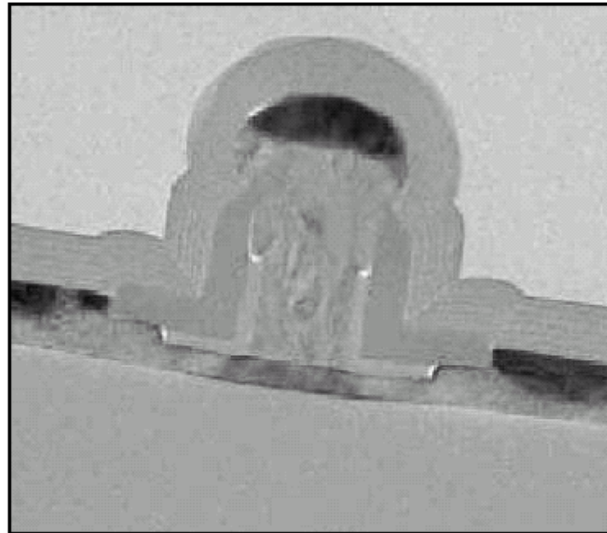


IBM

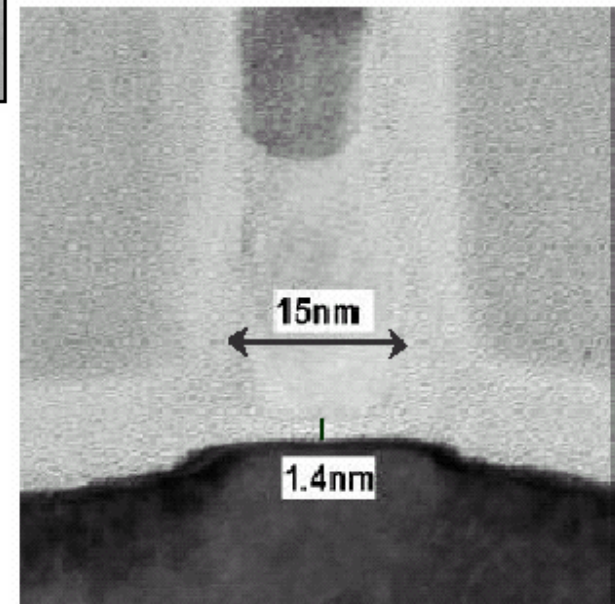


MOSFET

INTEL



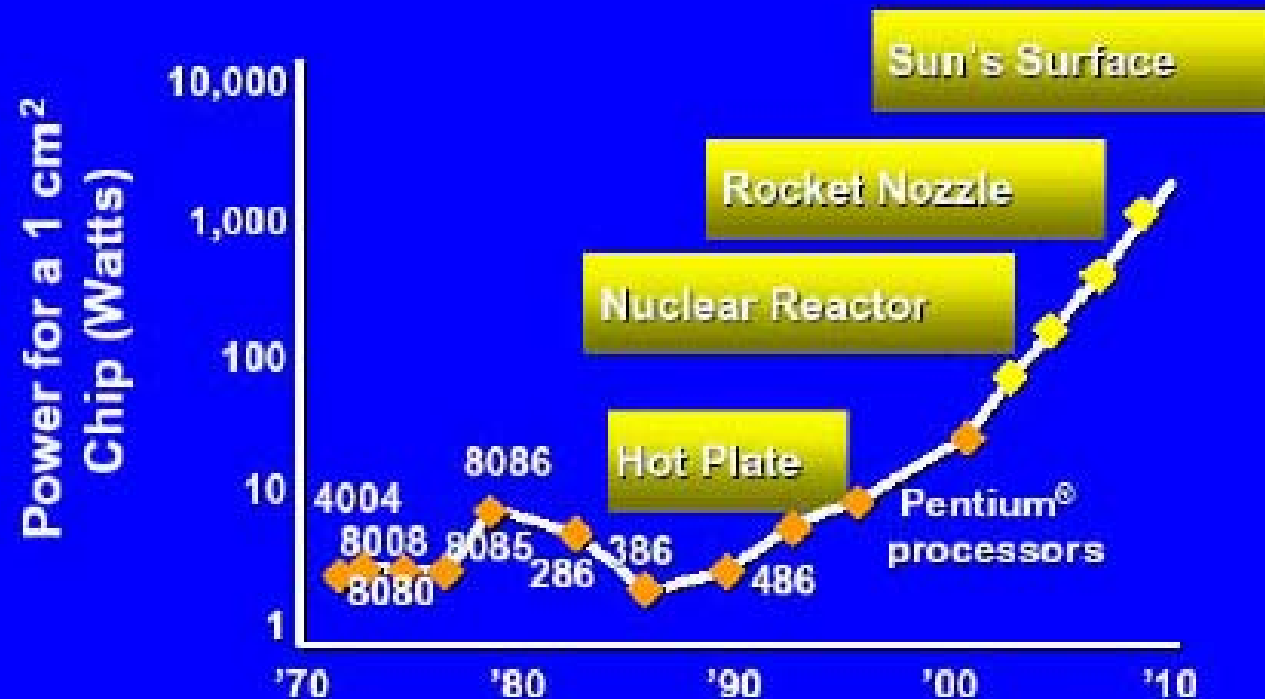
AMD



Budoucnost ...

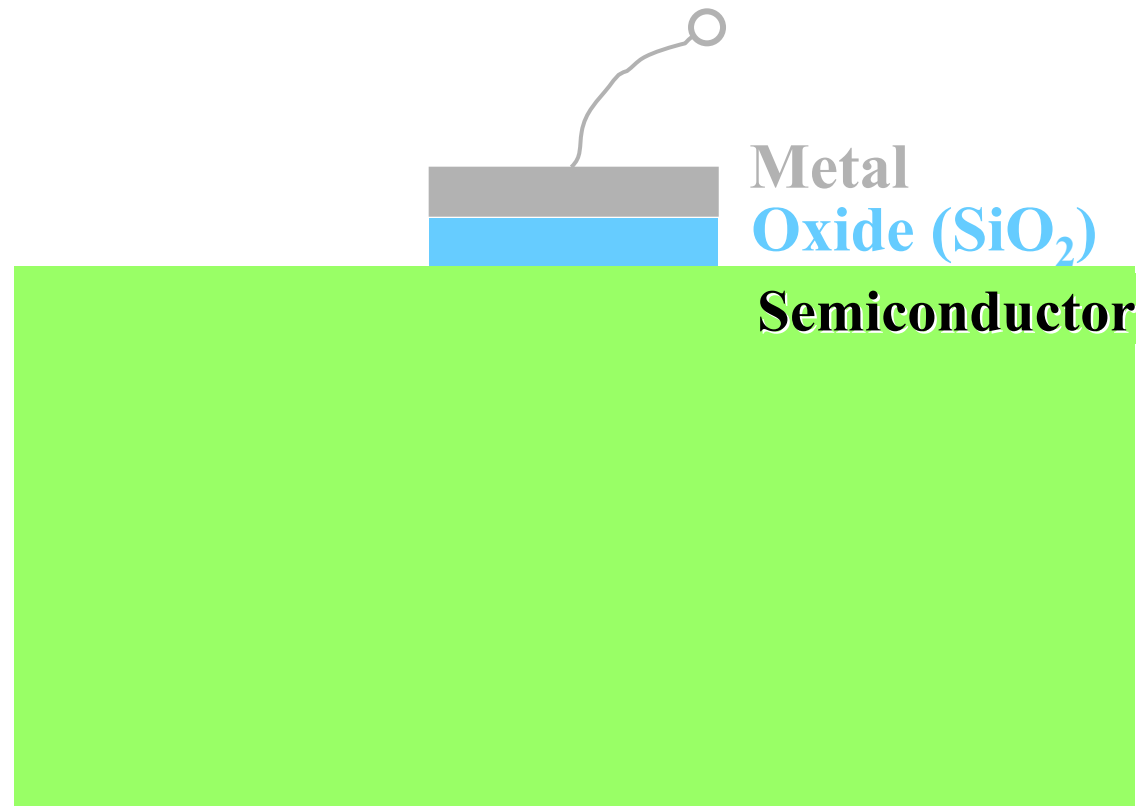
MOSFET Budoucnost?

Power Extrapolation

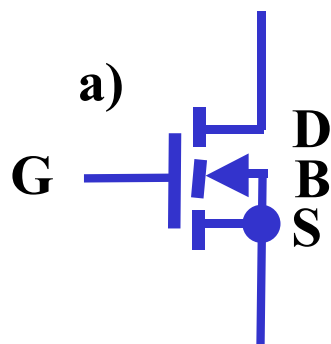
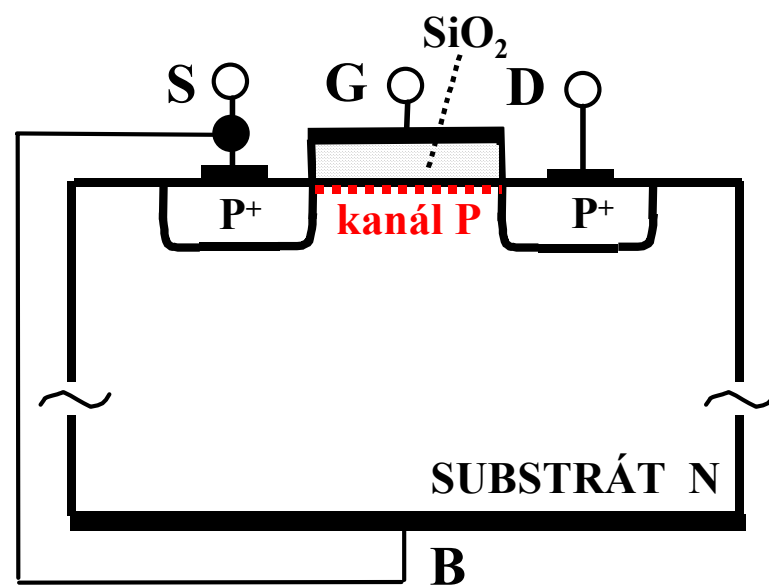
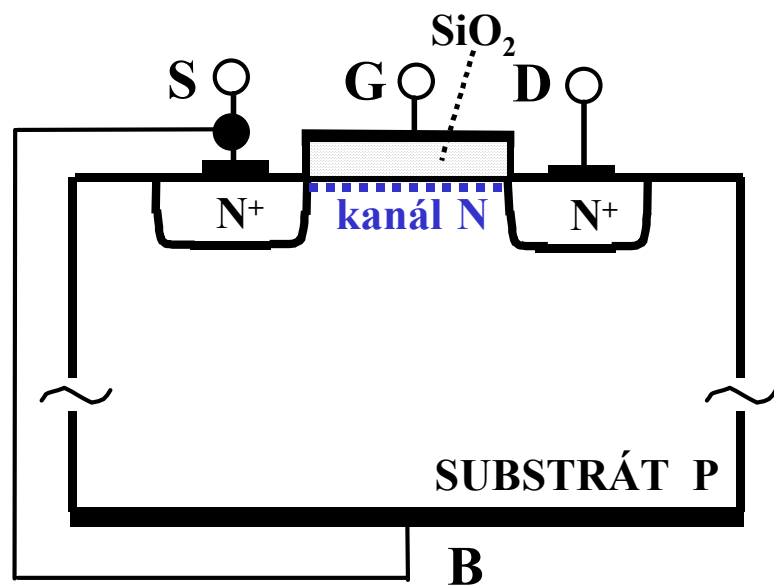


MOSFET

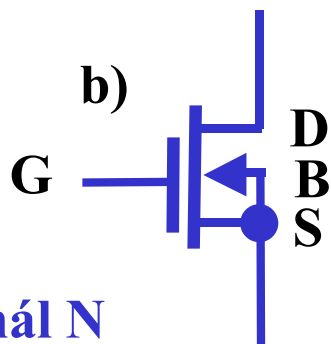
Metal Oxide Semiconductor FET



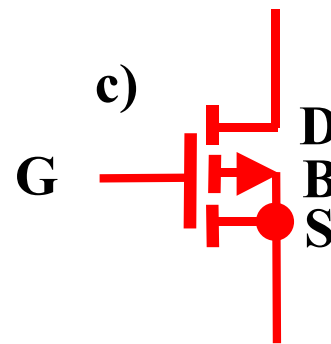
MOSFET



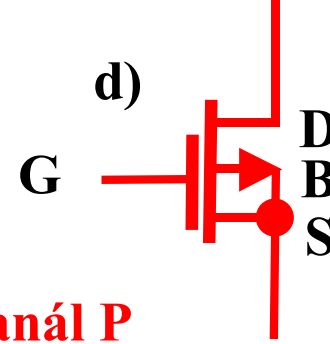
indukovaný



zabudovaný



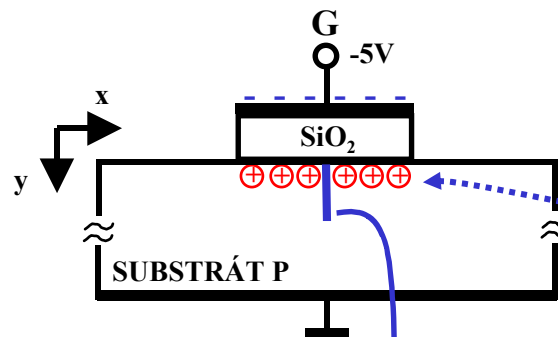
indukovaný



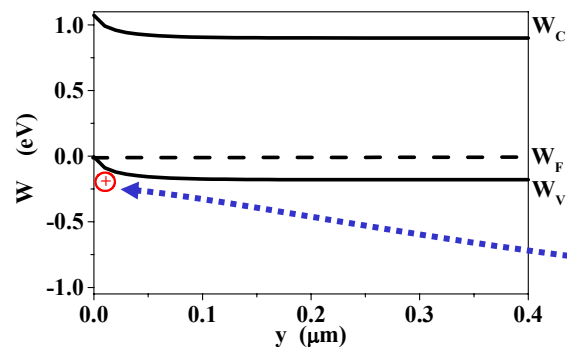
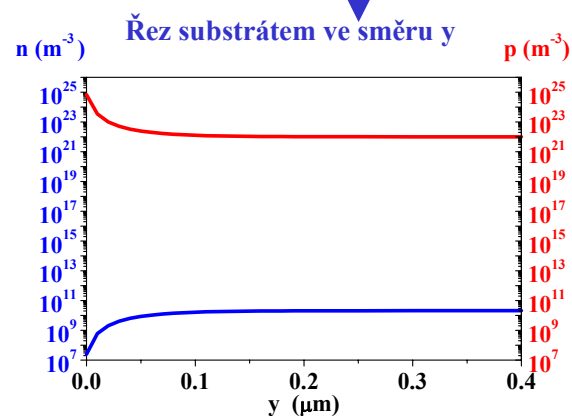
zabudovaný

MOS kapacitor – princip činnosti

a) AKUMULACE DĚR



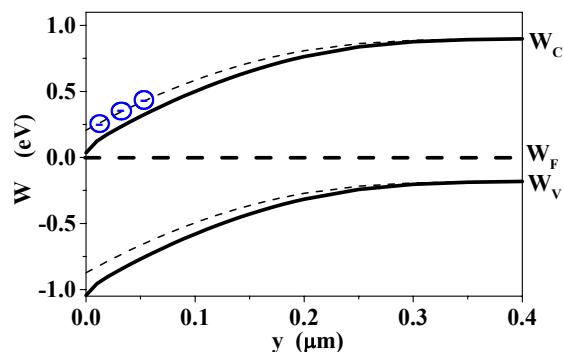
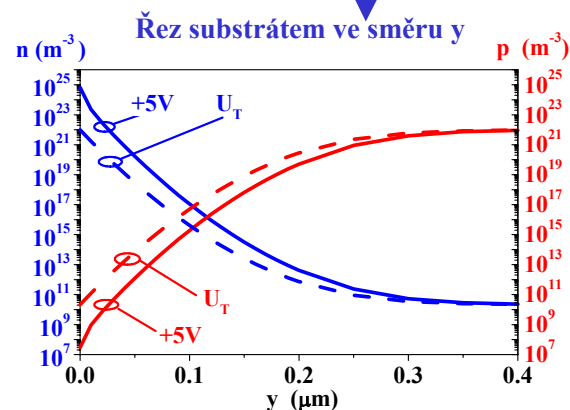
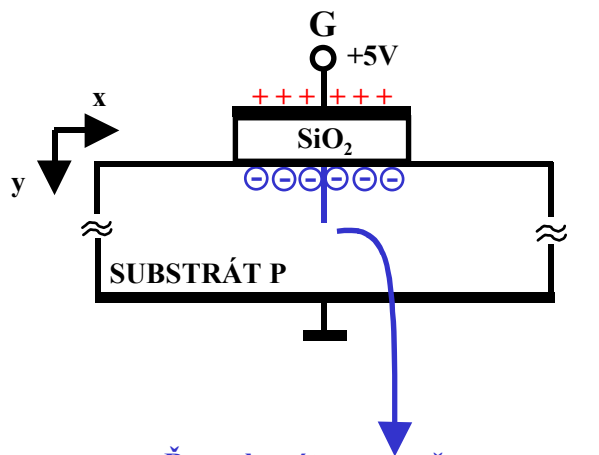
Náboj se hromadí u kladné elektrody, kterou je polovodič \Rightarrow akumulace děr.



El. pole ve směru y způsobí ohyb pásů nahoru \Rightarrow akumulace děr na povrchu.

MOS kapacitor – princip činnosti

b) VZNIK INVERZNÍ VRSTVY



$$U_{G1} < U_{Th}$$

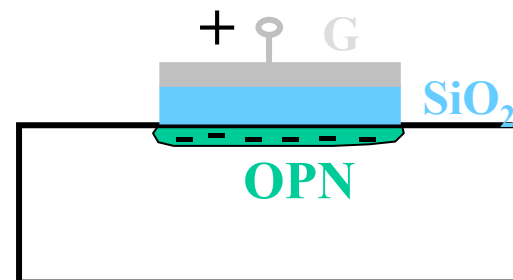
Majoritní díry odpuzeny od povrchu.



Na jejich místě zbydou záporné nepohyblivé ionizované akceptory
 \Rightarrow vznikne OPN.



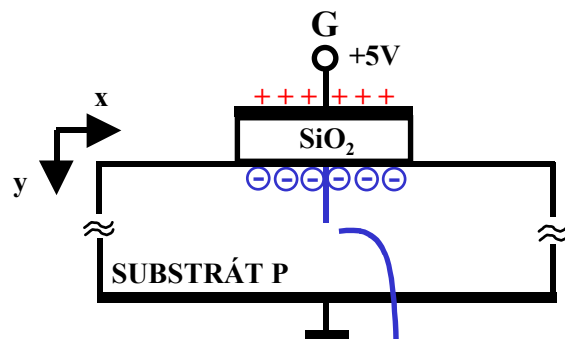
Kladný náboj na hradle je kompenzován záporným nábojem těchto akceptorů.



Elektrické pole působí ohyb pásů dolů.

