

# ELEKTRONIKA

Viera Stopjaková ([viera.stopjakova@stuba.sk](mailto:viera.stopjakova@stuba.sk))

Ústav elektroniky a fotoniky

FEI STU



# TRANZISTORY

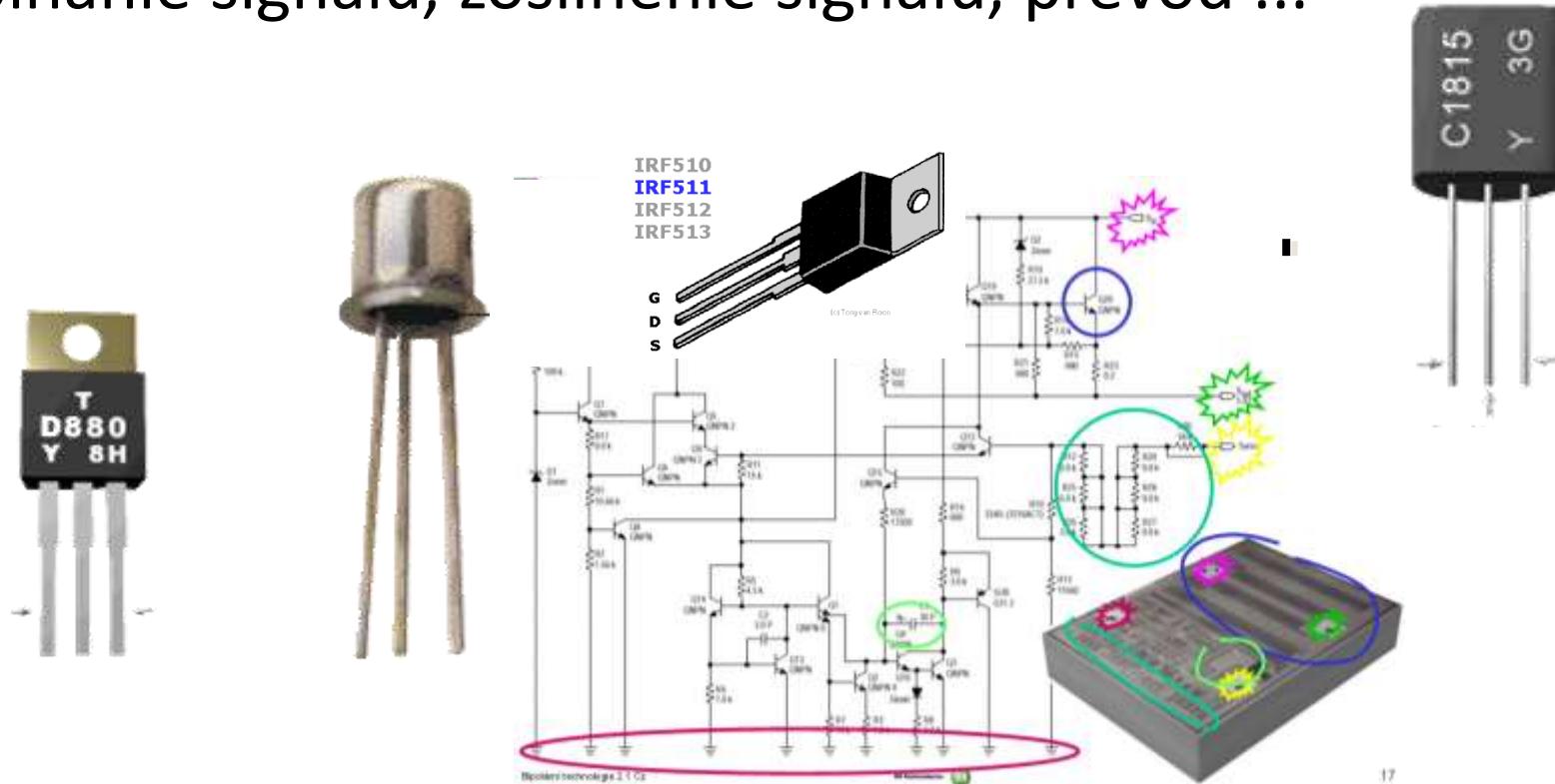
Prednáška

3

# Tranzistory

- 3(4)-elektródový polovodičový aktívny prvok

Použitie: spínanie signálu, zosilnenie signálu, prevod ...



# Rozdelenie tranzistorov

## ■ Bipolárne tranzistory (BJT)

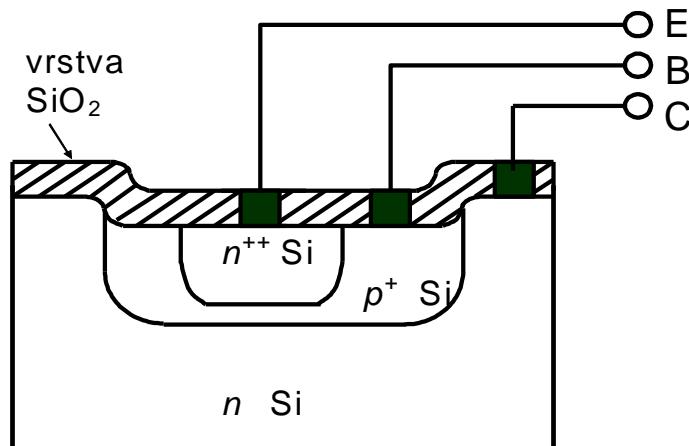
- pracujú na princípe injekcie a extrakcie voľných nosičov náboja v polovodiči (*BJT – Bipolar Junction Transistor*)
- na činnosti sa podieľajú oba typy nosičov náboja: **elektróny aj diery**

## ■ Unipolárne tranzistory (FET)

- pracujú na princípe zmeny elektrickej vodivosti kanála pomocou priečného elektrického poľa (*FET – Field Effect Transistor*)
- na činnosti sa podieľa len jeden typ náboja
  - iba elektróny alebo iba diery

# Bipolárny tranzistor

Tvoria ho 3 oblasti rôzneho typu vodivosti usporiadane za sebou v jednom monokryštáli polovodiča (npn, pnp)