MOS kapacitor – princip činnosti

b) VZNIK INVERZNÍ VRSTVY

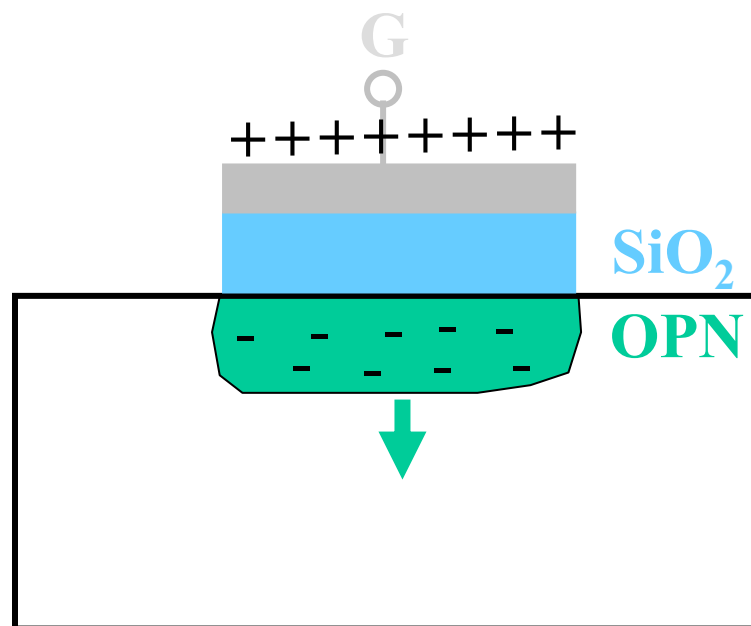
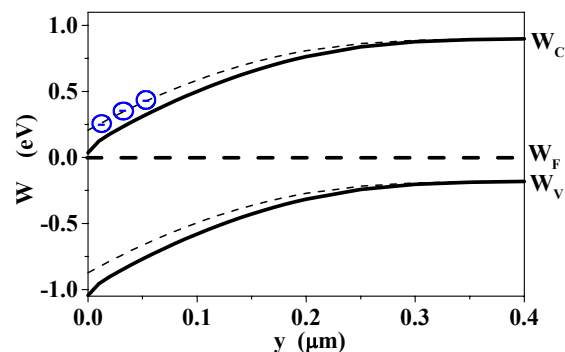
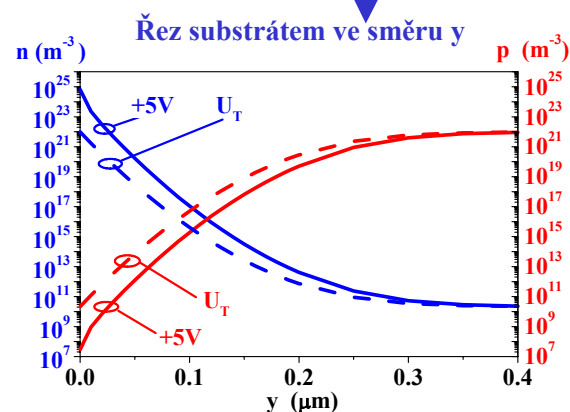


$$U_{G1} < U_{G2} < U_{Th} \quad \text{zvýšíme } U_G \text{ na } U_{G2}$$

Kladný náboj na hradle vzroste.

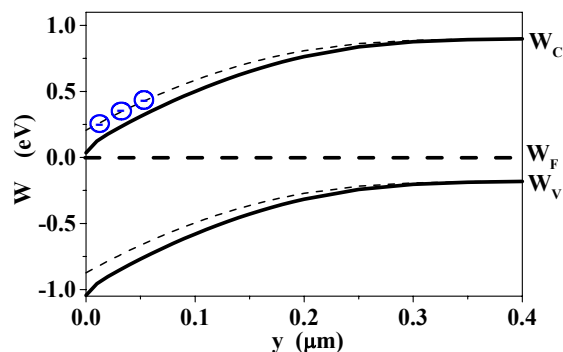
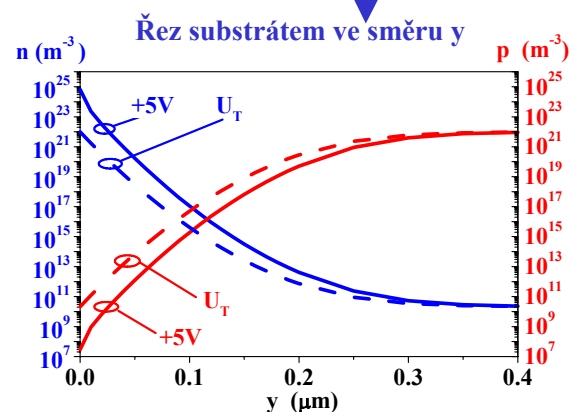
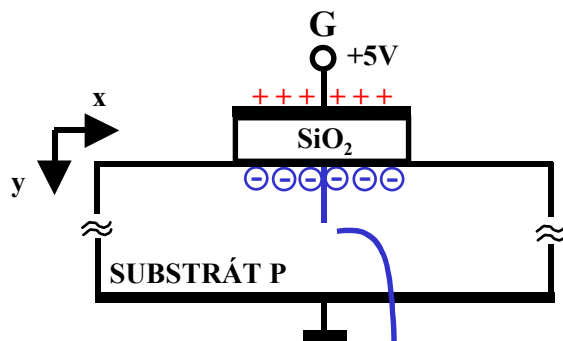


K jeho kompenzaci je potřeba více záporného náboje \Rightarrow OPN se rozšíří.



MOS kapacitor – princip činnosti

b) VZNIK INVERZNÍ VRSTVY



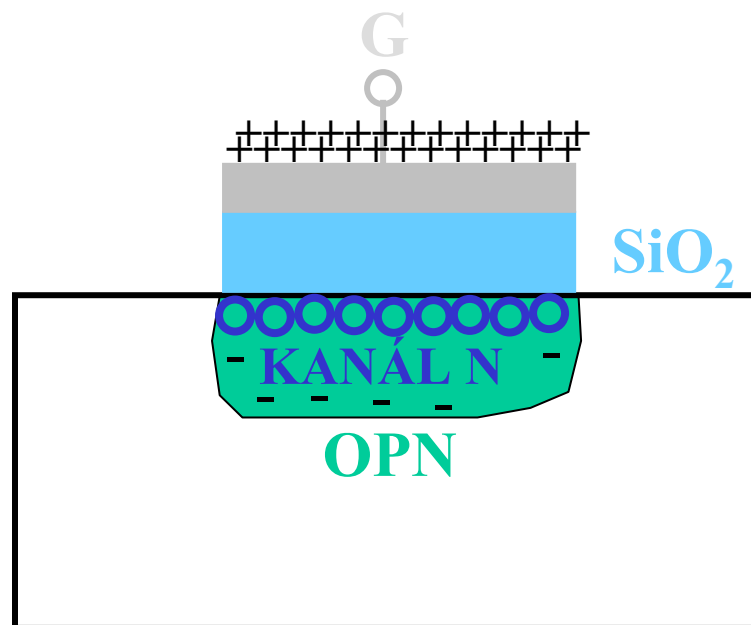
$$U_G = U_{Th}$$

zvýšíme U_G na U_{Th}

Kladný náboj na hradle vzroste.



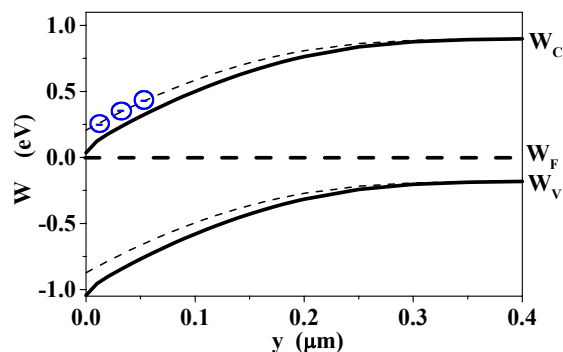
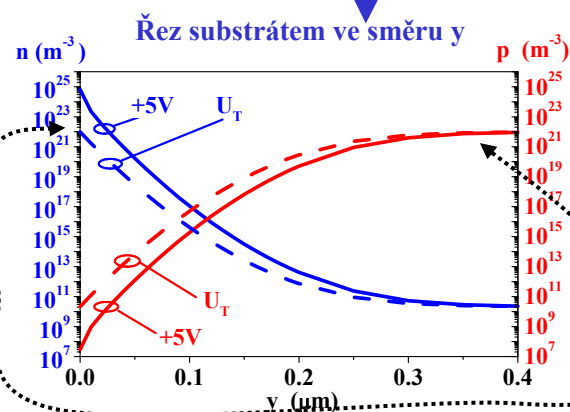
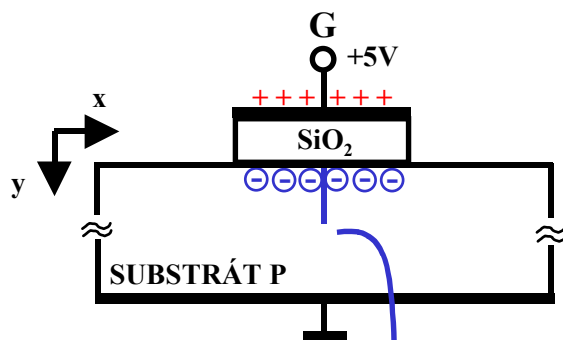
K jeho kompenzaci již **náboj OPN** nestačí
 \Rightarrow na povrchu se objeví volné elektrony.



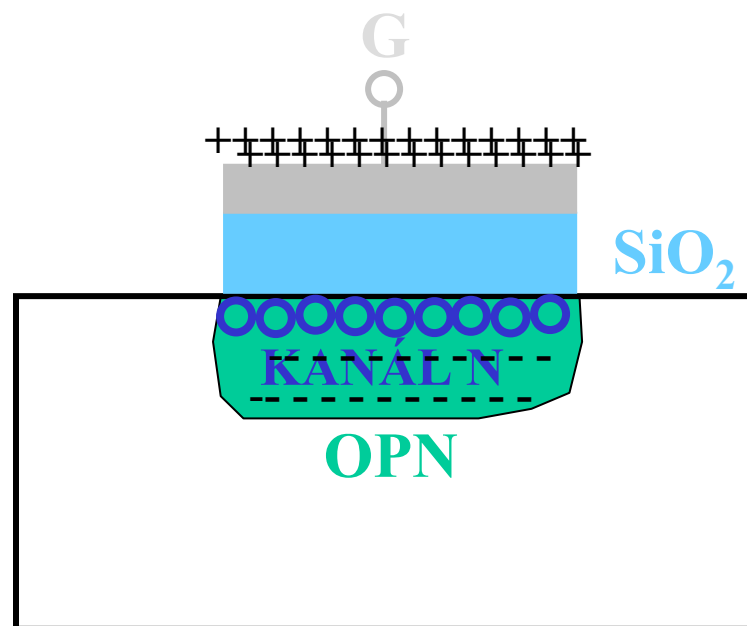
Vzniká kanál vodivosti typu N.

MOS kapacitor – princip činnosti

b) VZNIK INVERZNÍ VRSTVY



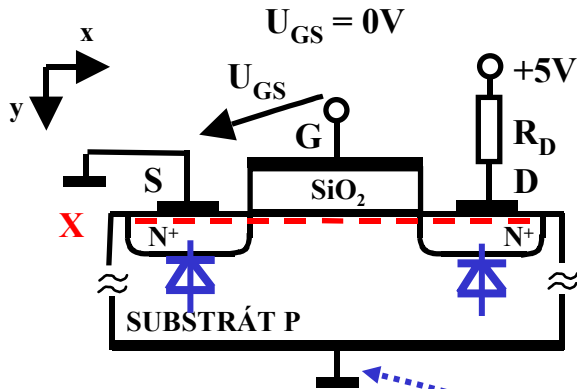
$$U_G = U_{Th}$$



Kanál N tvořený inverzní vrstvou vzniká při přiložení prahového napětí U_{Th} .

Při přiložení prahového napětí U_{Th} je $n(y=0) = p(y=\text{substrát})$.

MOSFET – princíp činnosti



K MOS kapacitoru přidáme Source a Drain.



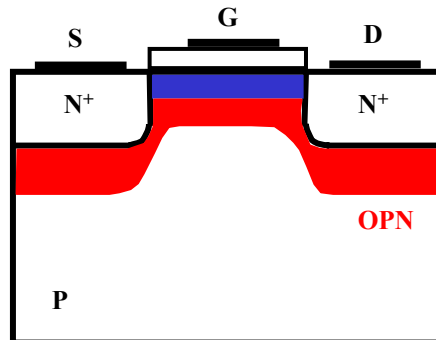
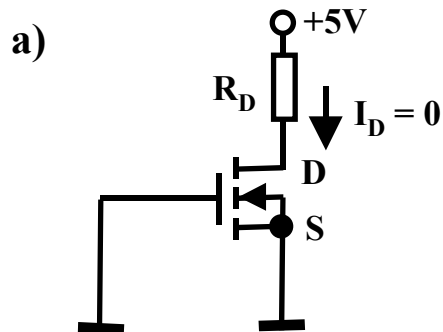
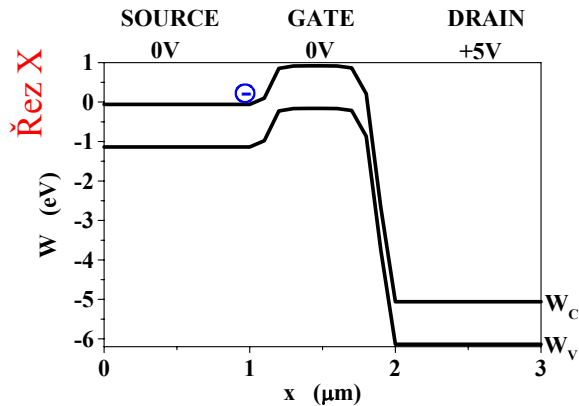
Vzniklé substrátové diody musí být nevodivé.



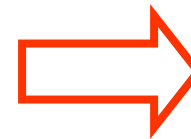
Substrát musí být na nejnižším potenciálu!

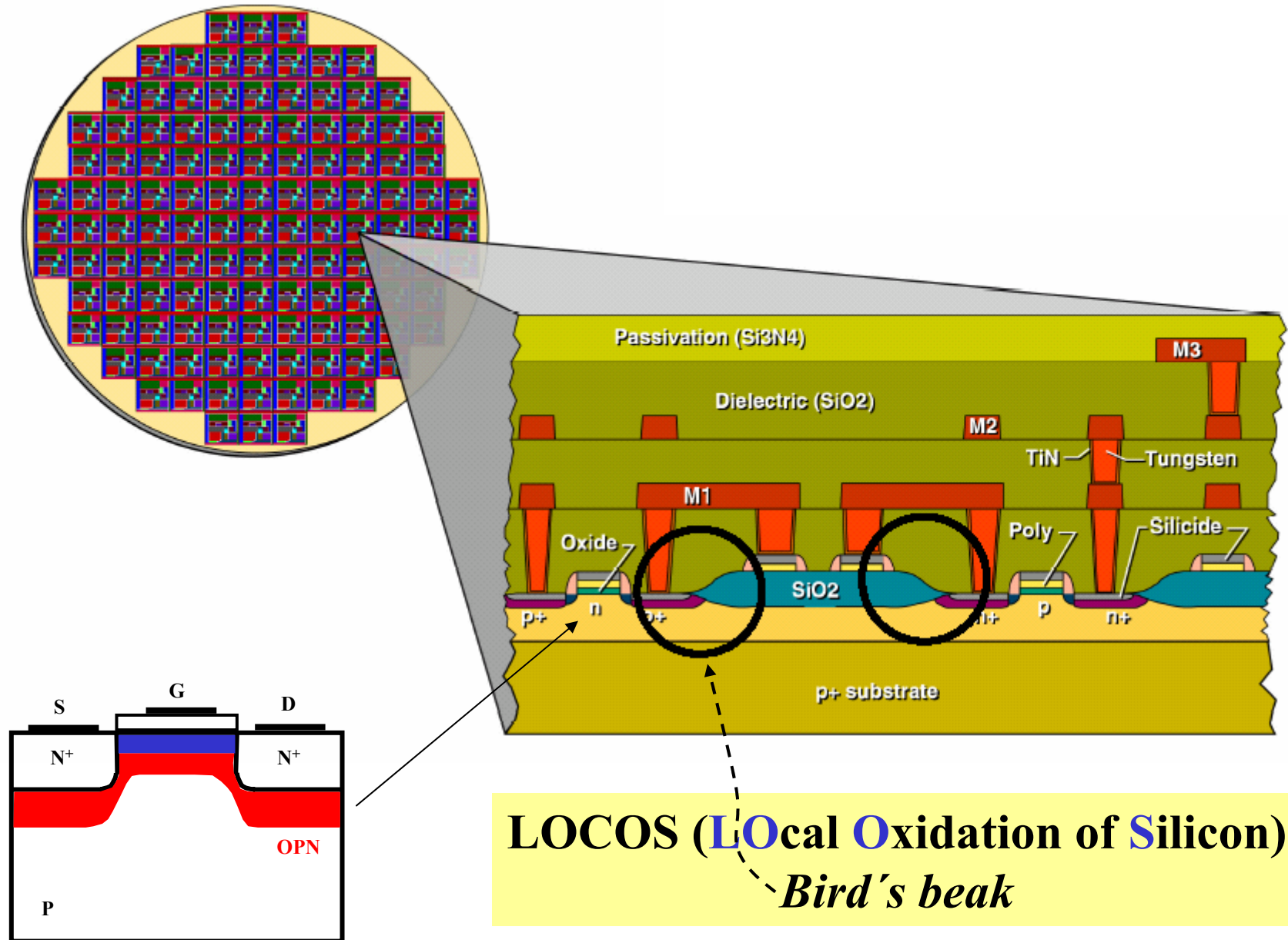


OPN substrátových diod a kanálu izolují aktivní oblast MOSFETu (kanál) od okolí.

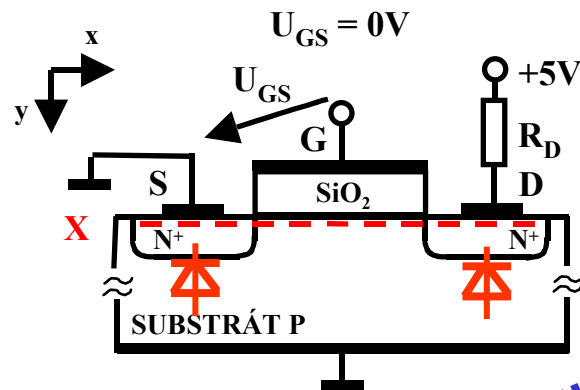


NEJVYŠŠÍ HUSTOTA INTEGRACE



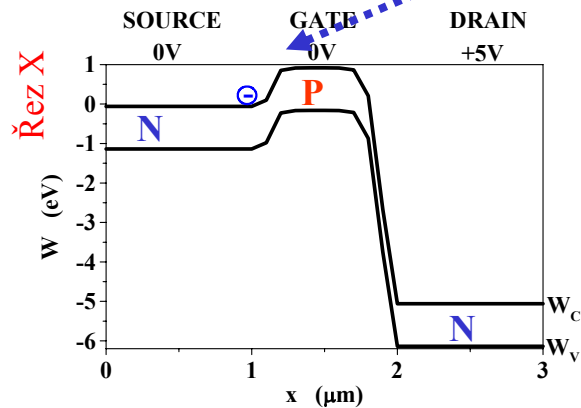


MOSFET – princip činnosti

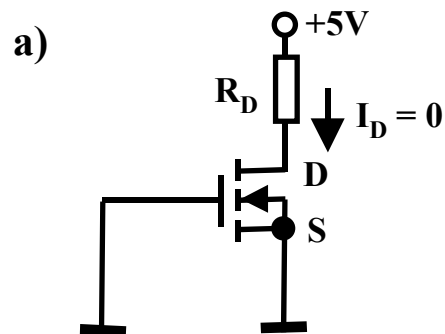


$$U_{GS} < U_{th}$$

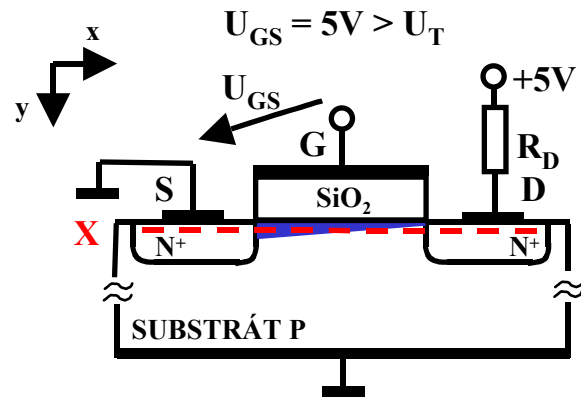
Energetická bariéra brání průchodu elektronů z S do D.



$$I_D = 0$$



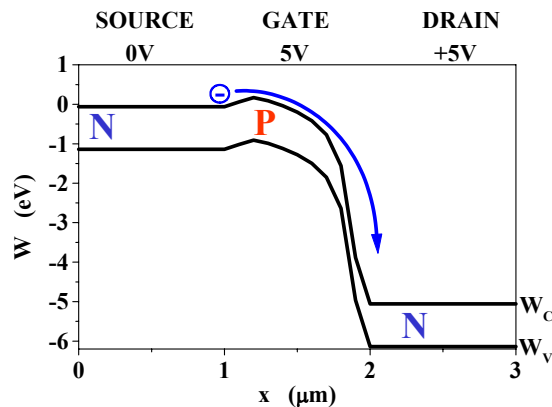
MOSFET – princip činnosti



$$U_{GS} > U_{th}$$



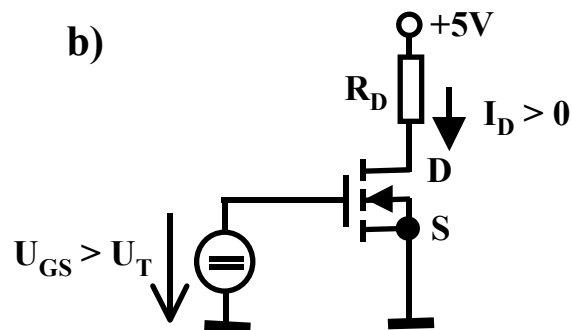
Příčné elektrické pole způsobí ohyb pásů pod hradlem \Rightarrow energetická bariéra již nebrání průchodu elektronů z S do D.



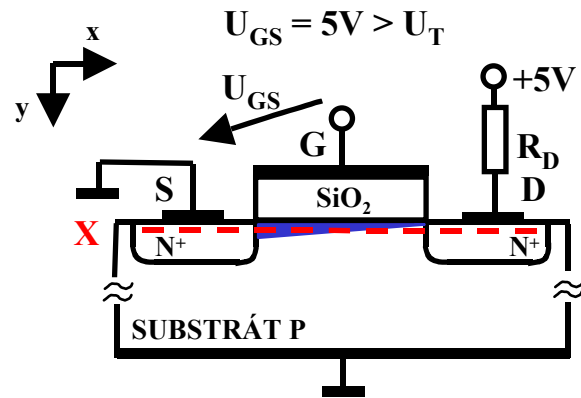
Inverzní vrstva (vzniklá v substrátu P) tvořená elektrony ze Source (N^+) vodivě propojí Source a Drain.



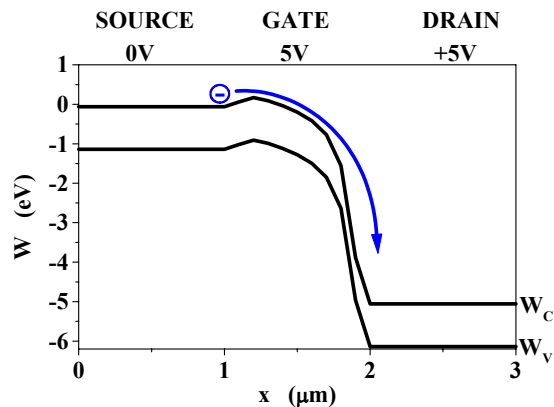
$$I_D > 0$$



MOSFET – princip činnosti

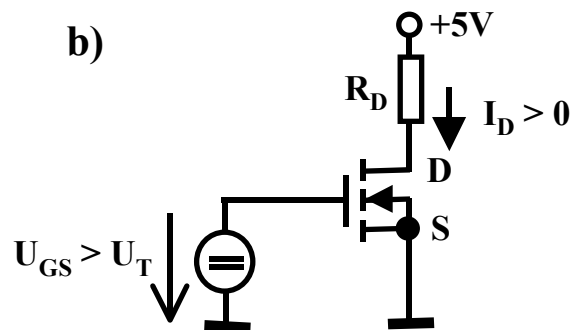


Tranzistorový jev:
Napětím U_{GS} ovládáme proud I_D .



Gate je tvořen dielektrikem (SiO_2)
 \Rightarrow do vstupu neteče proud !
 \Rightarrow velký vstupní odpor ($\sim \text{M}\Omega$)

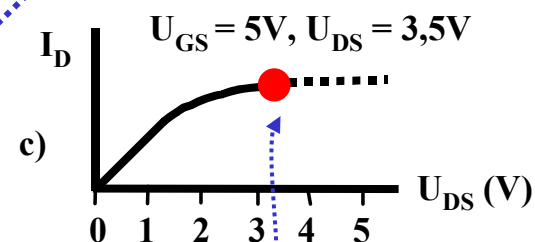
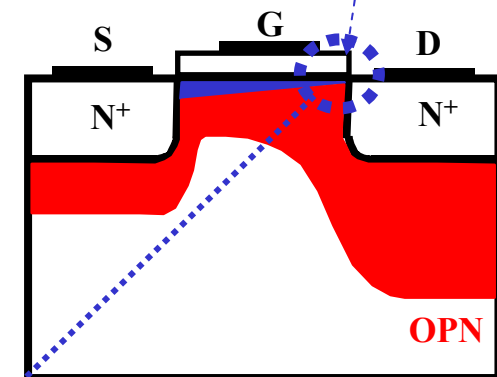
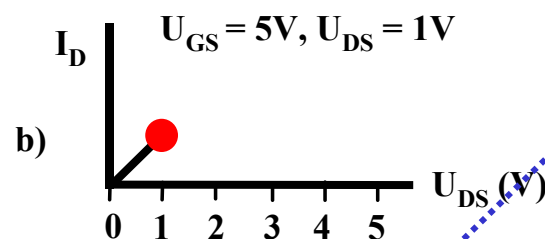
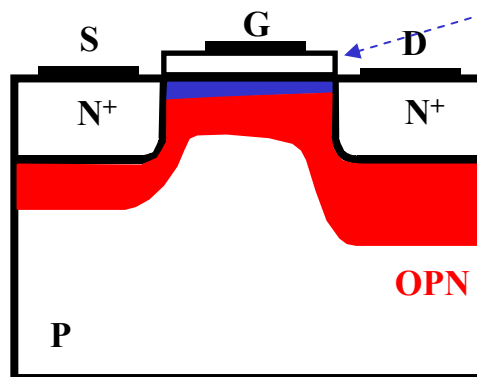
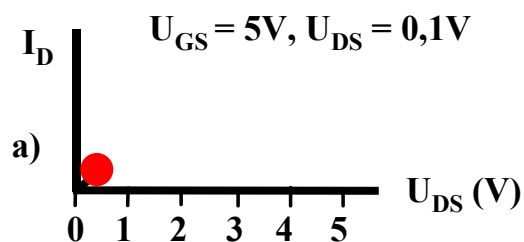
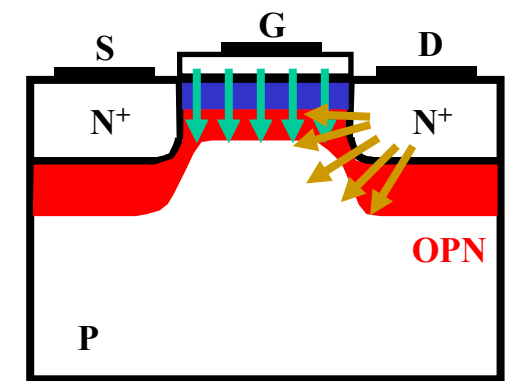
Tradiční výhoda unipolárních tranzistorů.



MOSFET – vliv podélného elektrického pole

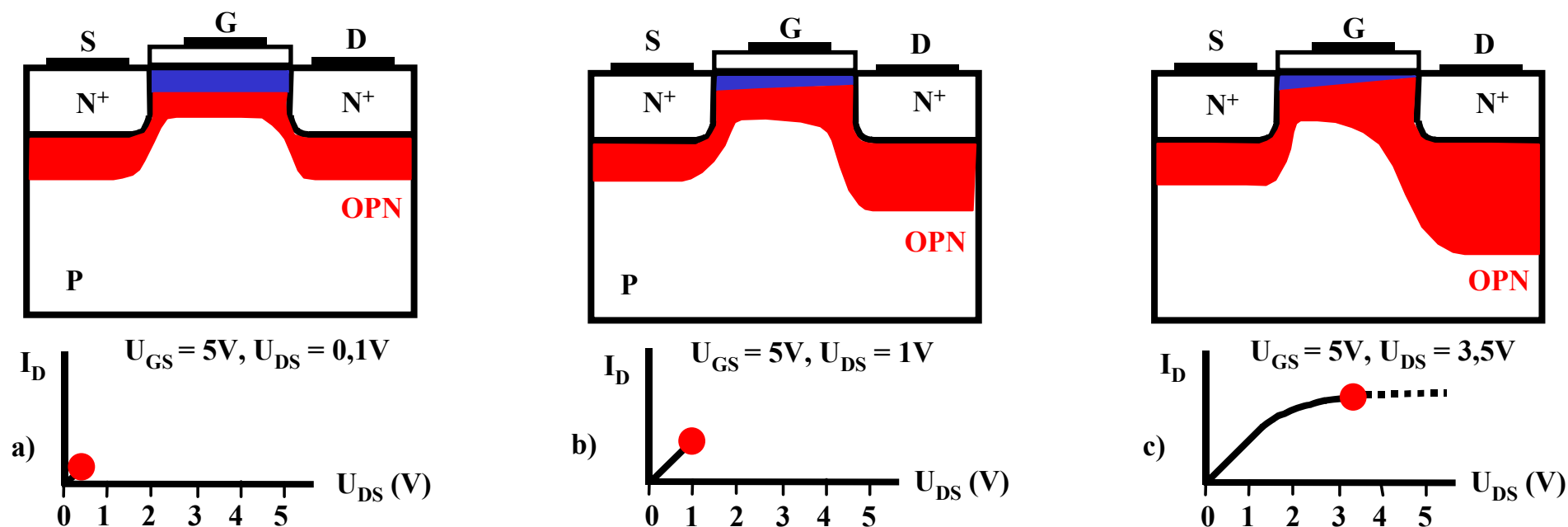
Podélné el. pole dané U_{DS} působí lokálně proti příčnému el. poli U_{GS}
 \Rightarrow snížení konc. elektronů v inverzní vrstvě \Rightarrow tenší kanál u Drainu.

K zaškrcení dojde proto, že v místě zaškrcení je $U_T = 0$.



Při zaškrcení kanálu platí $U_{DS} = U_{DSsat} = U_{GS} - U_T$
 \Rightarrow MOSFET vstupuje do SATURACE.

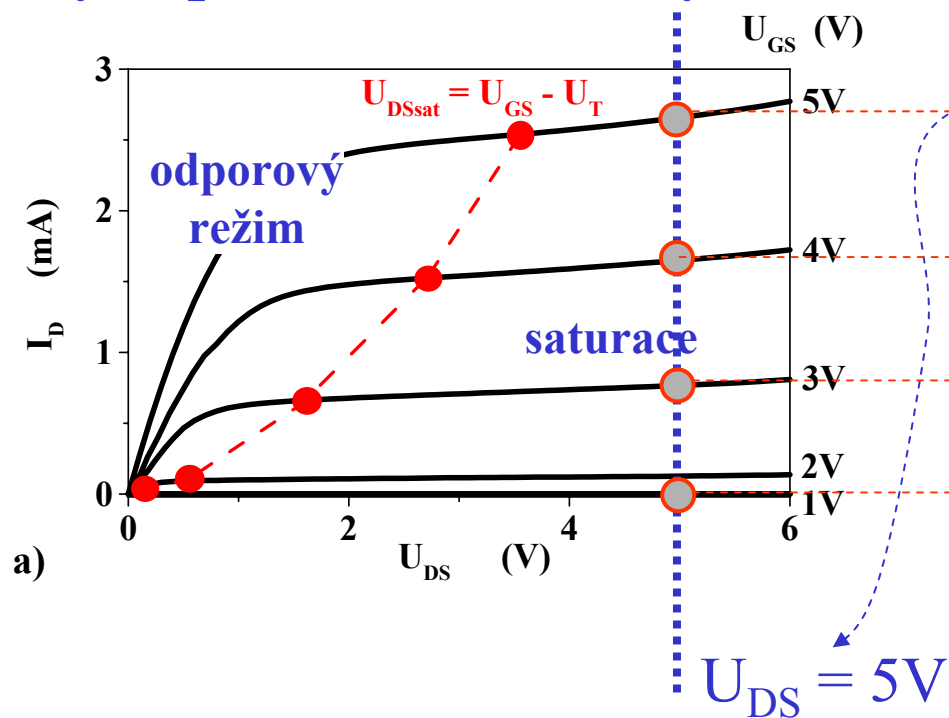
MOSFET – vliv podélného elektrického pole



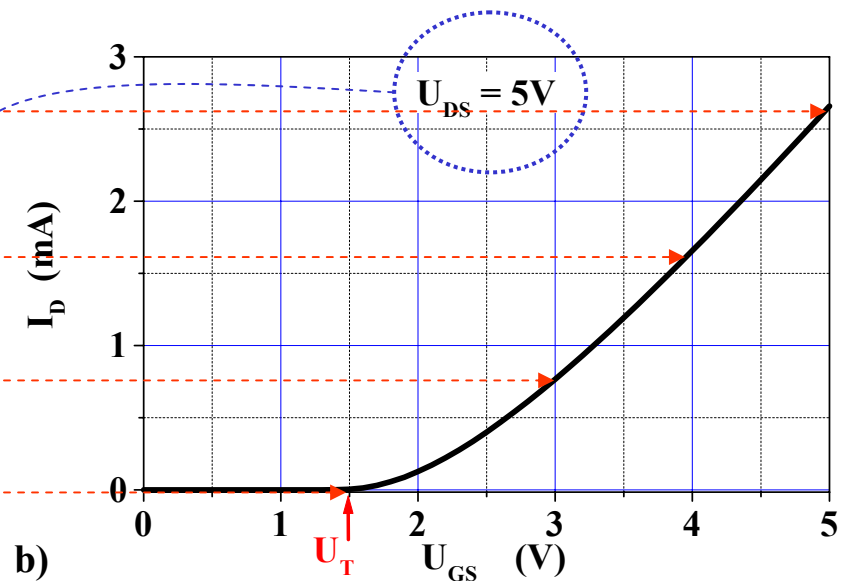
Výsledkem jsou výstupní charakteristiky jako u JFETu.

MOSFET – charakteristiky

Výstupní charakteristiky

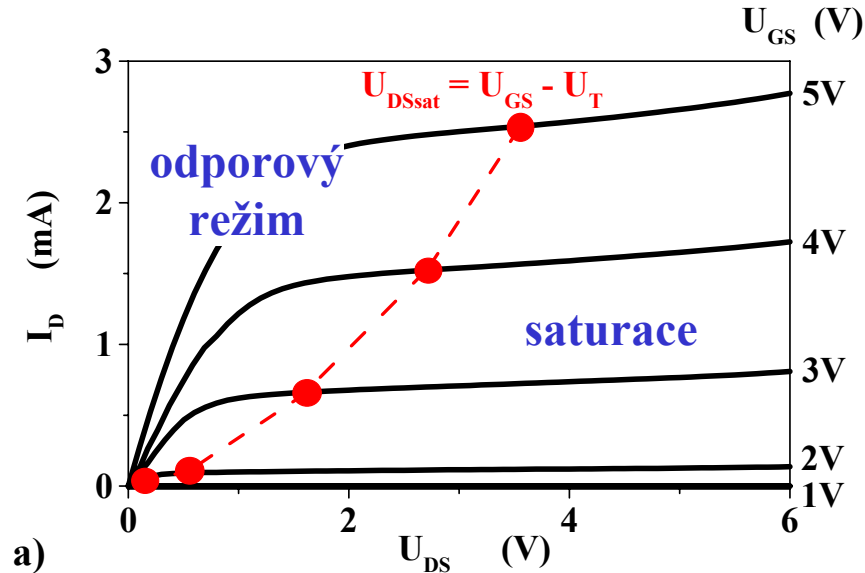


Převodní charakteristika

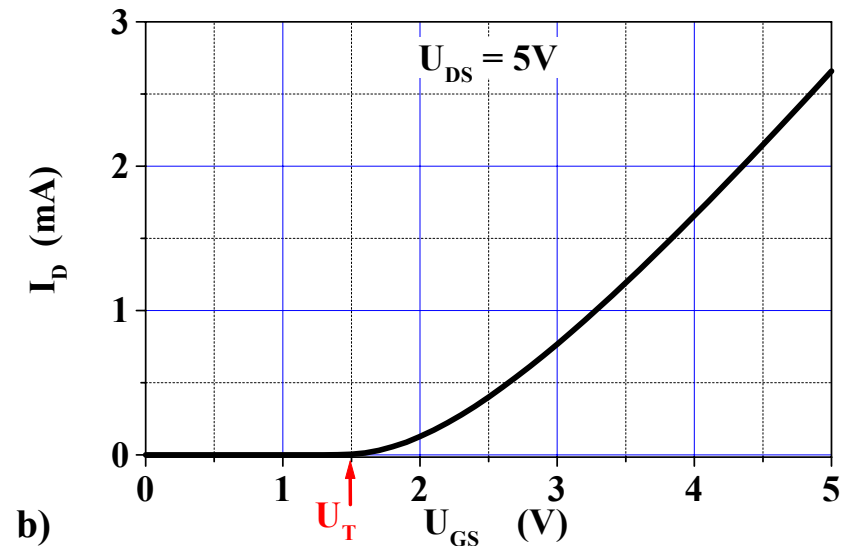


MOSFET – charakteristiky

Výstupní charakteristiky



Převodní charakteristika



Volné elektrony v kanálu představují pohyblivý náboj

$$U_{DS} = 0V: Q = C_{ox} \cdot (U_{GS} - U_T)$$



Je-li $U_{DS} > 0$, pak působí lokálně proti U_{GS} .

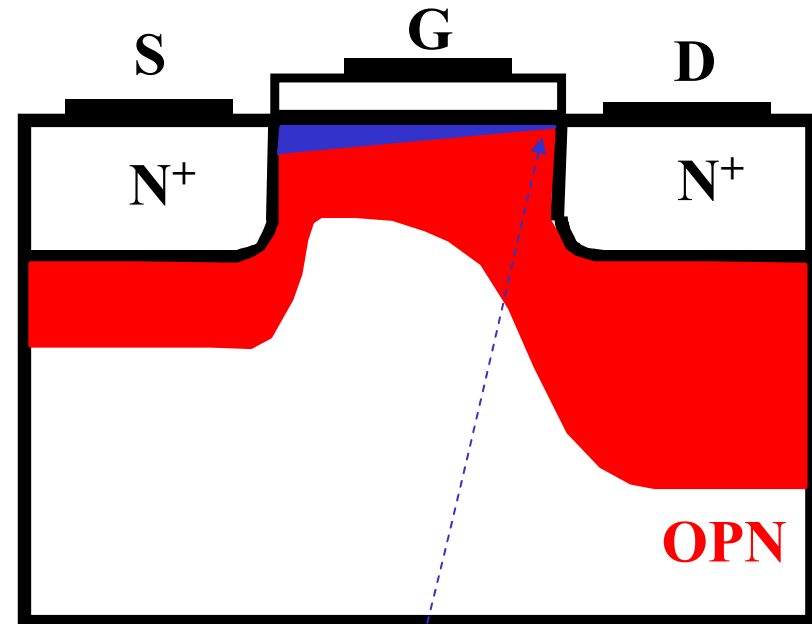
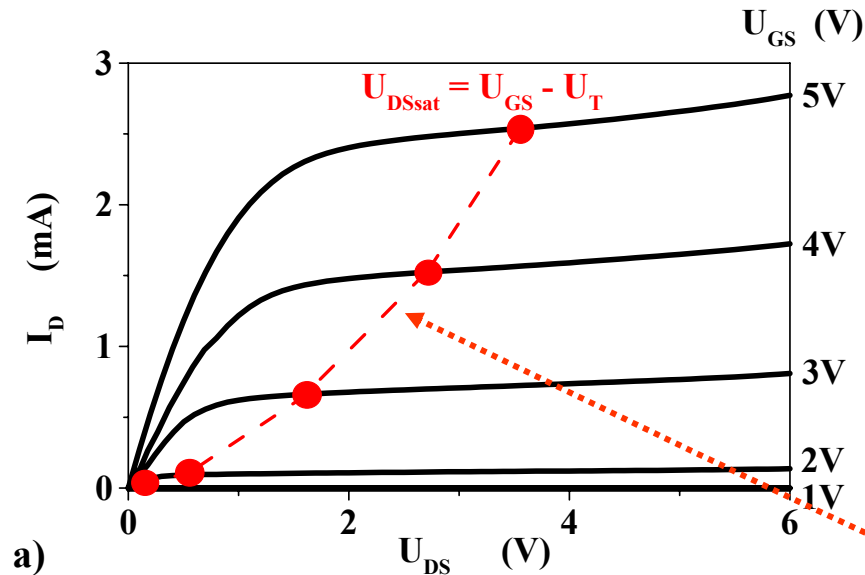
$$U_{DS} > 0V: Q = C_{ox} \cdot (U_{GS} - U_T - U_{DS})$$

$$C_{ox} = \epsilon_{ox} / t_{ox} \text{ (F/m}^2\text{)}$$

Nápověda:
náboj se objeví
až při dosažení U_T

MOSFET – charakteristiky

Výstupní charakteristiky



Je-li $U_{DS} > 0$, pak působí lokálně proti U_{GS} .