## Krajné oblasti/elektródy – emitor a kolektor

nie sú navzájom prepojené

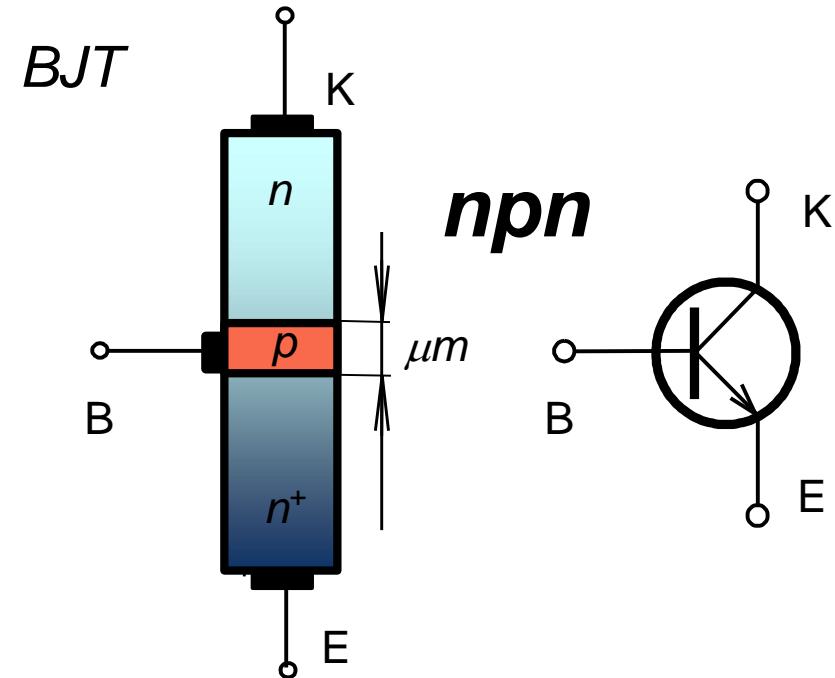
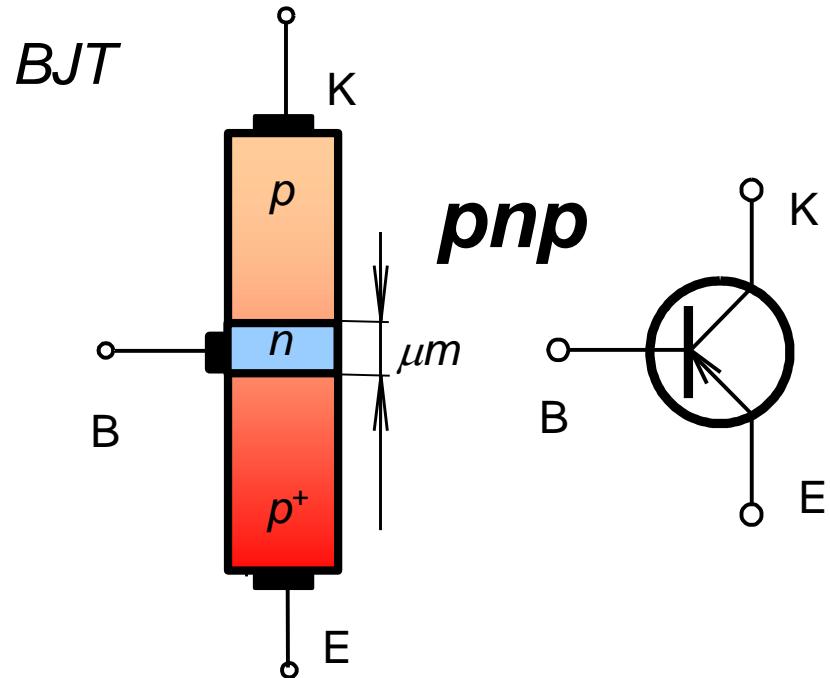
- sú rovnakého typu vodivosti
- emitor je **najvyššie (n++) dopovaná** a kolektor **najnižšie dopovaná** oblasť BJT

## Stredná oblasť/elektróda – báza

je veľmi tenká, rádovo 1 μm

- vysoko dopovaná

# Typy bipolárneho tranzistora



Prierez štruktúry a schematické značky BT typu

a) **pnp**

b) **npn**

# Princíp činnosti BJT

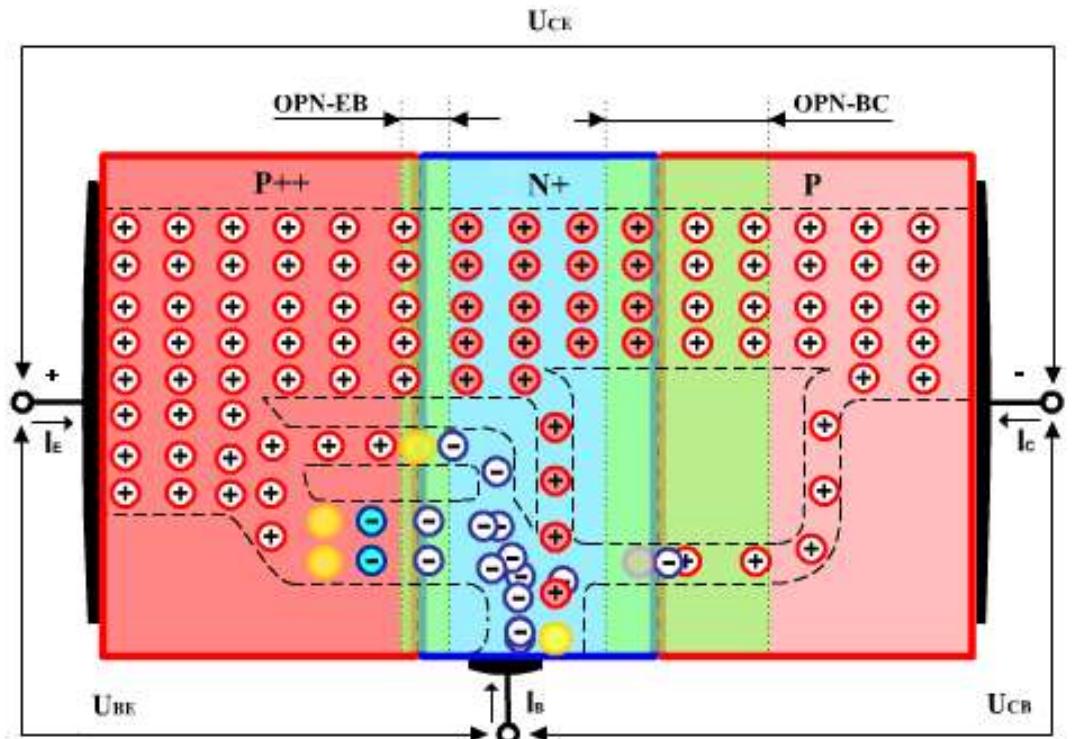
## Princíp činnosti

- **E-B priepustne polarizovaný PN**
  - Nosiče sú injektované z emitora do bázy
- **K-B záverne polarizovaný PN**
  - Iba malý počet nosičov rekombinuje v oblasti bázy, ale väčšina nosičov je “vyťahovaná” elektrickým poľom do kolektora

Prúd emitora sa rovná súčtu prúdov  
kolektora a bázy



$$I_E = I_C + I_B$$



- - majoritný elektrón
- - minoritný elektrón
- - rekombinácia
- - majoritná diera
- - minoritná diera
- - generácia

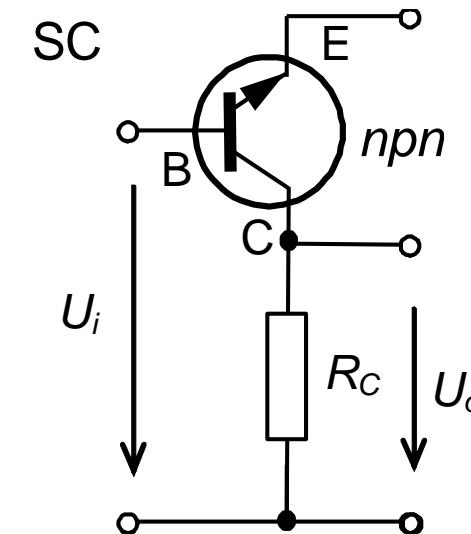
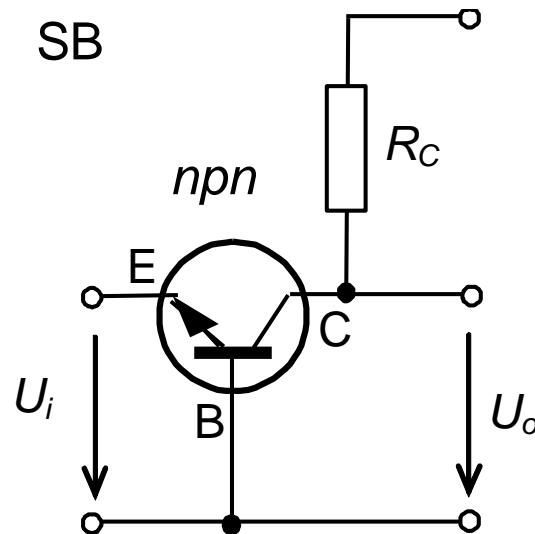
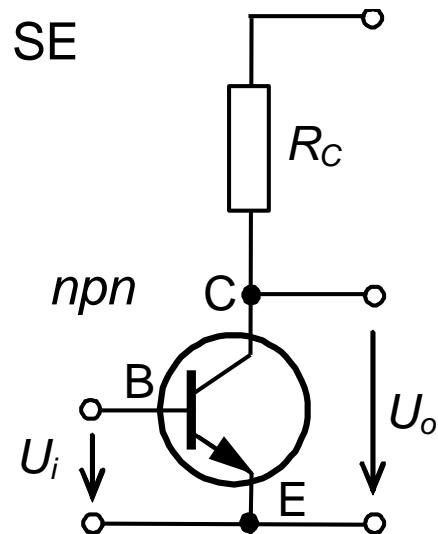
# Režimy činnosti BJT

## ■ 4 režimy činnosti

- **Nevodivý režim** – oba *pn* priechody sú polarizované záverne.  
Tranzistorom prechádzajú len zvyškové zväčša **zanedbateľné** prúdy.
- **Nasýtený režim** – oba *pn* priechody sú polarizované priepustne.  
Tranzistorom prechádzajú pomerne **veľké konštantné** prúdy  
(saturovaný stav, saturácia).
- **Aktívny režim** – B-E *pn* priechod je zapojený priepustne a B-K záverne.  
Je to **pracovné zapojenie**, tranzistorom tečú pracovné prúdy.
- **Inverzný režim** – B-E *pn* priechod je polarizovaný záverne a B-K priepustne.  
Funkcie emitorového a kolektorového obvodu sú zamenené.

# Základné zapojenia BJT

- Tri možné spôsoby
  - podľa toho, ktorá elektróda je spoločná pre vstup aj výstup.



Zapojenie so spoločným emitorom najviac je používané v praxi

# Prúdový zosilňovací činitel' $\alpha$ a $\beta$

## ■ Prúdový zosilňovací činitel' $\alpha$

- Definovaný pri zapojení SB

$$\alpha = \frac{I_C}{I_E}$$

V praxi sa pohybuje okolo 1 (0,98 až 0,99)

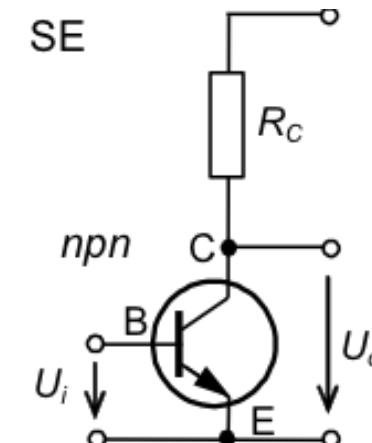
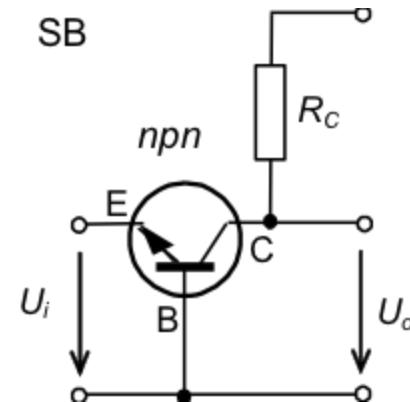
## ■ Prúdový zosilňovací činitel' $\beta$