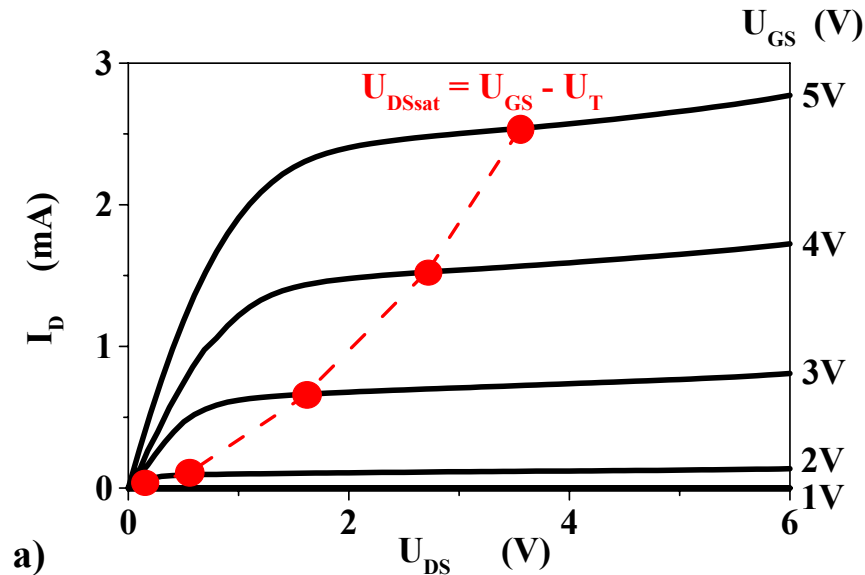
$$U_{DS} > 0V: Q = C_{ox} \cdot (U_{GS} - U_T - U_{DS})$$

V místě zaškrcení při $U_{DS} = U_{DSsat}$ („na vstupu do saturace“) platí $Q = 0$:

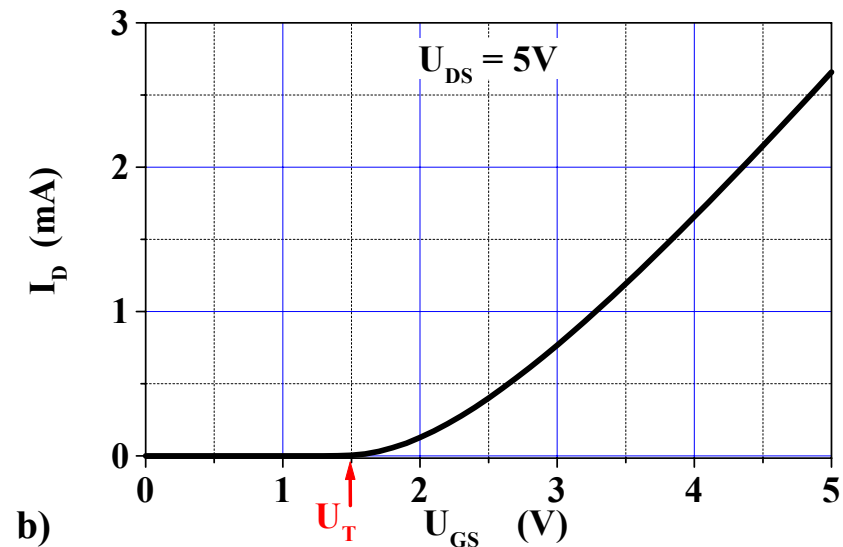
$$0 = Q = C_{ox} \cdot (U_{GS} - U_T - U_{DS}) \Rightarrow U_{DSsat} = U_{GS} - U_T$$

MOSFET – prahové napětí U_T

Výstupní charakteristiky



Převodní charakteristika



**Prahové napětí je takové napětí U_{GS} ,
při kterém protéká malý definovaný proud I_D .**

Malosignálový MOSFET: $I_D = 10 \mu A$

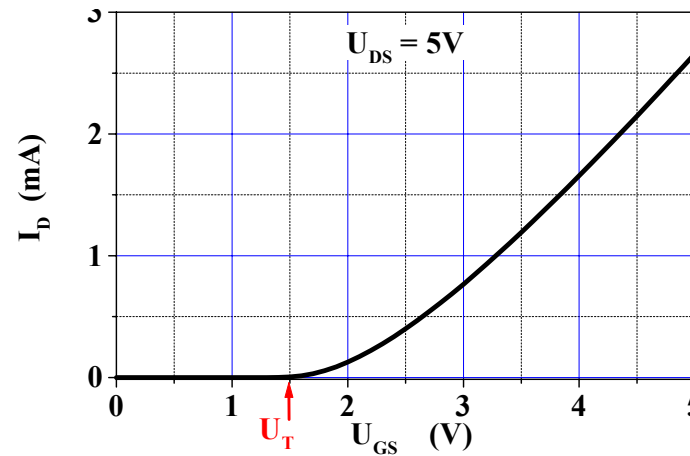
Výkonový MOSFET: $I_D = 10 mA$

dobře měřitelné

Diskrétní MOSFET: jednotky V Výkonový MOSFET: $3V < U_T < 10V$

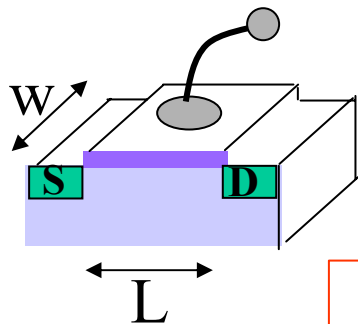
V integrovaném obvodu: 1V a méně ($U_T < U_{DD}$) $\Rightarrow \Rightarrow \Rightarrow$ desetiny V

MOSFET – převodní charakteristika



Pro odporový režim:

$$I_D = \frac{w\mu_n C_{ox}}{2L} \cdot [2(U_{GS} - U_T) \cdot U_{DS} - U_{DS}^2], \quad kde \ 0 < U_{DS} < U_{DSsat}$$



Pro režim saturace:

$$C_{ox} = \epsilon_{ox}/t_{ox} \text{ (F/m}^2\text{)}$$

dosazením $U_{DS} = U_{DSsat} = U_{GS} - U_T$

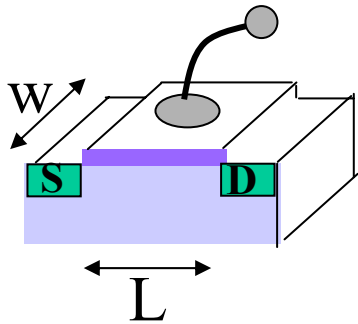
$$I_D = \frac{w\mu_n C_{ox}}{2L} \cdot [U_{GS} - U_T]^2, \quad kde \ U_{DS} \geq U_{DSsat}$$

kvadratická závislost proudu na napětí!

MOSFET – převodní charakteristika

Pro odporový režim:

$$I_D = \frac{w\mu_n C_{ox}}{2L} \cdot [2(U_{GS} - U_T) \cdot U_{DS} - U_{DS}^2], \text{ kde } 0 < U_{DS} < U_{DSsat}$$



Strmost:

$$y_{21s} = \frac{dI_D}{dU_{GS}} = \frac{w}{L} \cdot \mu_n \cdot C_{ox} \cdot U_{DS}$$

odpor řízený napětím (spínač)

Pro režim saturace:

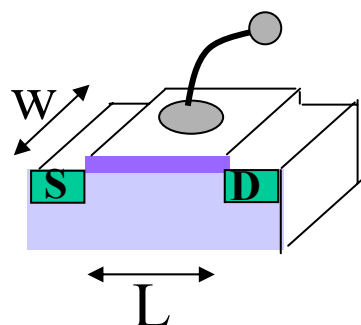
$$I_D = \frac{w\mu_n C_{ox}}{2L} \cdot [U_{GS} - U_T]^2, \text{ kde } U_{DS} \geq U_{DSsat}$$

Strmost:

$$y_{21s} = \frac{dI_D}{dU_{GS}} = \frac{w}{L} \cdot \mu_n \cdot C_{ox} (U_{GS} - U_T) = 2 \cdot \sqrt{\frac{w\mu_n C_{ox}}{2L}} \cdot \sqrt{I_D}$$

Strmost závisí na geometrii struktury – specifikum MOSFETu!

MOSFET – převodní charakteristika



Strmost:

odporový režim

$$y_{21s} = \frac{dI_D}{dU_{GS}} = \frac{w}{L} \cdot \mu_n \cdot C_{ox} \cdot U_{DS}$$

Strmost:

režim saturace

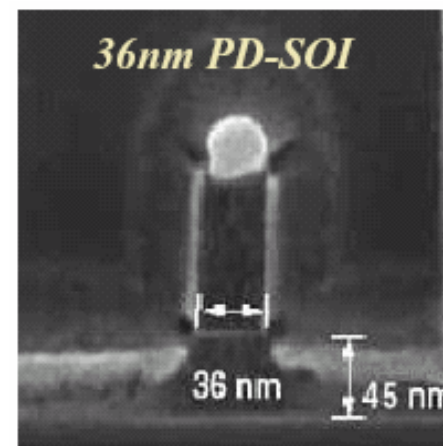
$$y_{21s} = \frac{dI_D}{dU_{GS}} = \frac{w}{L} \cdot \mu_n \cdot C_{ox} (U_{GS} - U_T) = 2 \cdot \sqrt{\frac{w \mu_n C_{ox}}{2L}} \cdot \sqrt{I_D}$$

L – délka kanálu MOSFETu

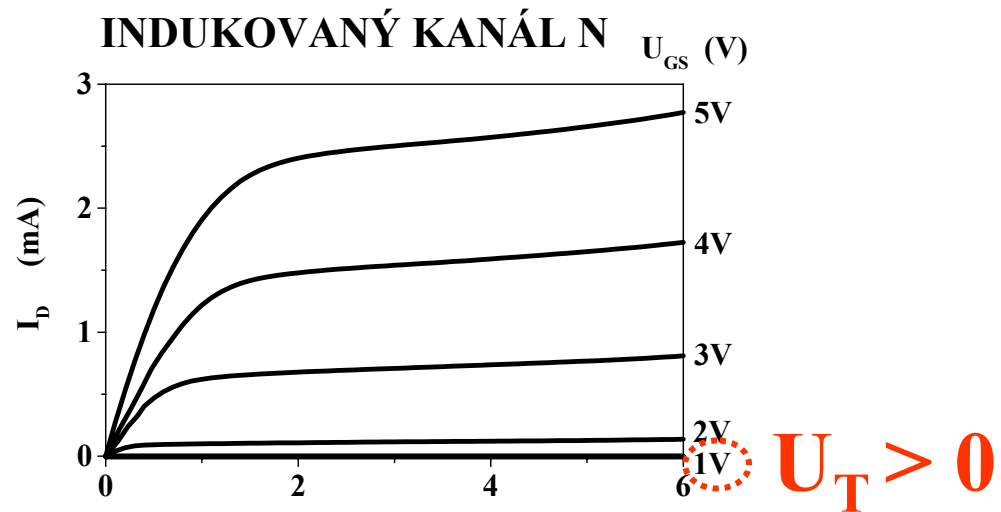
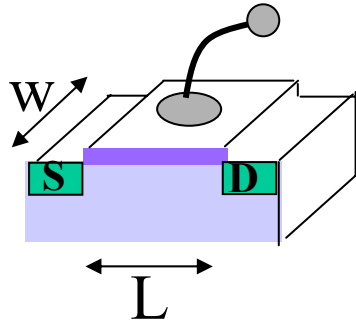
w – šířka kanálu MOSFETu

ROK	2002	2005	2008	2011	2014
L(nm)	130	100	70	50	35
Tr/cm ²	24M	40M	64M	100M	160M
MHz	1600	2000	2500	3000	3674
P _{cons.} (W)	130	160	170	175	183

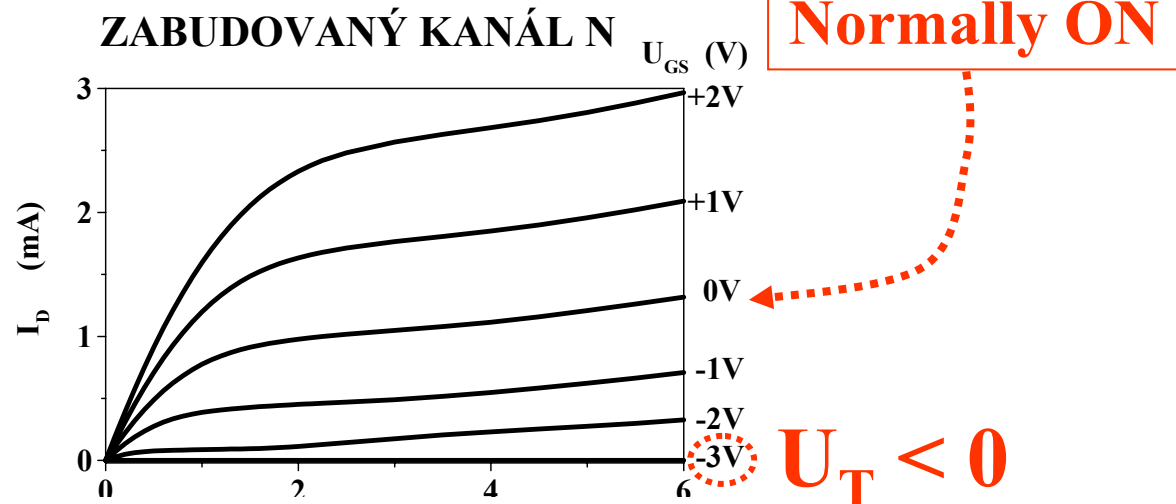
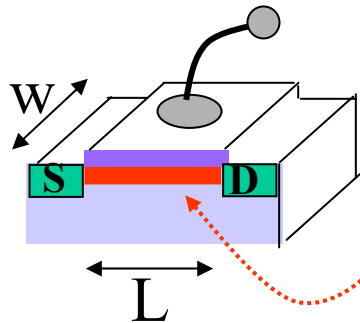
SIA Technology Roadmap

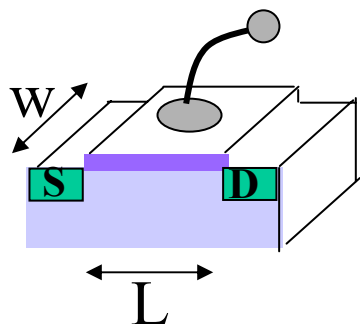


MOSFET – indukovaný kanál

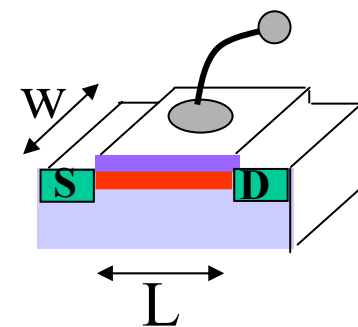


MOSFET – zabudovaný kanál (při výrobě)

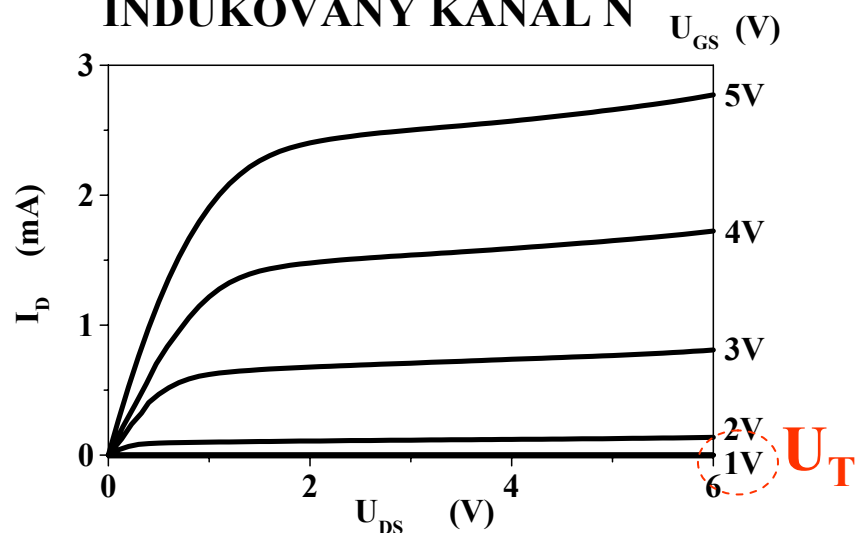




MOSFET - kanál N

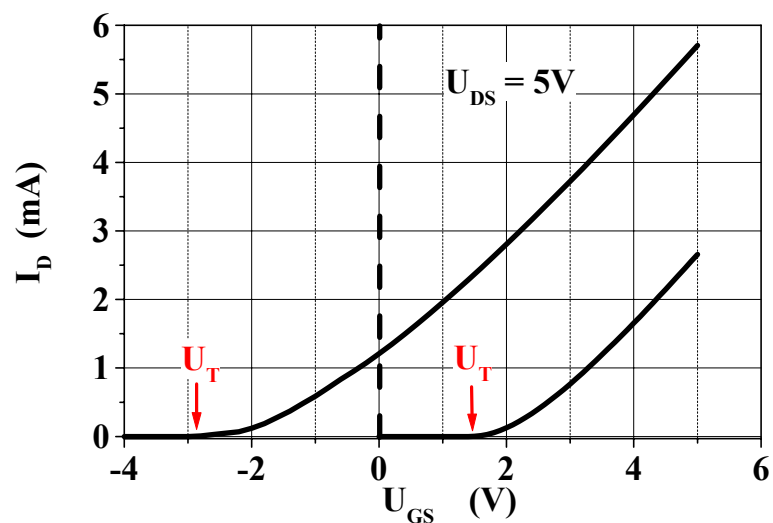
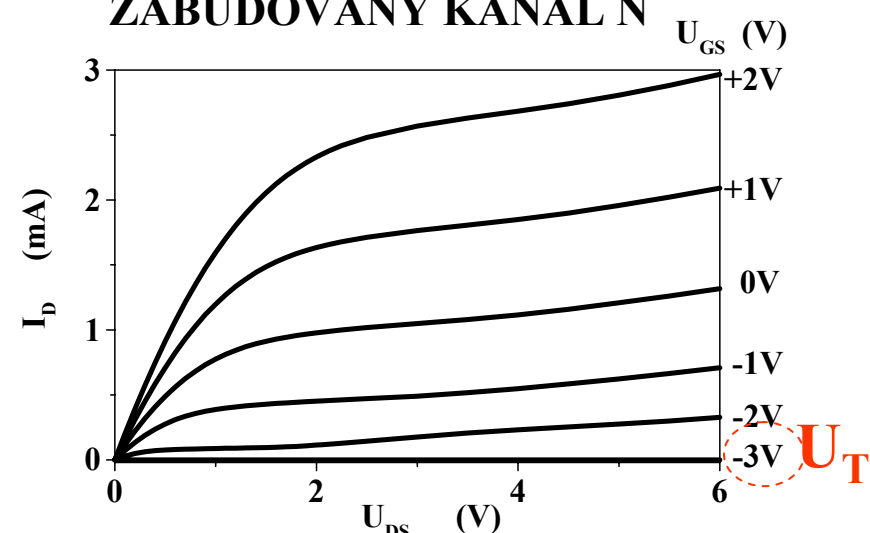