- Definovaný pri zapojení SE

$$\beta = \frac{I_C}{I_B}$$

V praxi sa pohybuje okolo 10 až 1000

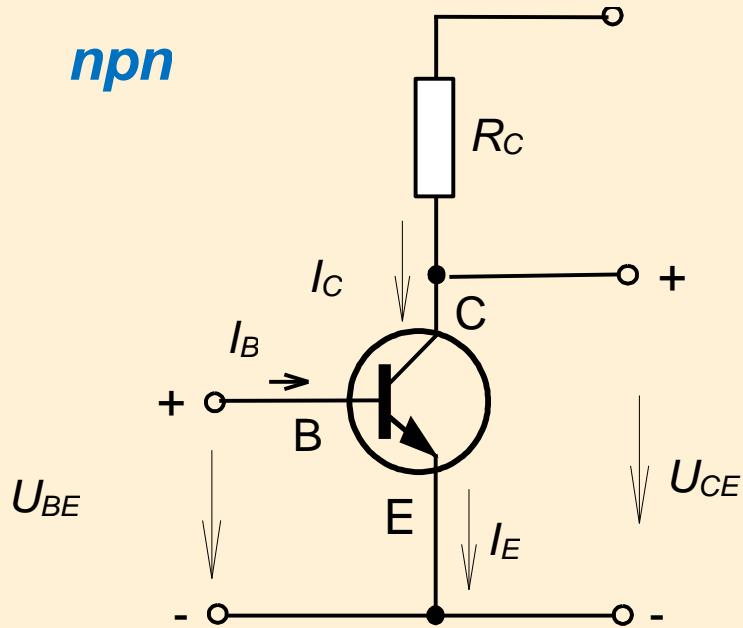
V praxi využívané ako **zosilňova**



# V-A charakteristiky BJT

- Bipolárny tranzistor v zapojení SE

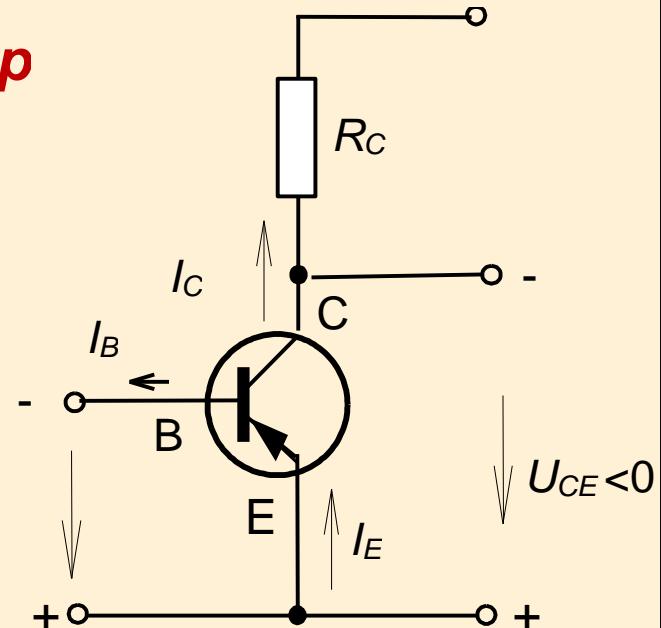
*npn*



$U_{BE}$

BJT typu *npn*

*pnp*



$U_{BE} < 0$

BJT typu *pnp*

Schémy zapojenia  
+ polarizácia

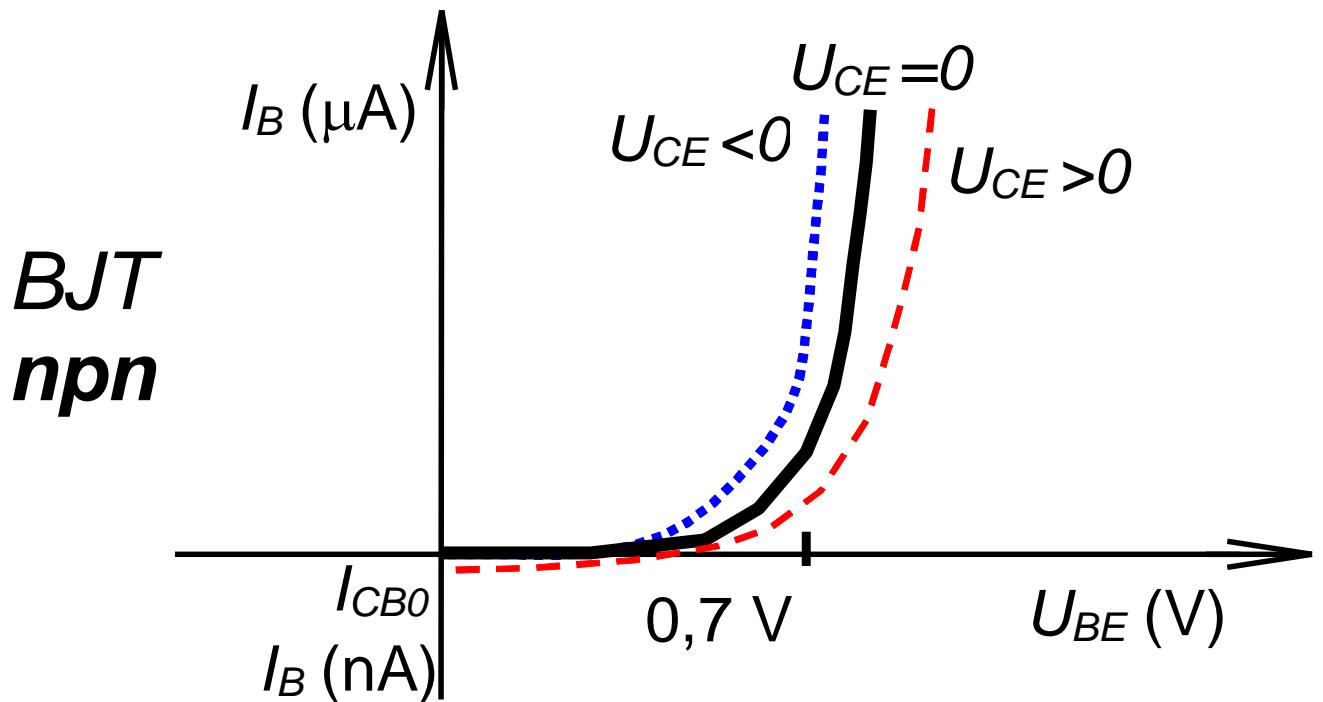
# V-A charakteristiky BJT

- Vstupná V-A charakteristika

$$I_B = f(U_{BE}) \mid U_{CE} = \text{konst.}$$



V-A charakteristika  
prechodu E-B

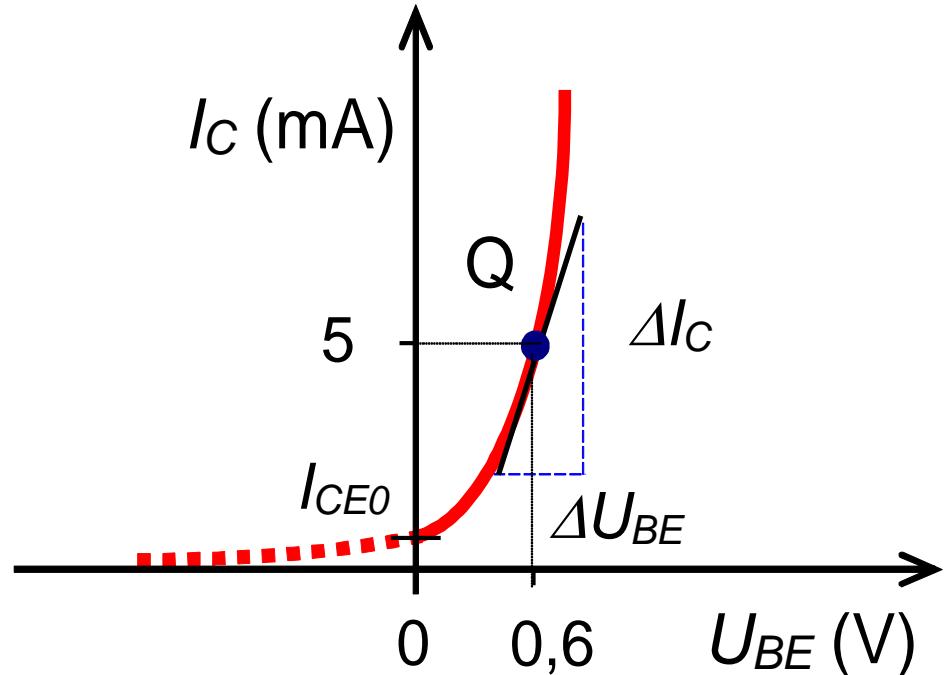