INDUKOVANÝ KANÁL N

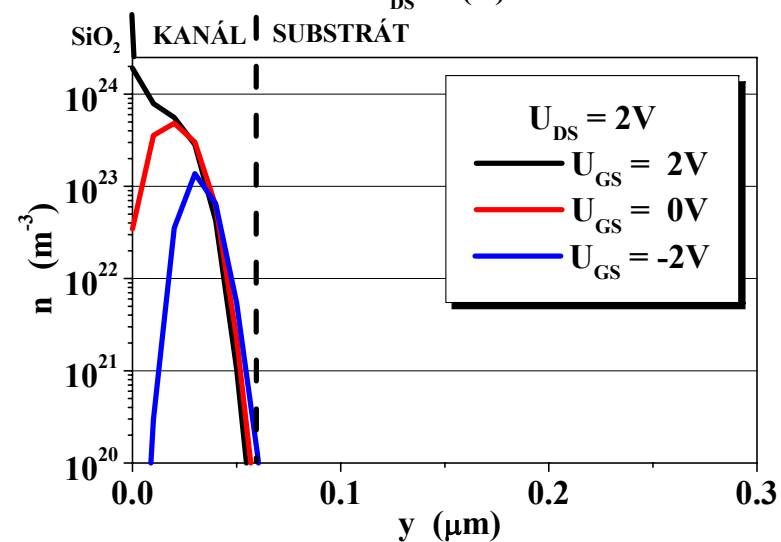


b)

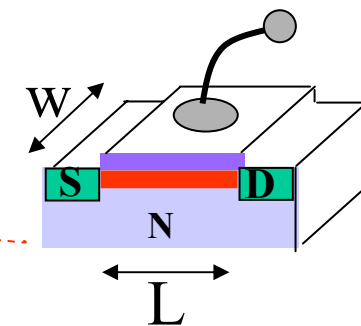
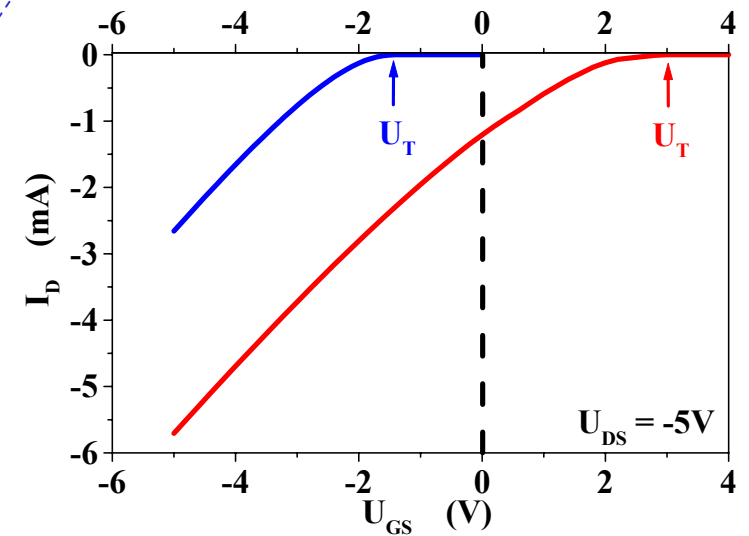
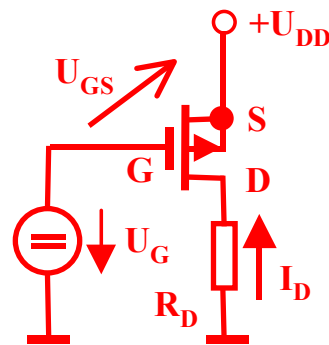
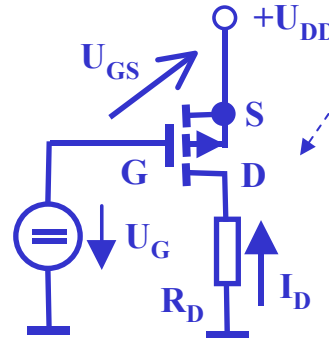
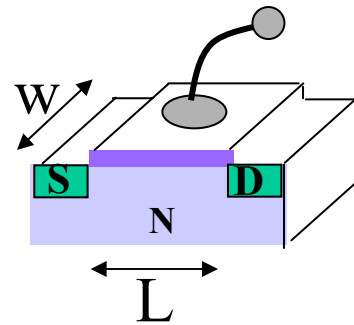
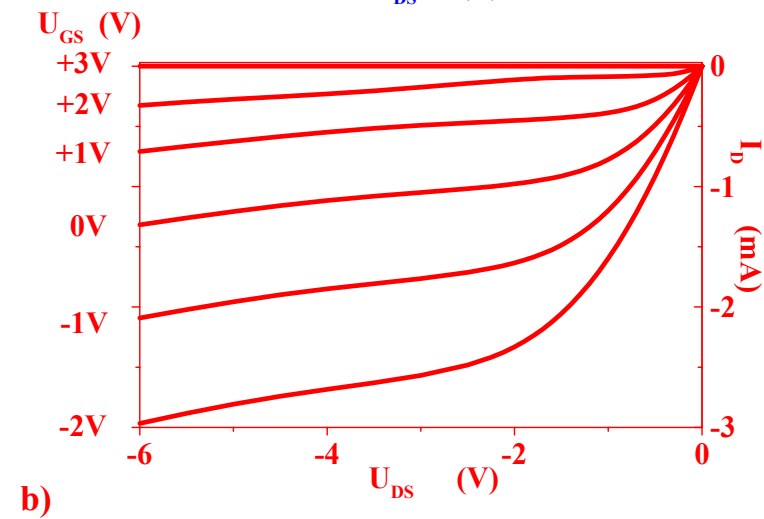
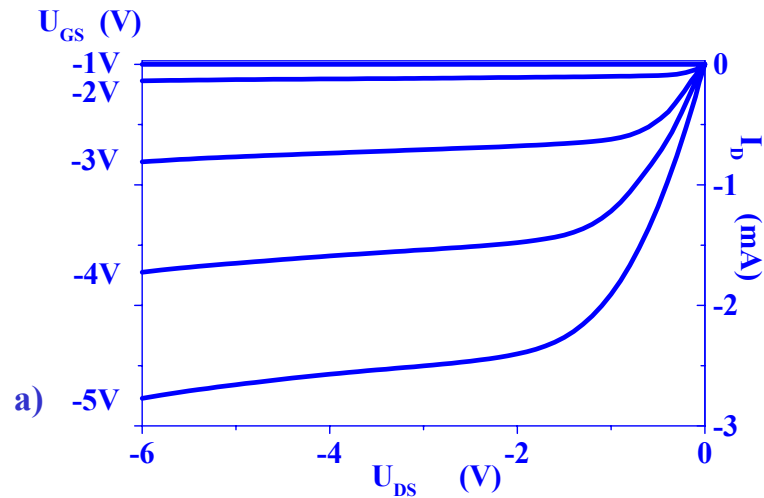
ZABUDOVANÝ KANÁL N



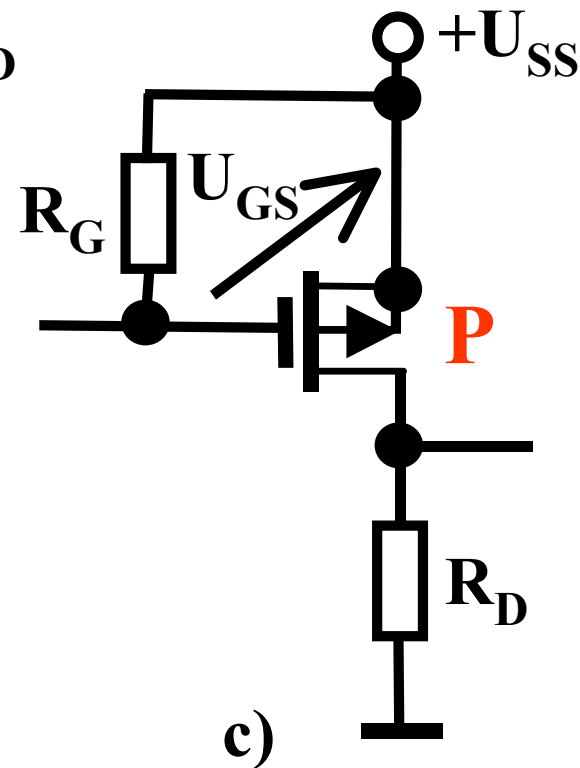
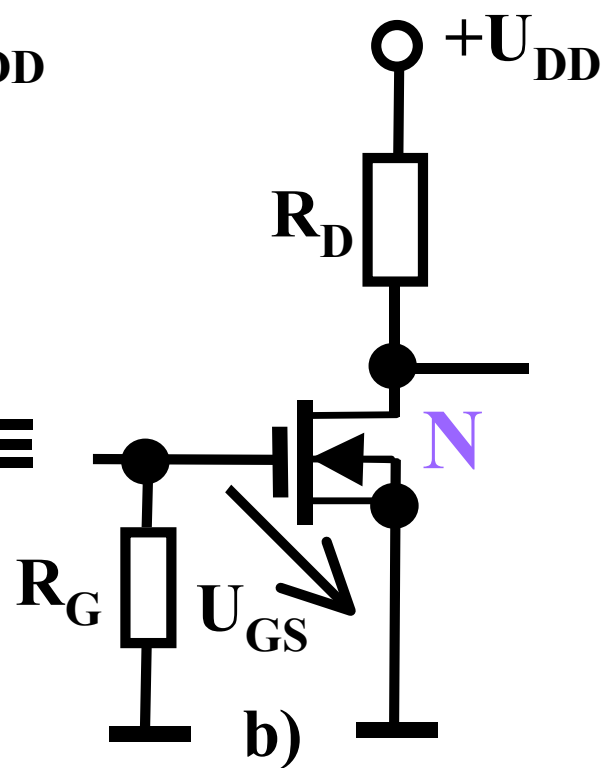
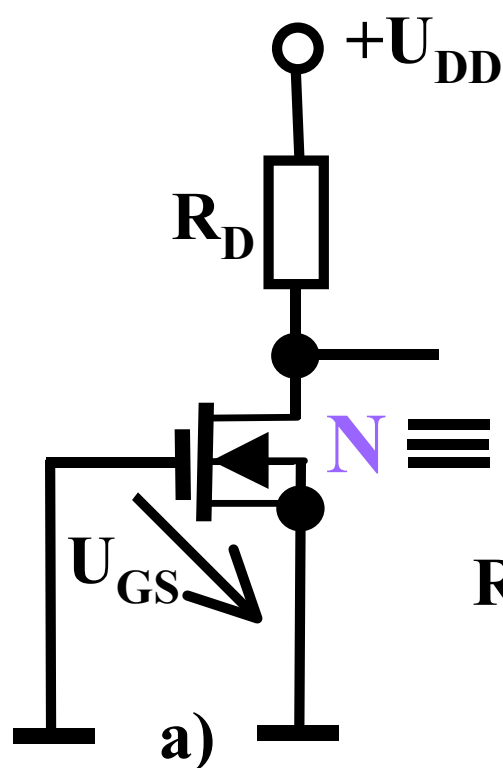
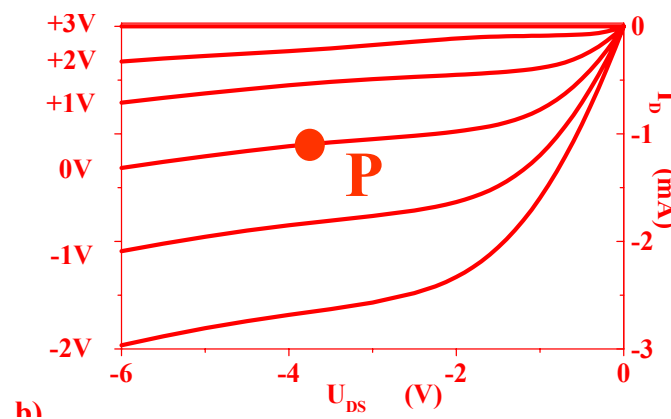
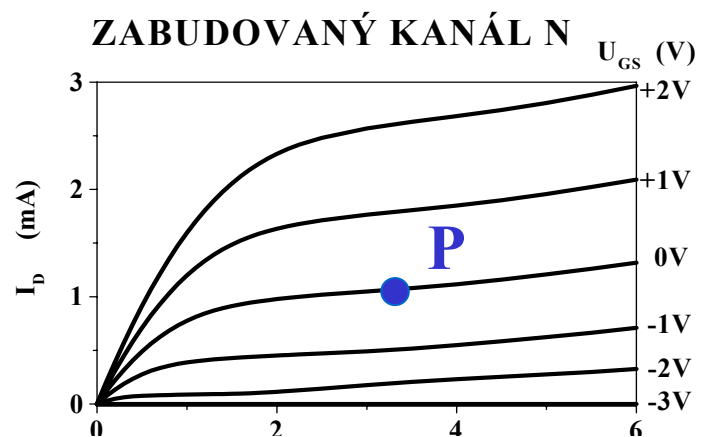
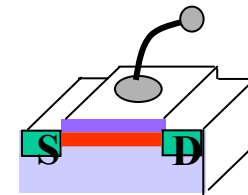
d)



MOSFET - kanál P

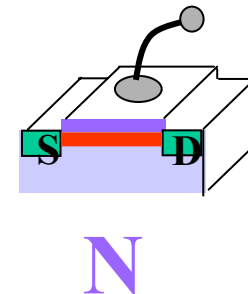


MOSFET jako zesilovač



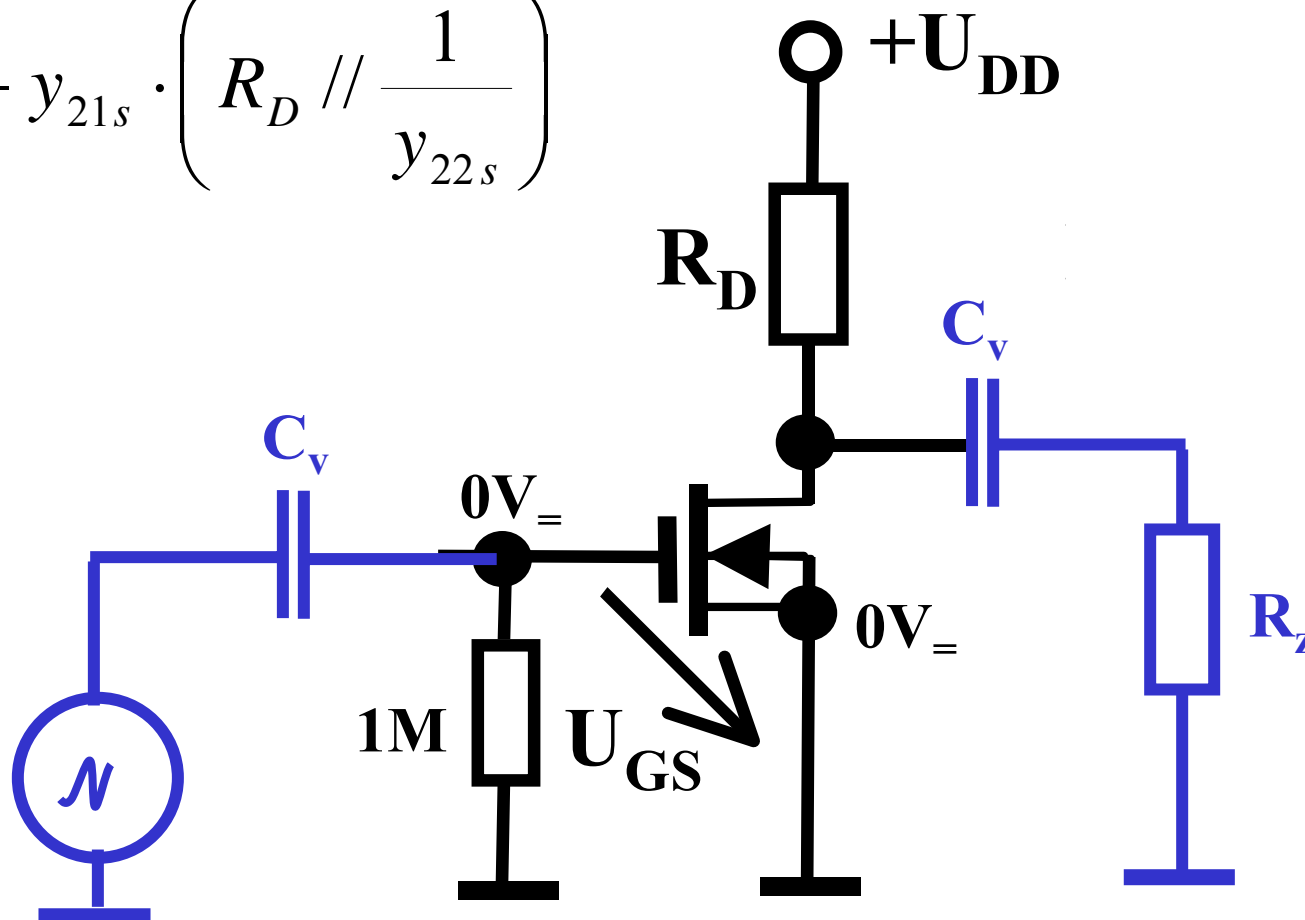
Nastavení pracovního bodu pro $U_{GS} = 0$

MOSFET jako zesilovač



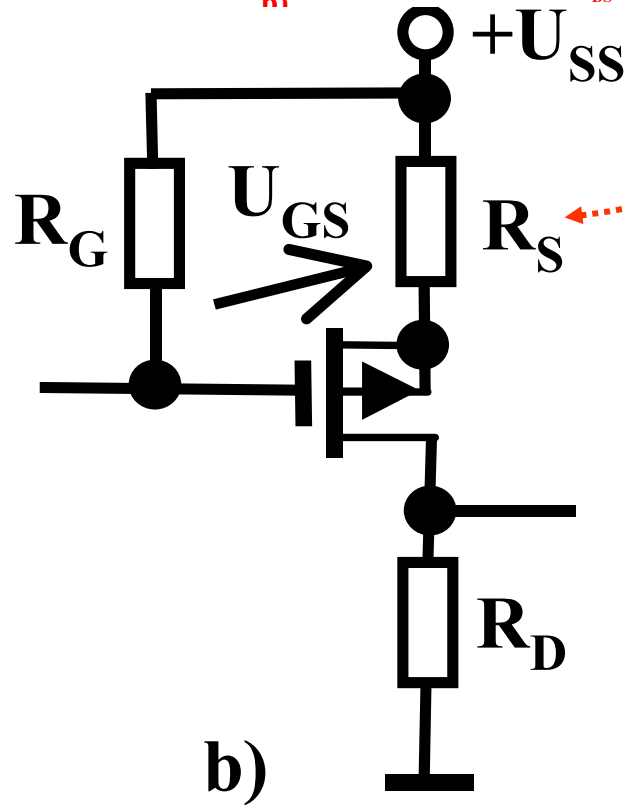
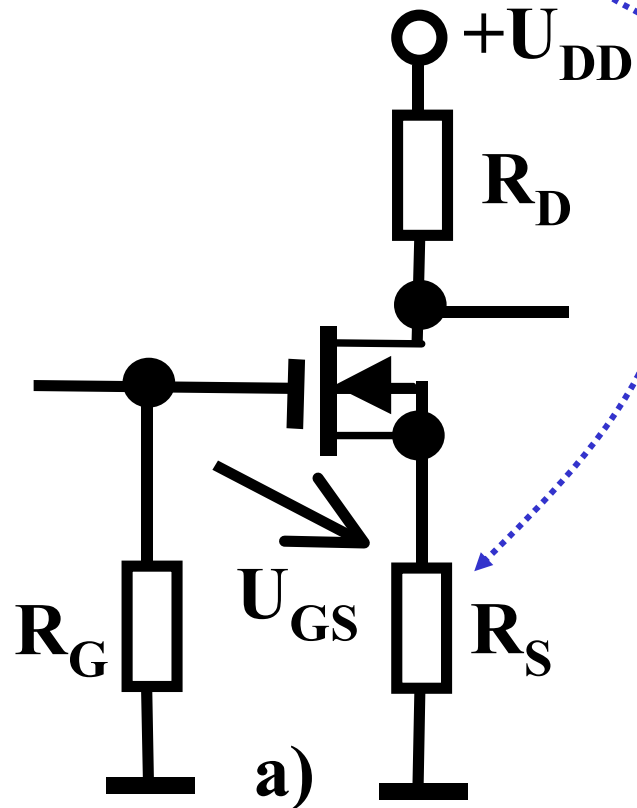
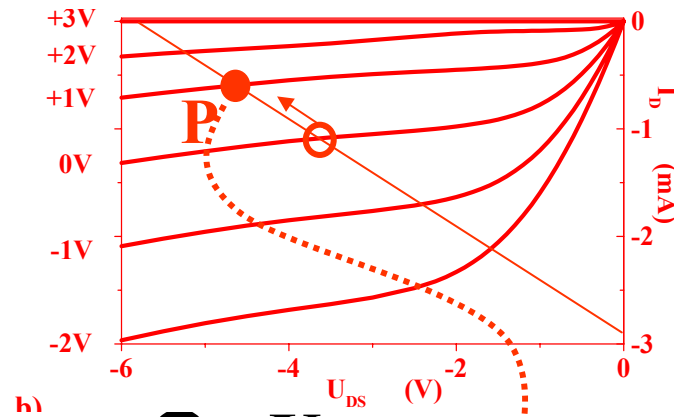
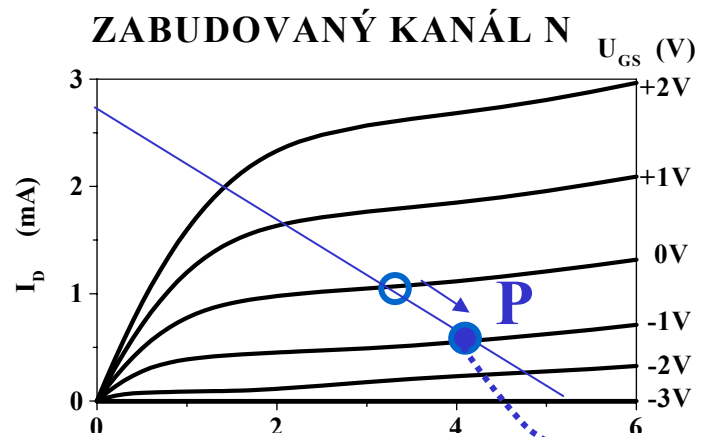
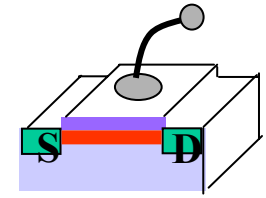
NLO shodné jako u JFETu \Rightarrow