# V-A charakteristiky BJT

## Prevodové V-A charakteristiky

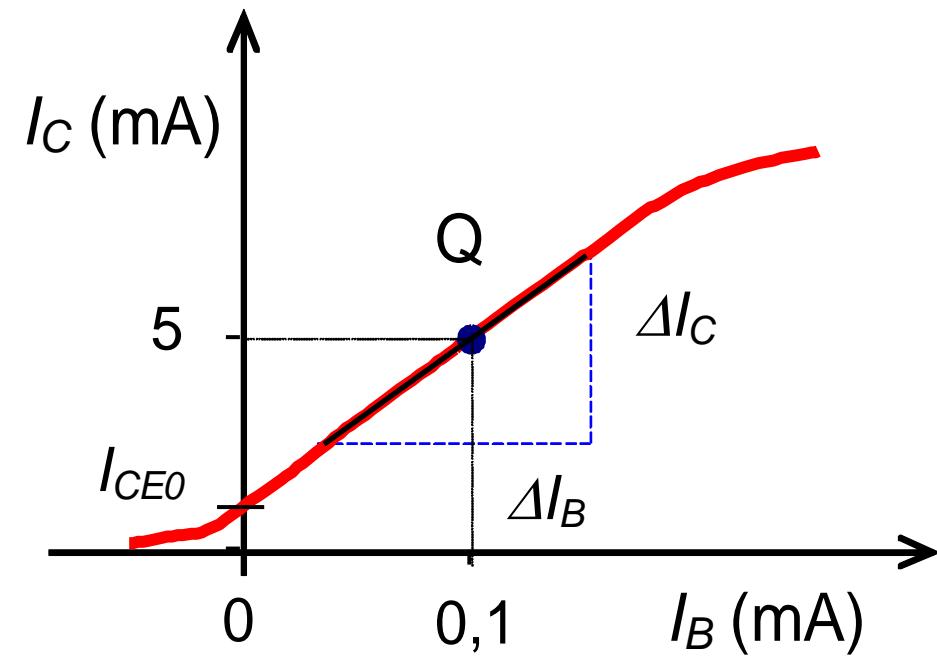
Napäťová prevodová V-A charakteristika

$$I_C = f(U_{BE}) \mid U_{CE} = \text{konst.}$$



Prúdová prevodová V-A charakteristika

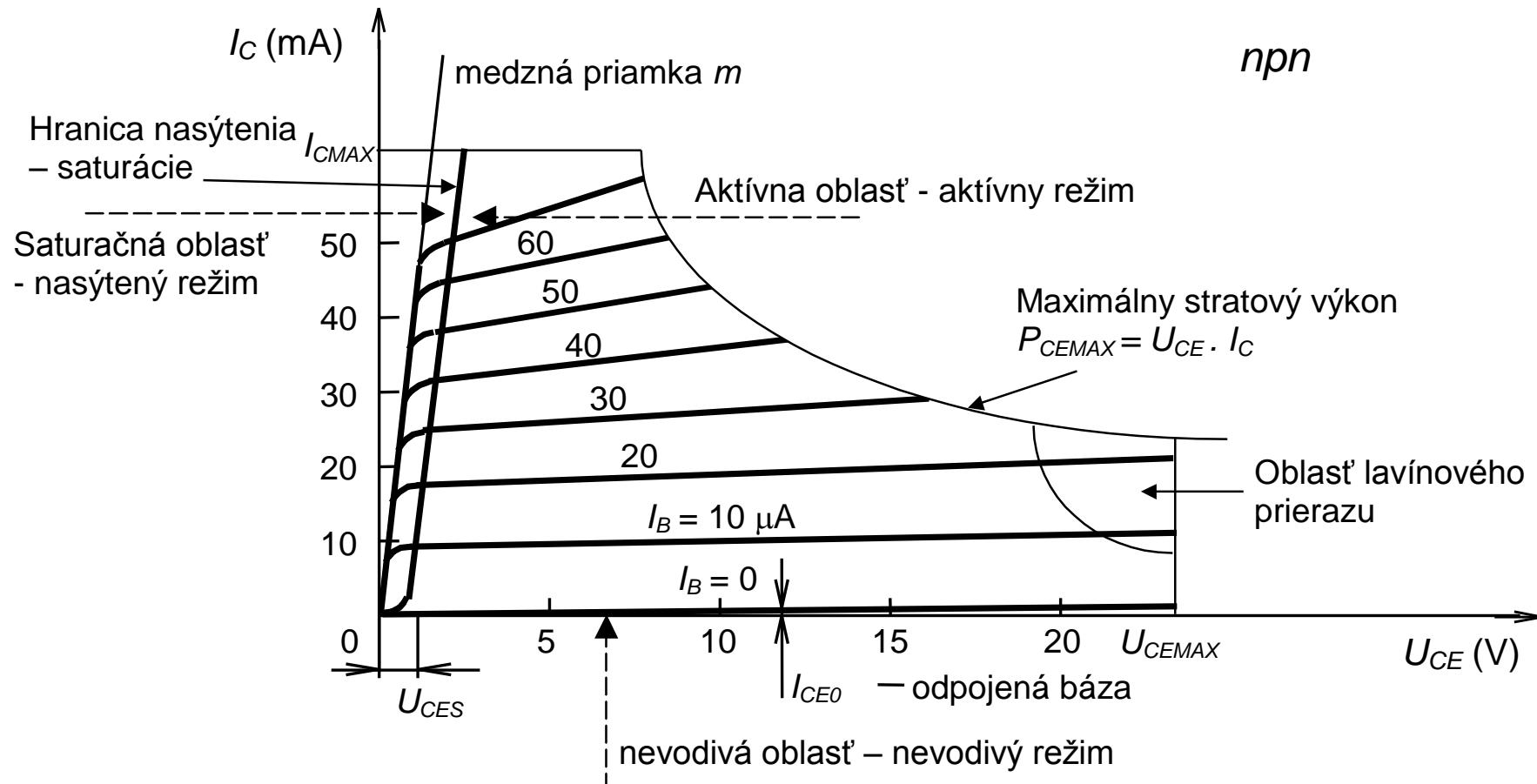
$$I_C = f(I_B) \mid U_{CE} = \text{konst.}$$



# V-A charakteristiky BJT

Výstupné V-A charakteristiky

$$I_C = f(U_{CE}) \mid I_B = \text{konst.}$$



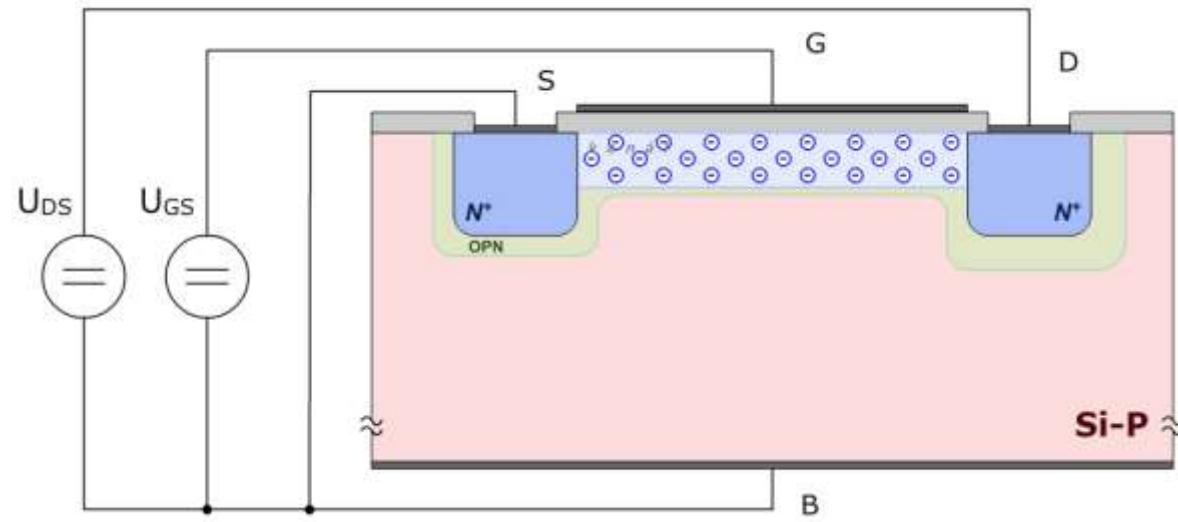
# Unipolárny tranzistor - FET

## ■ *Field Effect Transistor* (Tranzistor riadený EP)

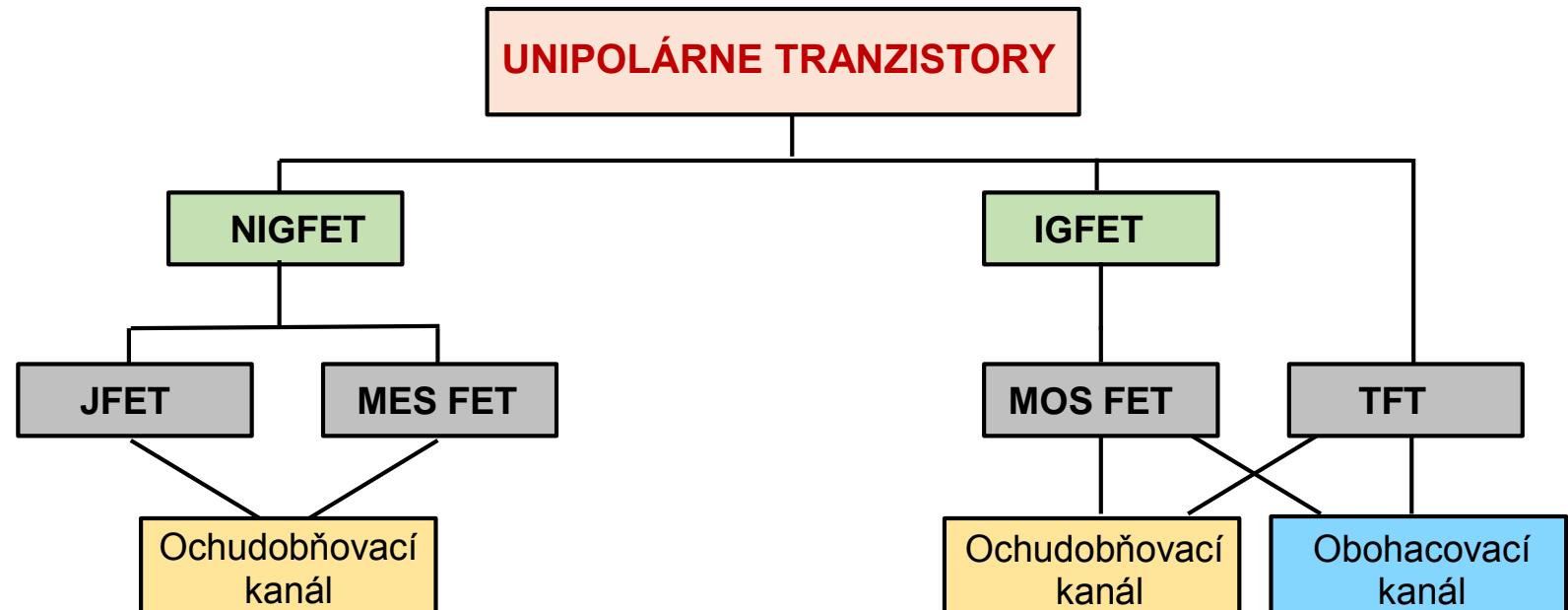
Polovodičová súčiastka využívajúca **vplyv priečneho elektrického poľa** na prechod prúdu polovodičom

### ○ 4 elektródy (v diskrétnnej forme vyvedené iba 3)

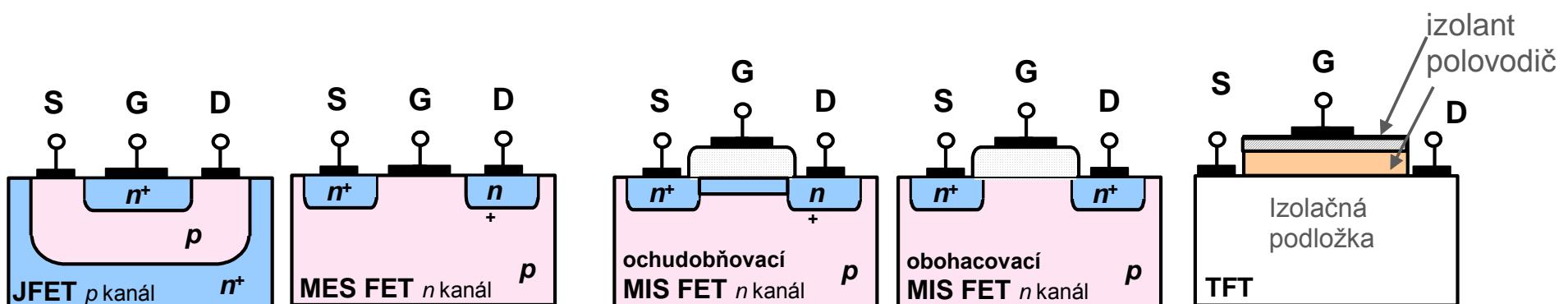
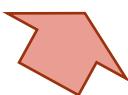
- Hradlo (*Gate*)
- Emitor (*Source*)
- Kolektor (*Drain*)
- Substrát (*Bulk/Body*)



# Unipolárne tranzistory - rozdelenie



MOS FET  
najčastejšie  
využívaný v IO

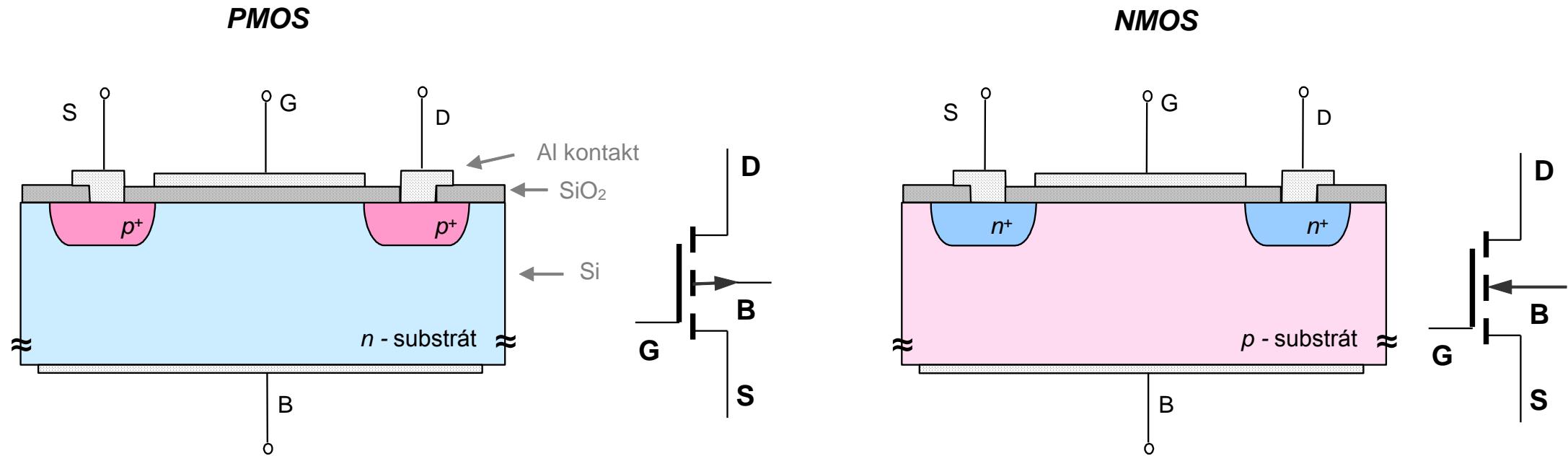


# MOS FET tranzistor

- **MOS FET (*Metal-Oxid-Semiconductor Field Effect Transistor*)**
  - FET s hradlom izolovaným od kanála izolačnou vrstvou **oxidu** (napr.  $\text{SiO}_2$ )
- **Typy MOS FET podľa štruktúry**
  - **s indukovaným kanálom (obohacovací typ)**
  - **so zabudovaným kanálom (ochudobňovací typ)**
- **Typy MOS FET podľa vodivosti kanála**
  - N-kanál
  - P-kanál
- Používajú sa v digitálnych IO s vysokou hustotou integrácie
  - procesory
  - pamäte
  - podporné IO

# MOS FET s indukovaným kanálom

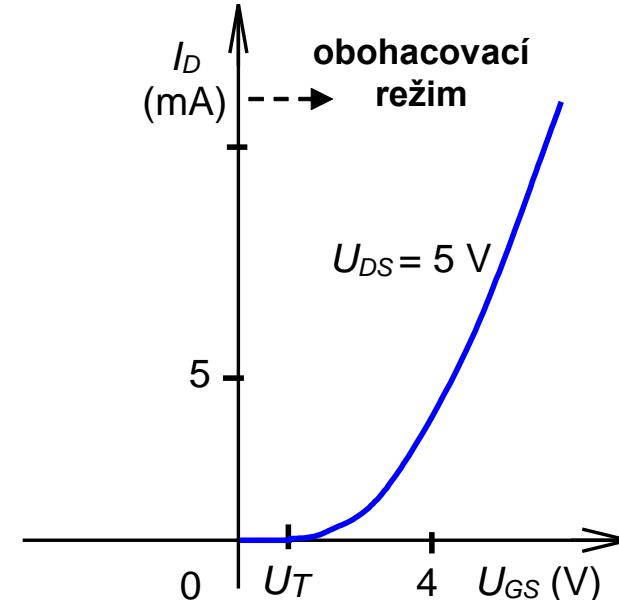
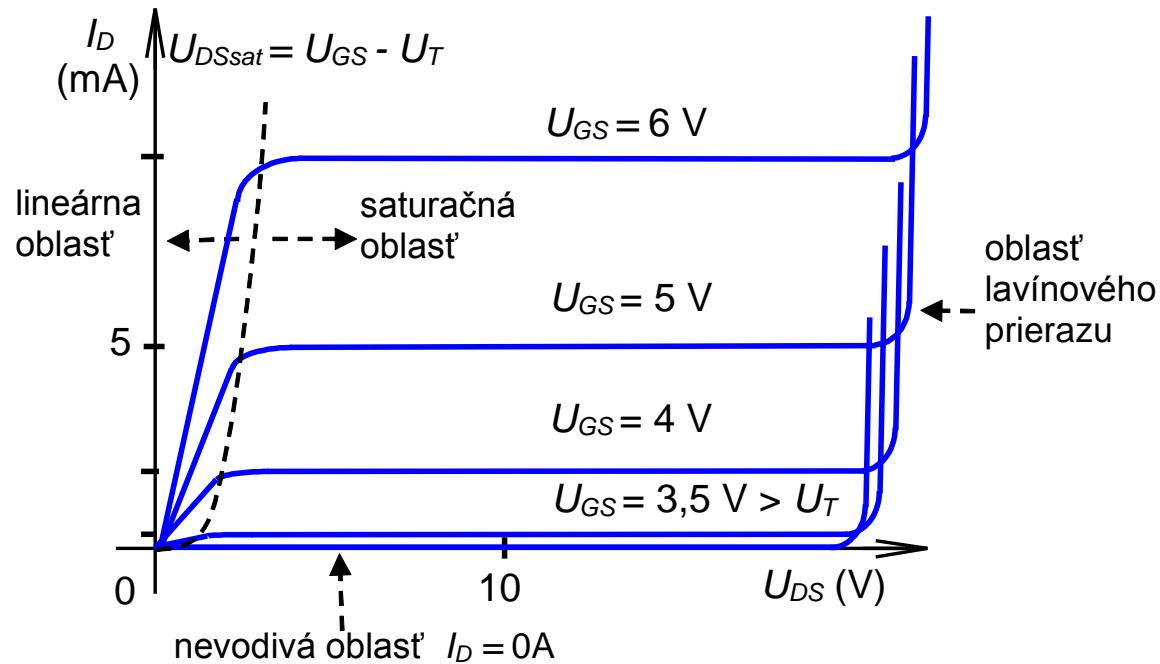
- Na hradlo musí byť pripojené napätie, aby sa **vytvoril kanál** v podpovrchovej oblasti polovodiča a mohol **tieciť prúd** medzi kolektorom a emitorom