$$A_u = -y_{21s} \cdot \left(R_D // \frac{1}{y_{22s}} \right)$$



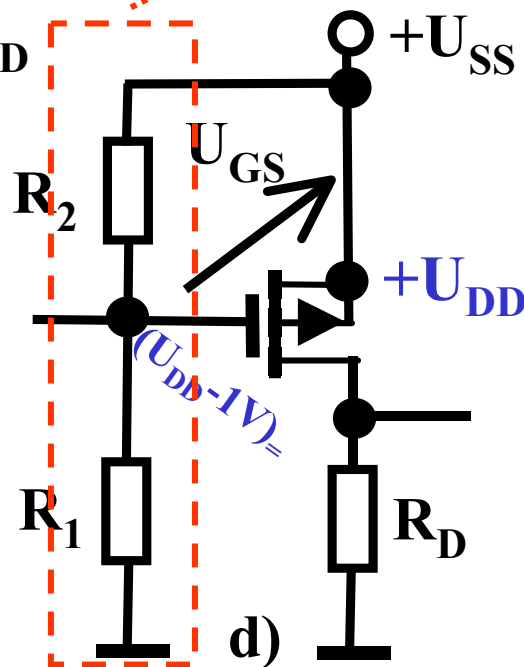
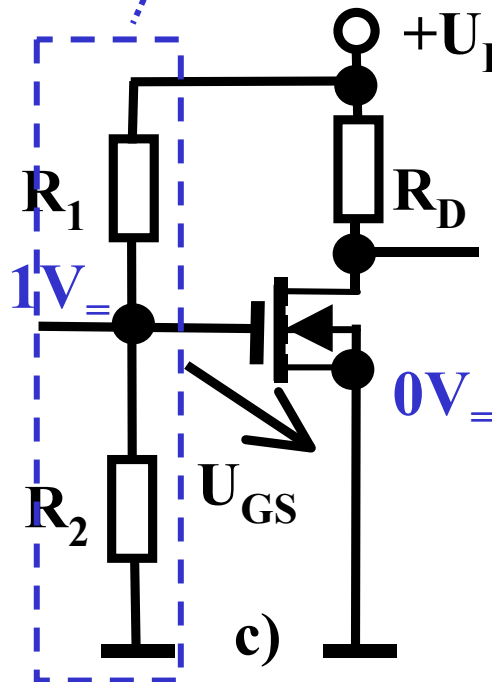
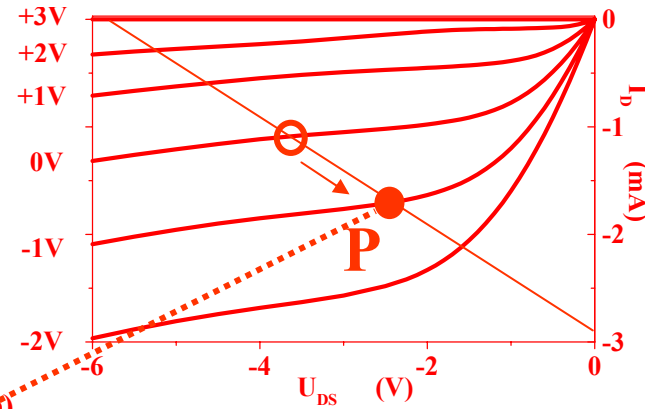
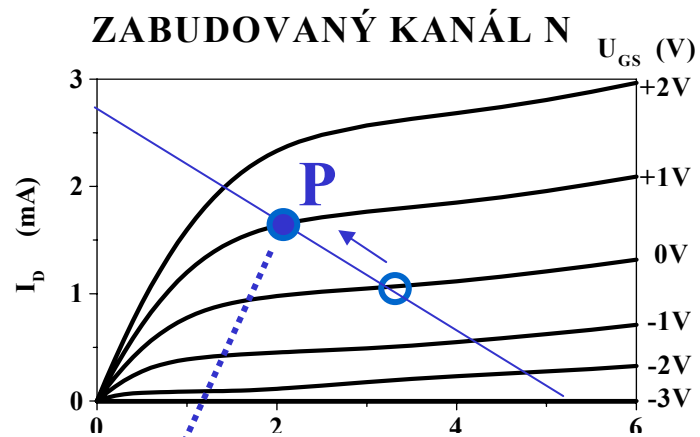
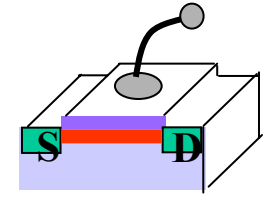
Invertor (SS)

MOSFET jako zesilovač



Nastavení pracovního bodu pro $|U_{GS}| > 0$

MOSFET jako zesilovač

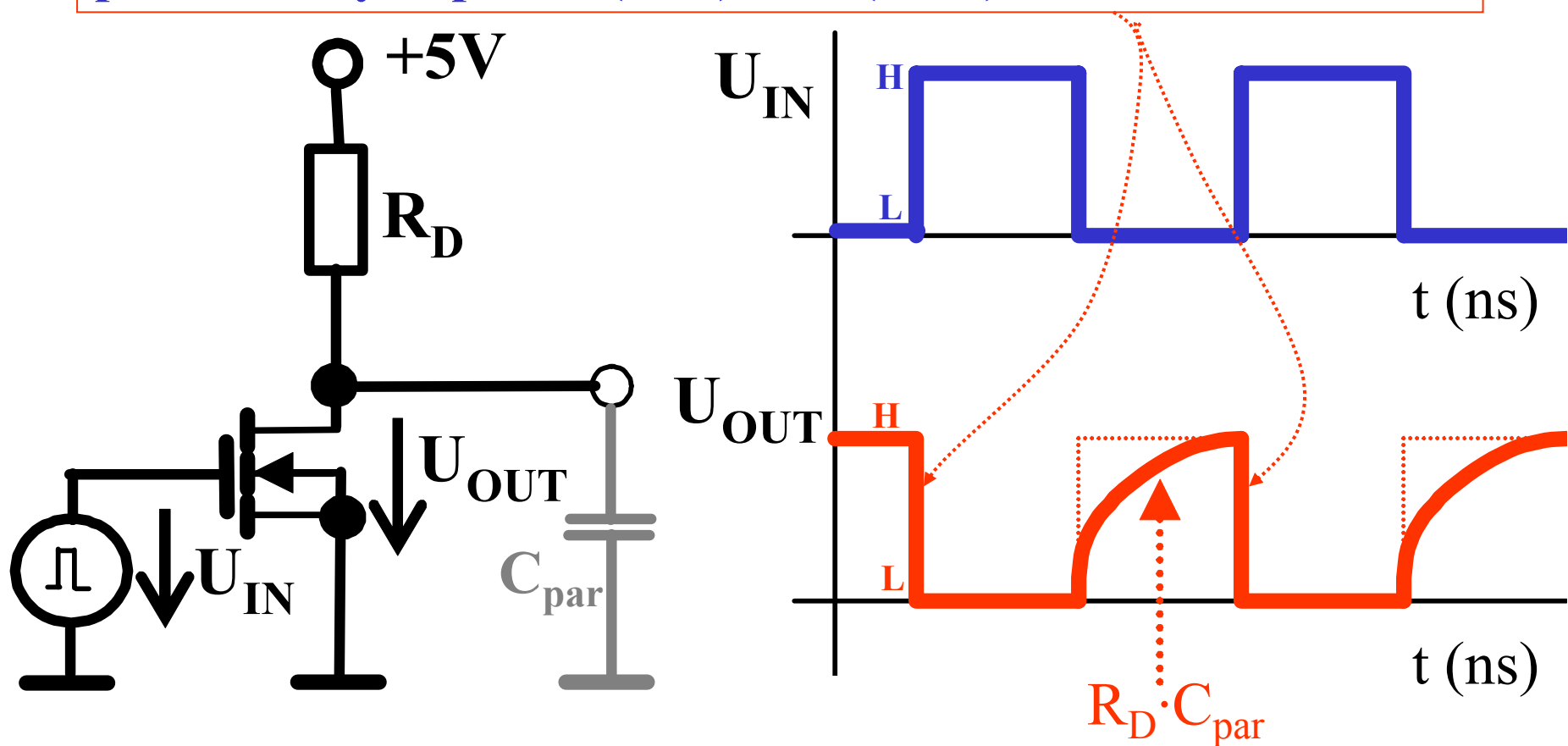


Do gate neteče proud
 \Rightarrow nutno použít
 dělič napětí R_1 - R_2

Nastavení pracovního bodu pro $|U_{GS}| > 0$

MOSFET jako spínač

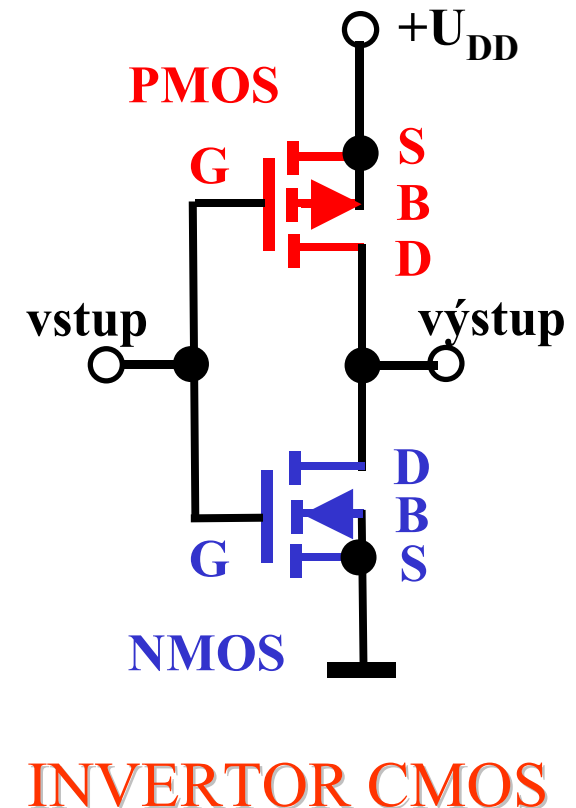
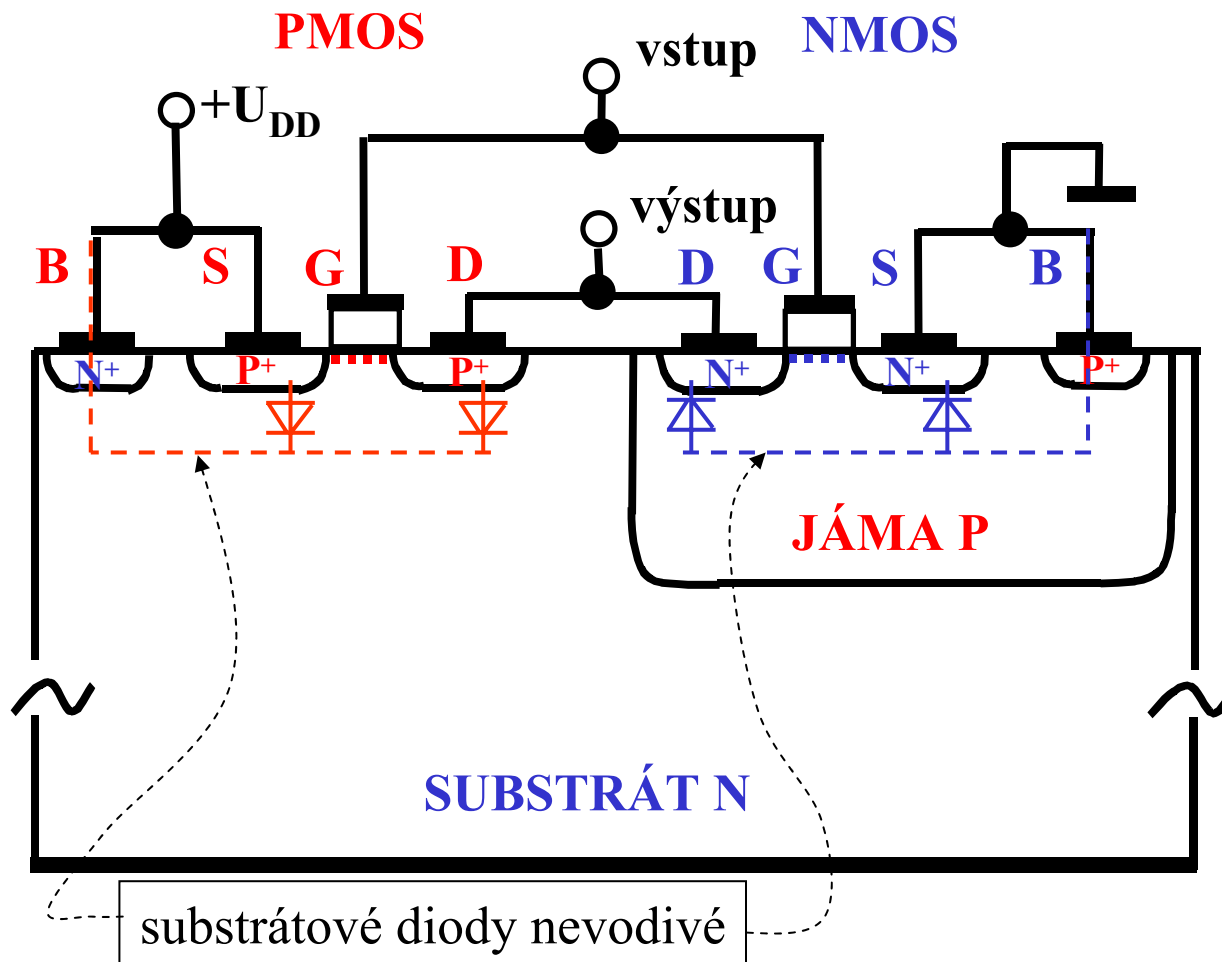
NMOS technologie: aktivní působení MOSFETu pouze při přechodu výstupu z H($\approx 5V$) do L($\approx 0V$).



Parazitní kapacita následujícího vstupu C_{par} se při přechodu výstupu z L($\approx 0V$) do H($\approx 5V$) nabíjí přes velký R_D pomalu \Rightarrow omezení f_{max} .

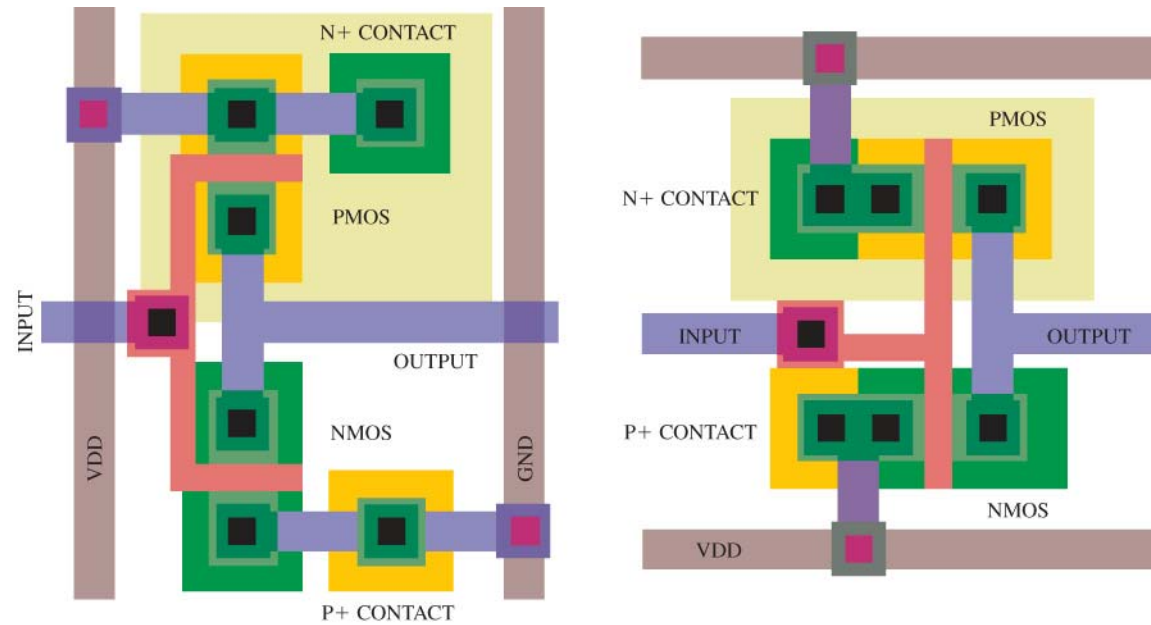
Complementary MOSFET - CMOS

CMOS technologie: PMOS tranzistor působí aktivně při přechodu výstupu z H($\approx 5V$) do L($\approx 0V$) a naopak (NMOS).