Pripojením napäcia  $U_{GS}$  sa vytvorí vodivý kanál  
medzi emitorom a kolektorom

# V-A charakteristiky MOS FET

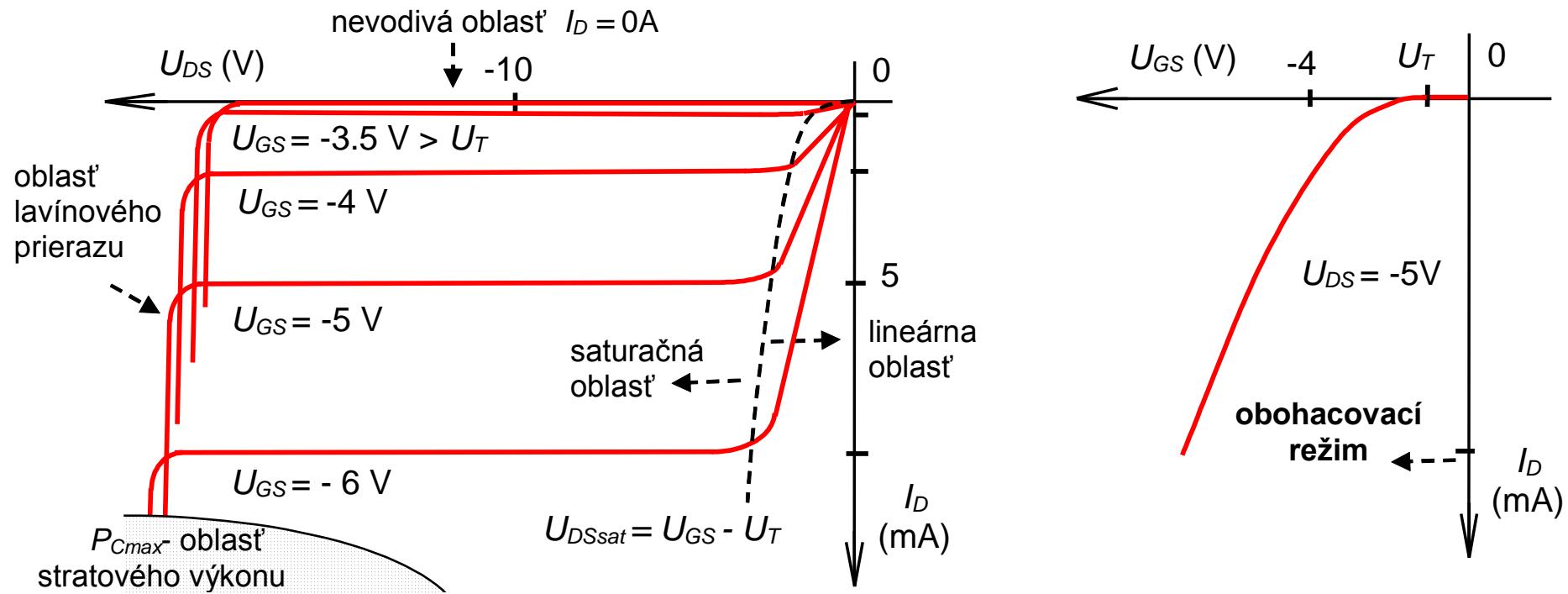
- Výstupné a prevodové V-A charakteristiky NMOS s indukovaným kanálom



Tvorba kanála - inverzia povrchu pod hradlom  
Väčšie  $U_{GS}$ , vyššia koncentrácia elektrónov v kanáli

# V-A charakteristiky MOS FET

Výstupné a prevodové V-A charakteristiky PMOS s indukovaným kanálom



# Prahové napätie MOS FET

Prahové napätie  $U_T$  MOS tranzistora je minimálne napätie, ktoré je potrebné pripojiť medzi G a S, aby tranzistor bol zopnuty.



**NMOS: kladné  $U_T$  (+0,6 V)**

**PMOS: záporné  $U_T$  (-0,7 V)**

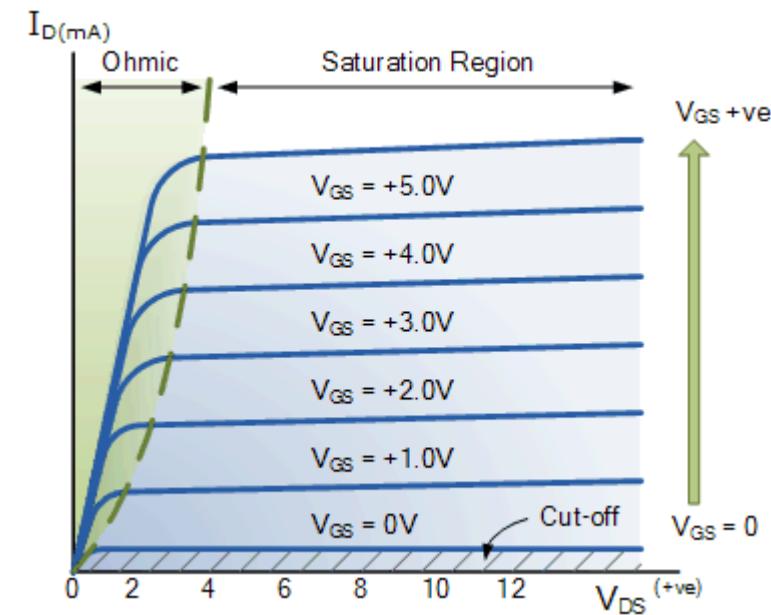
# Pracovné oblasti MOS FET

- 3 režimy určené napäťovými podmienkami ( $U_{GS}$ ,  $U_{DS}$ )
- Dôležité je prahové napätie  $U_T$

## 1. Nevodivý režim

- Napäťová podmienka:  $U_{GS} - U_T \leq 0$
- Tranzistor je vypnutý  $\rightarrow I_D = 0$

UGS – napätie na hradle  
 $U_T$  - prahové napätie (Threshold voltage)