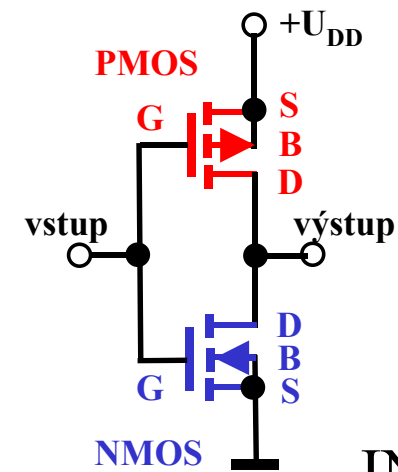
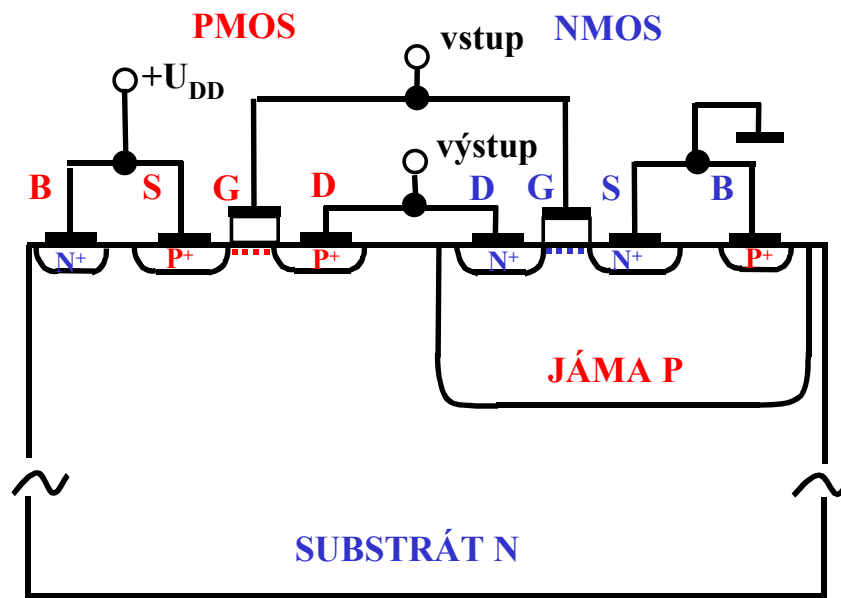


Complementary MOSFET - CMOS

LAYOUT



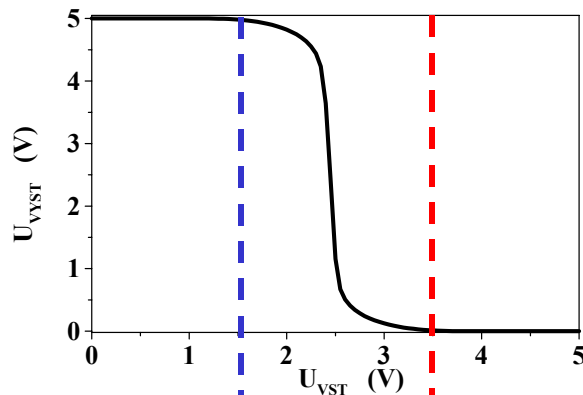
V ŘEZU



INVERTOR

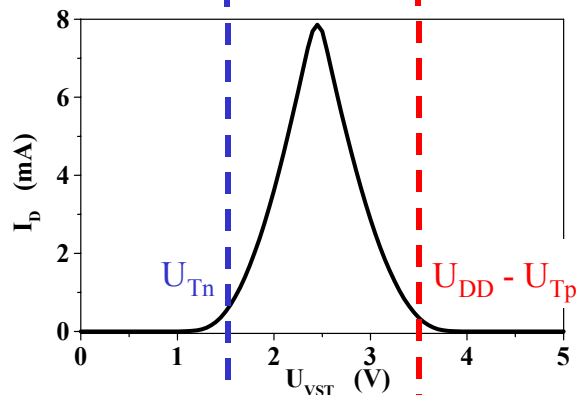
Complementary MOSFET - CMOS

PŘEVODNÍ



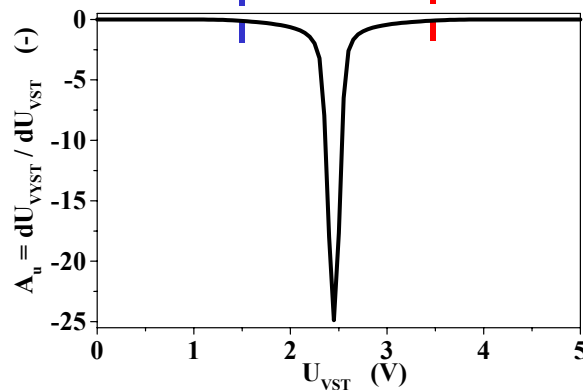
⇐ INVERTOR

ODBĚR



⇐ ODBĚR PROUDU POUZE
PŘI PŘEKLÁPĚNÍ VÝSTUPU!!!
⇒ NÍZKÁ SPOTŘEBA

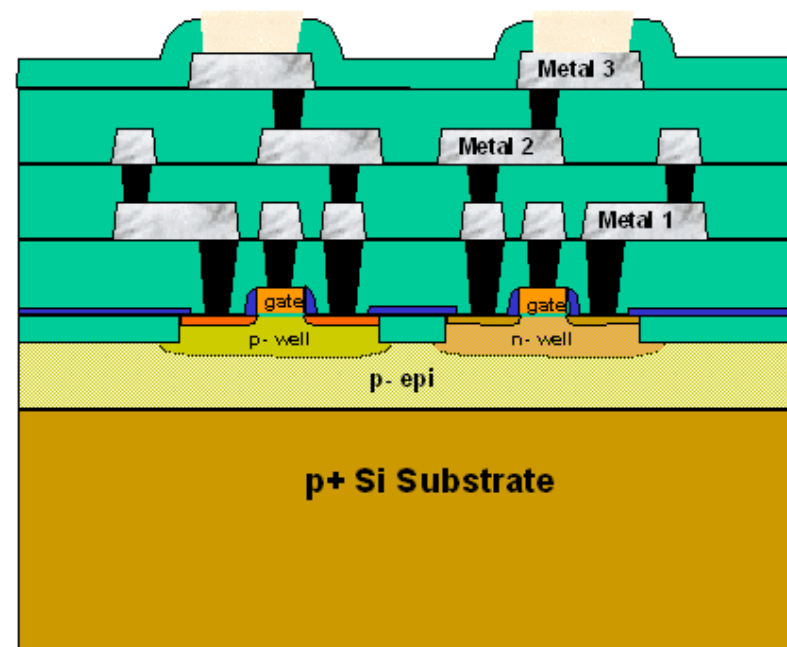
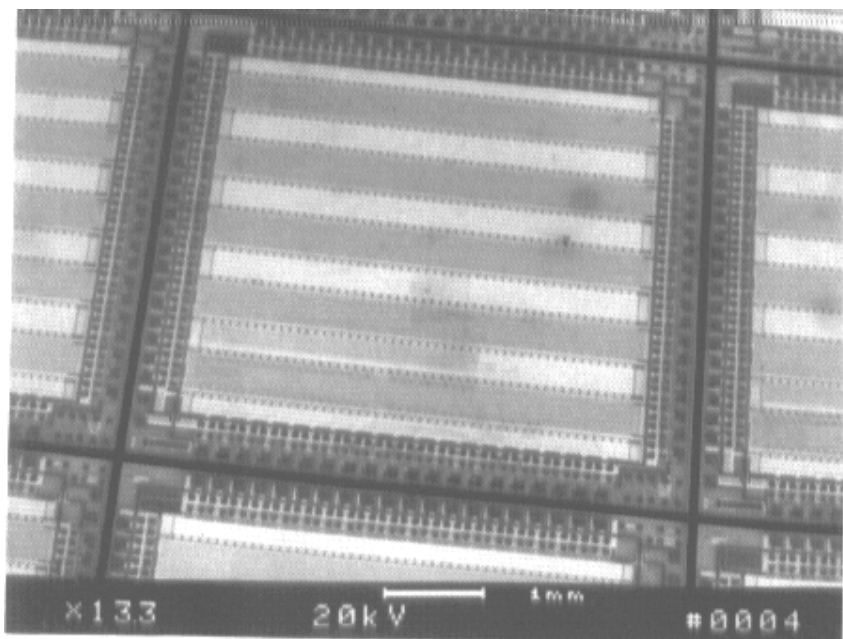
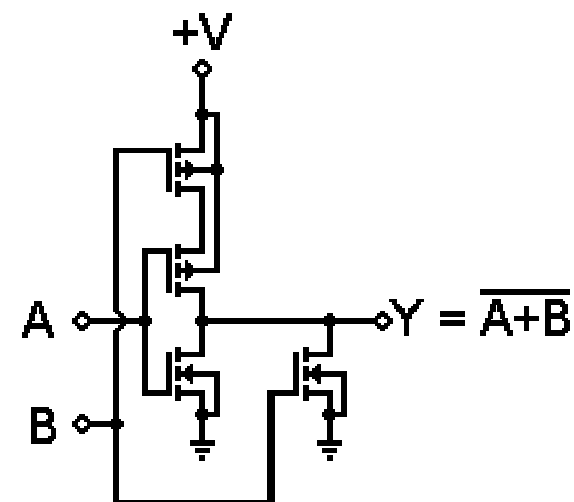
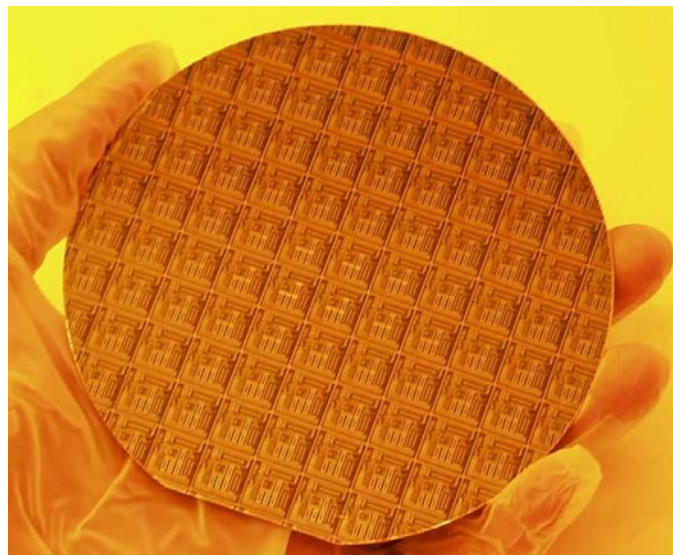
ZESÍLENÍ



⇐ VELKÉ ZESÍLENÍ
PŘI PŘEKLÁPĚNÍ VÝSTUPU
⇒ RYCHLÝ PŘECHOD
z H do L a z L do H

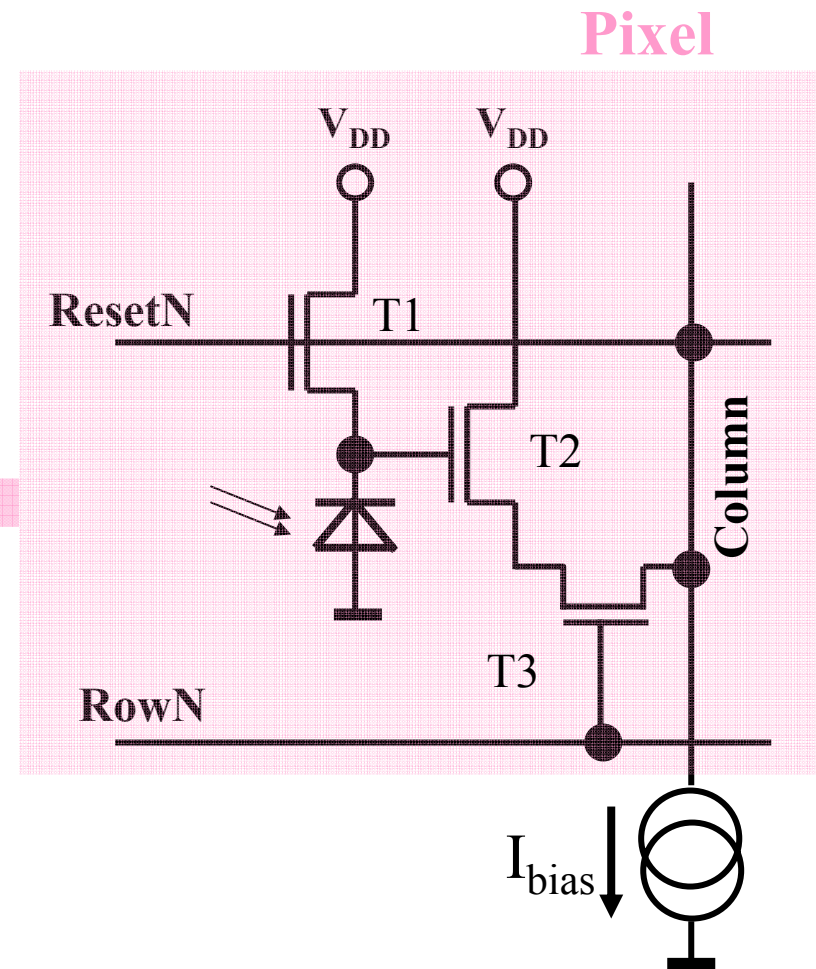
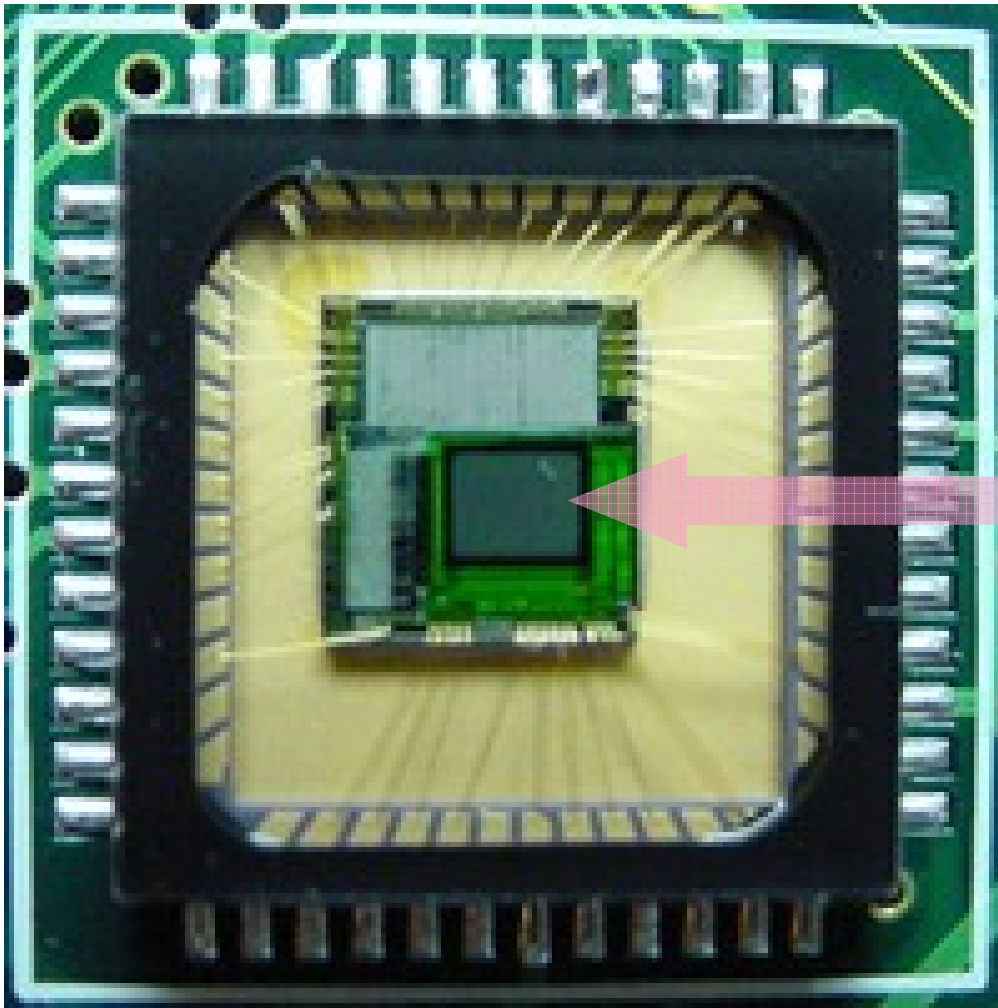
APLIKACE CMOS

Číslicové obvody



APLIKACE CMOS: APS (Active Pixel Sensor)

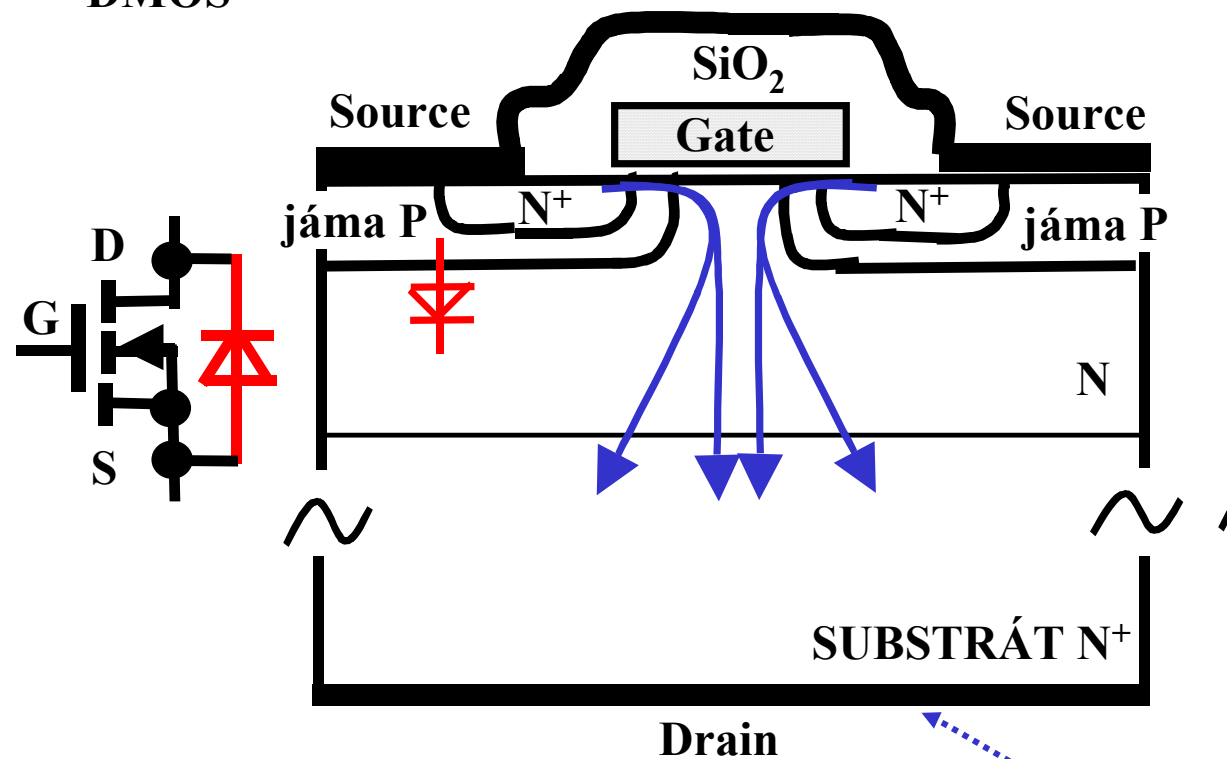
Číslicové obvody + matice fotodiod (kamera)



VÝKONOVÝ MOSFET (diskrétní)

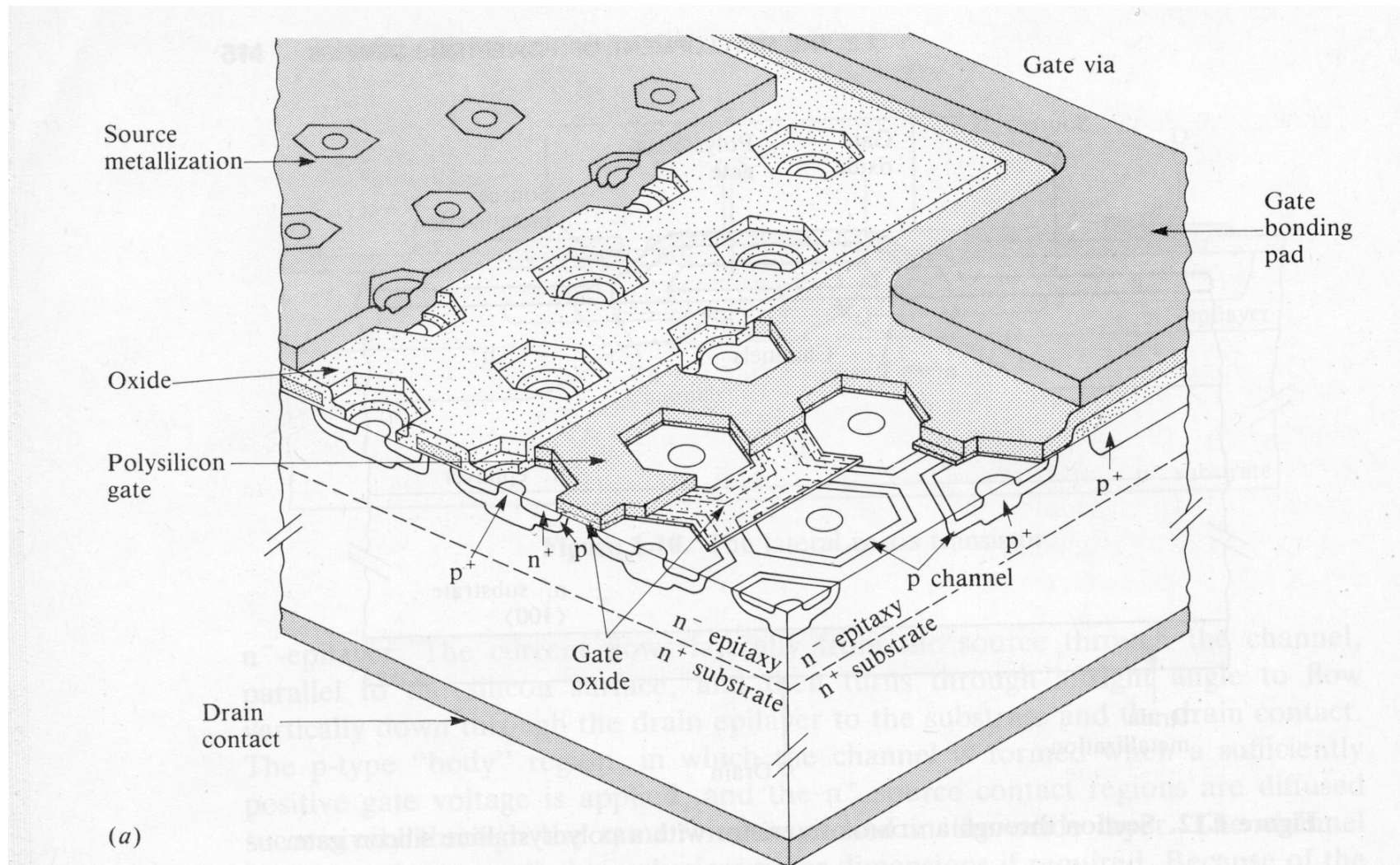
Vysokého průrazného napětí U_{BRDSS} (až 800V) se dosáhne umístěním drainu na opačnou stranu Si destičky.

DMOS



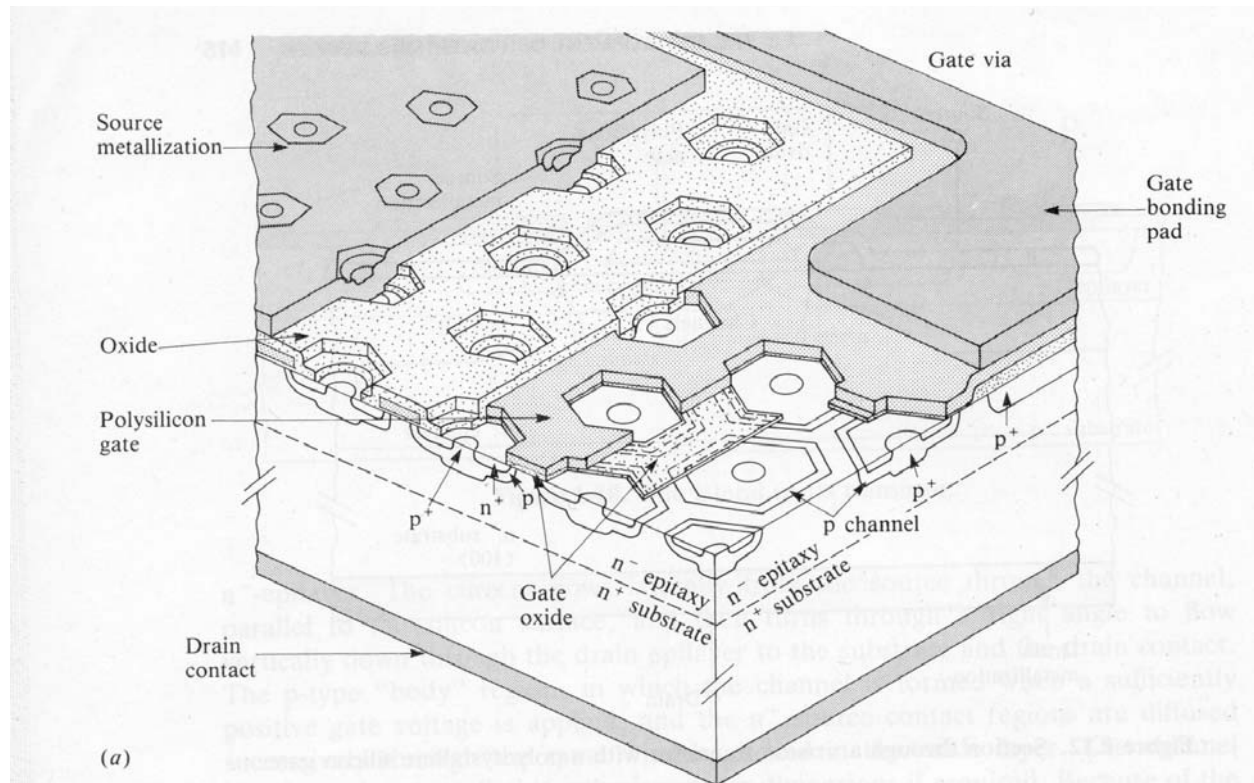
VÝKONOVÝ MOSFET (diskrétní)

Vysoké mezní hodnoty $I_{D\text{MAX}}$ (až 25 A) při zachování malé hodnoty $R_{\text{DS(ON)}}$ se dosáhne paralelním spojením 10^4 až 10^6 buněk .



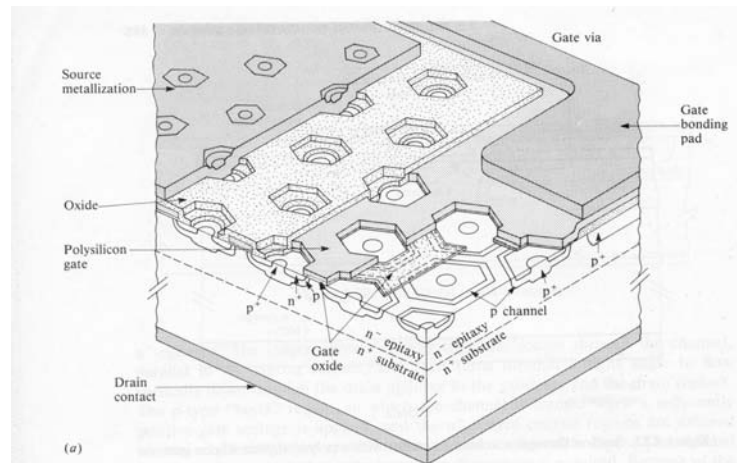
VÝKONOVÝ MOSFET (diskrétní)

Vysoké mezní hodnoty I_{DMAX} (až 25 A) při zachování malé hodnoty $R_{\text{DS(on)}}$ se dosáhne paralelním spojením 10^4 až 10^6 buněk .

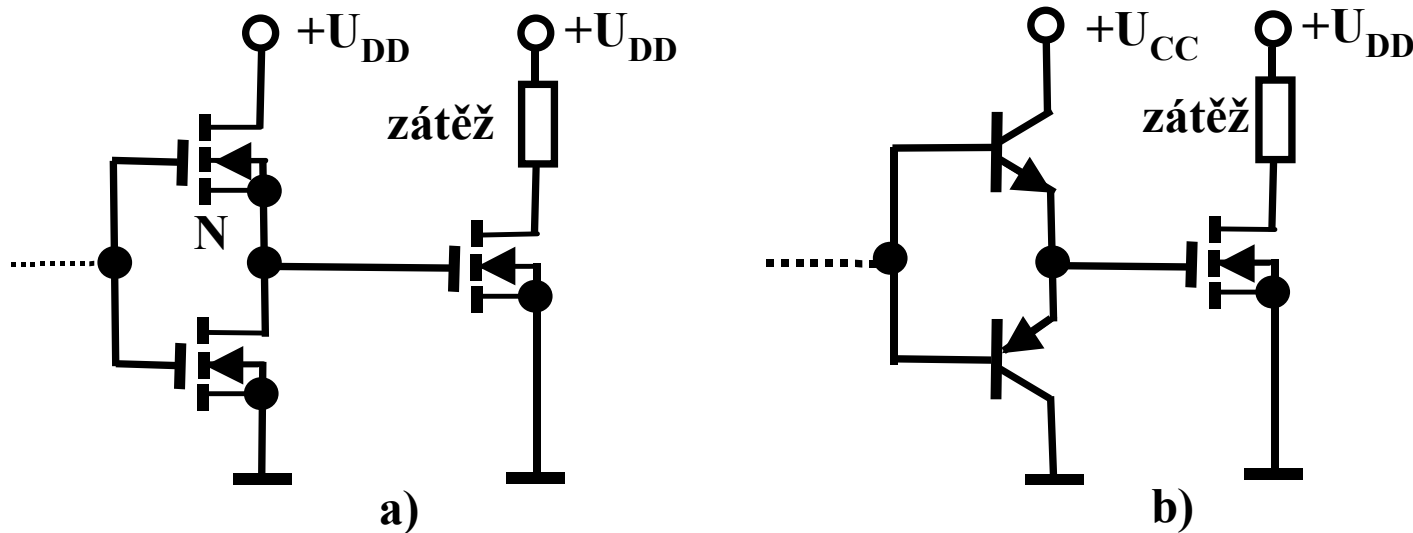


Důsledek: vysoká vstupní kapacita – jednotky nF !!!
DMOS musíme spínat z tvrdého zdroje napětí nebo proudu.

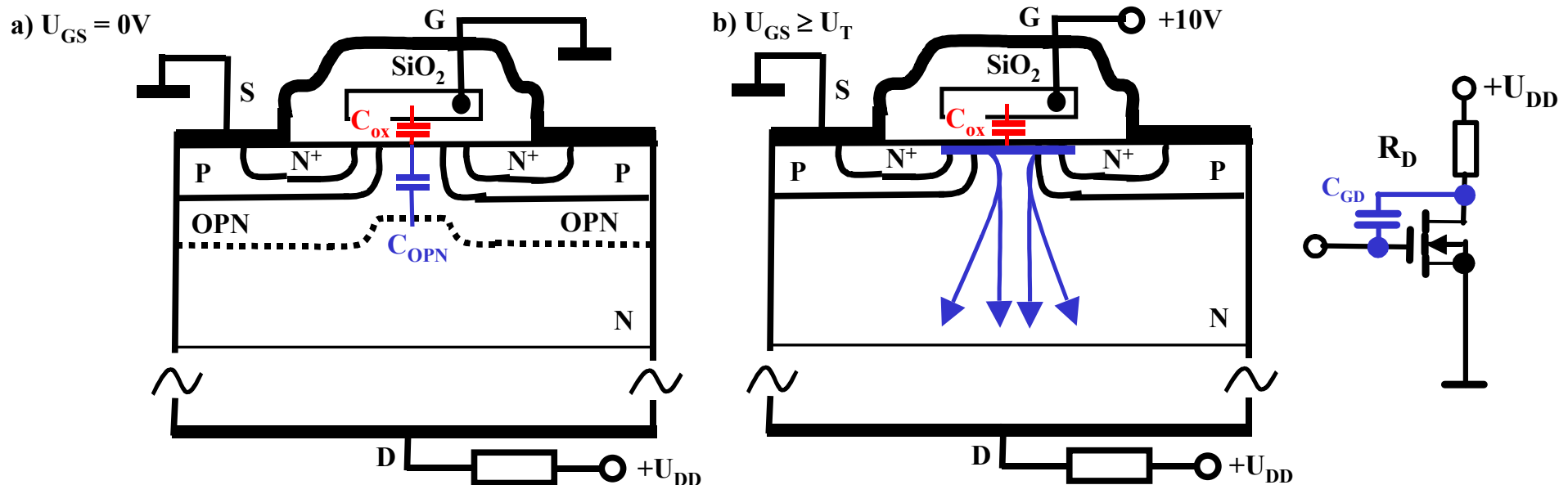
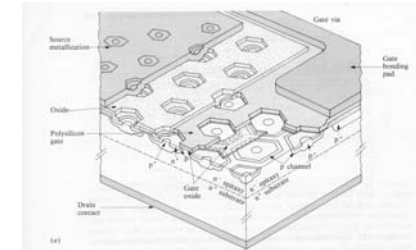
VÝKONOVÝ MOSFET (diskrétní)



Důsledek: vysoká vstupní kapacita – jednotky nF !!!
DMOS musíme spínat z tvrdého zdroje napětí nebo proudu.



VÝKONOVÝ MOSFET (diskrétní)



C_{GD} se při spínání projevuje jako Millerova kapacita (SE).

Parazitní kapacita C_{GD} se při indukci kanálu zvětší o řád !!!

⇒ velká časová prodleva při spínání daná nabíjením C_{GD}

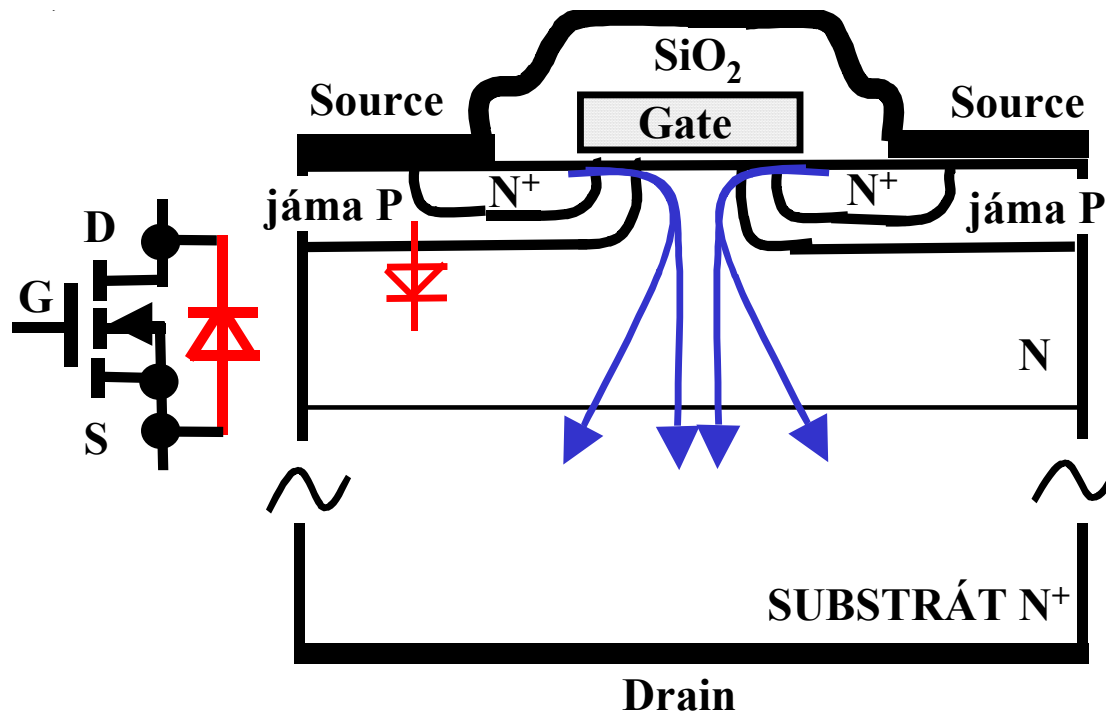
DMOS musíme spínat z tvrdého zdroje napětí nebo zdroje proudu.

VÝKONOVÝ MOSFET

Double Diffused MOS = DMOS

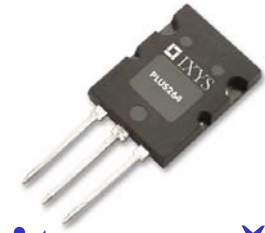


Dvojitá difúze umožní vytvořit jámu P, ve které se indukuje kanál \Rightarrow existence **body diode**.



Body dioda se musí při vypínání zotavit \Rightarrow nastavení *dead time* u budičů.

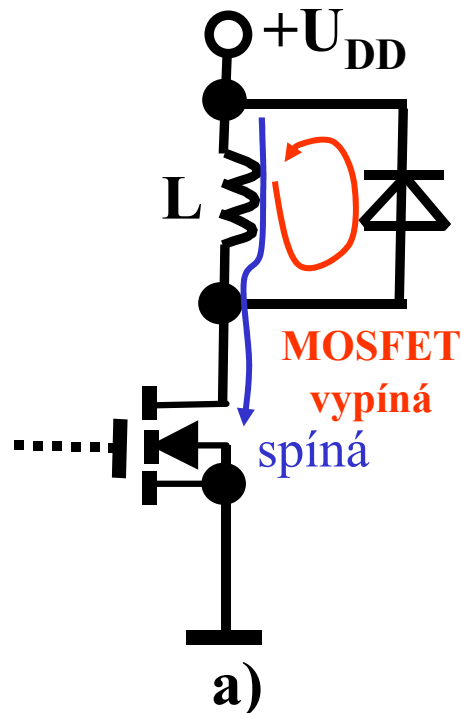
VÝKONOVÝ MOSFET



Vypínání indukivní zátěže – ochrana proti překmitu napětí

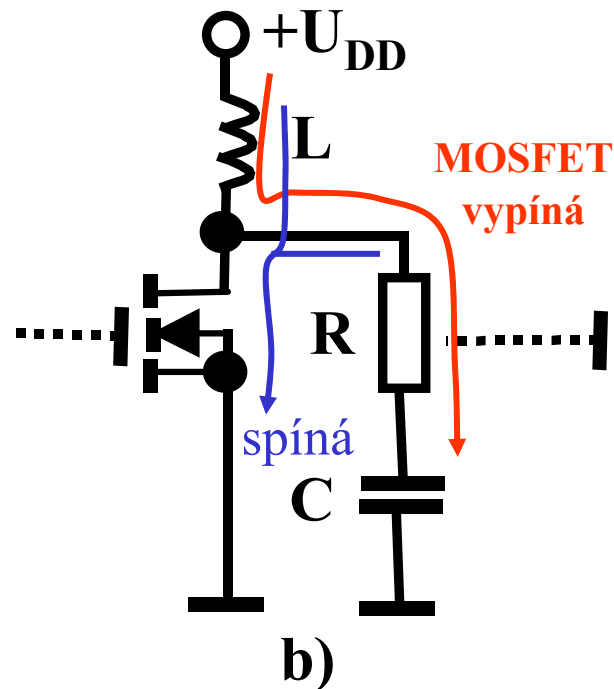
Ochrana pomocí Free Wheeling Diode

Dioda omezuje napětí
indukované při přepnutí



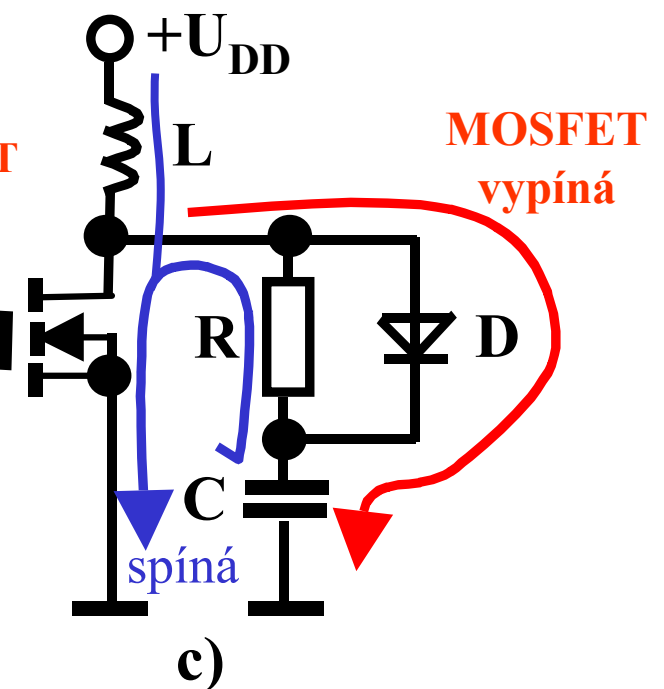
Ochrana pomocí RC článku

RC článek omezuje rychlost
nárůstu napětí



RCD ochrana (Snubber)

Kapacitor omezuje rychlost
nárůstu napětí (nabíjení přes D,
vybíjení přes R)



VÝKONOVÝ MOSFET Aplikace



DIE CASTING