# Pracovné oblasti MOS FET

## 2. Lineárny režim

- Pre malé hodnoty  $U_{DS}$  tranzistor je v tzv. **lineárnom režime**
- Napäťová podmienka:  $0 < U_{GS} - U_T \geq U_{DS}$

$$I_{DS} = \frac{\mu_n C_{ox} W}{L} \cdot (U_{GS} - U_T) U_{DS}$$

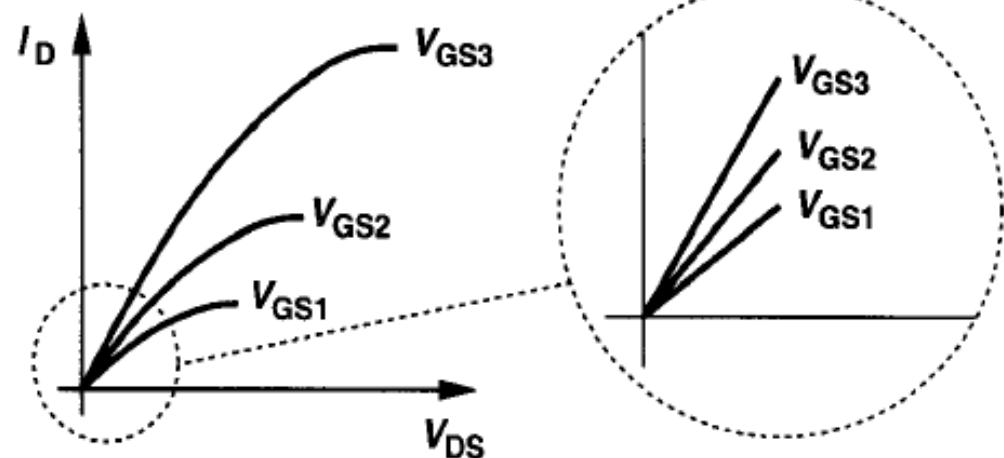
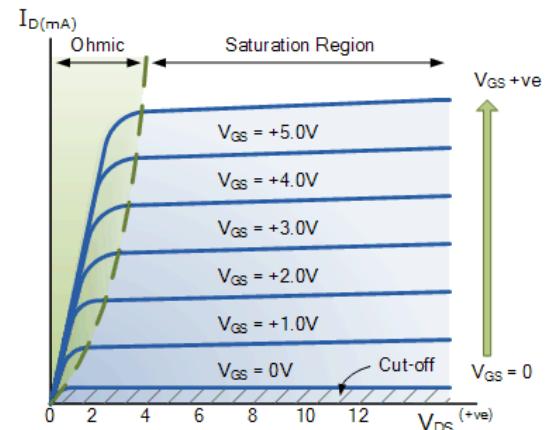
$\mu_n$  – pohyblivosť nosičov náboja

$C_{ox}$  – kapacita oxidu na jednotku plochy

(používame  $\rightarrow K_p = \mu_n C_{ox}$ ,  $K_p$  technologický parameter)

$W$  – šírka kanála (MOS tranzistora)

$L$  – dĺžka kanála (MOS tranzistora)



V lineárnom režime MOS FET pracuje ako **rezistor alebo spína**

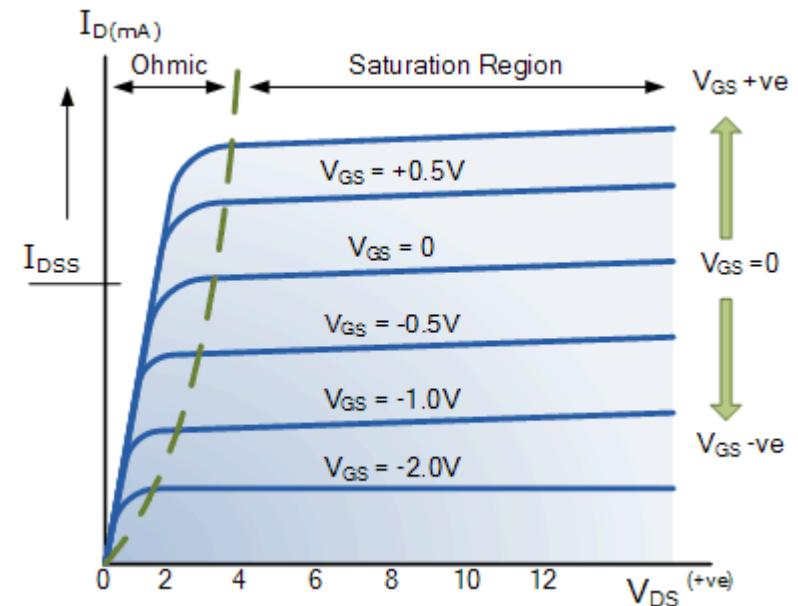
# Pracovné oblasti MOS tranzistora

## 3. Saturačný režim (saturácia)

- Pre veľké hodnoty  $U_{DS}$  tranzistor je v tzv. **saturačnom režime**
- Napäťová podmienka:  $U_{DS} > U_{GS} - U_T \geq 0$

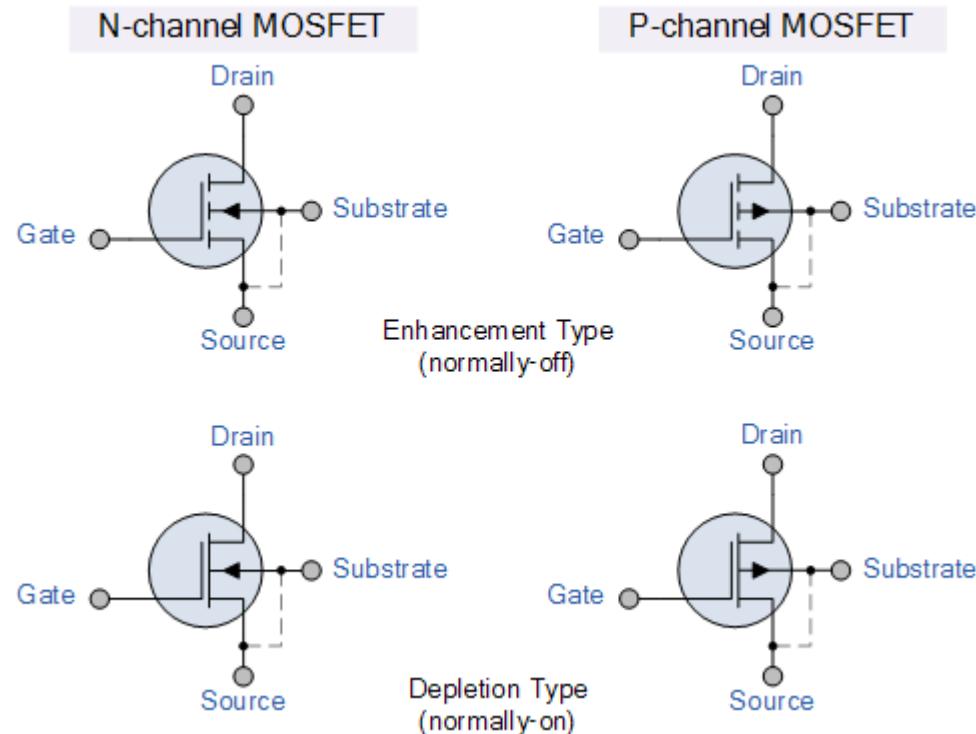


$$I_{DS} = \frac{\mu_n C_{ox} W}{2L} \cdot (U_{GS} - U_T)^2$$

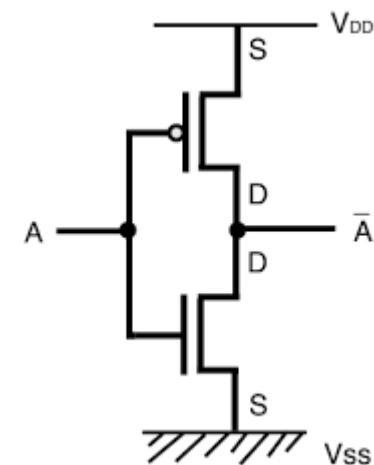


V saturačnom režime MOS FET pracuje ako **zdroj prúdu**

# Schématické symboly MOS FET



Symboly používané  
v digitálnych IO

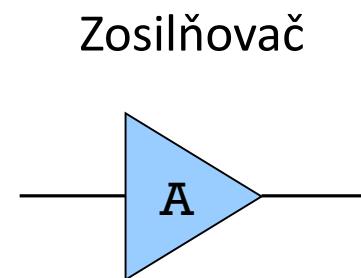


# Využitie MOS tranzistora

- Základná súčiastka analógových a digitálnych IO

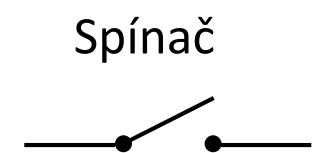
V analógových IO:

**MOS FET** sa najčastejšie využíva ako **ZOSILŇOVAČ**



V digitálnych IO:

**MOS FET** sa najčastejšie využíva ako **SPÍNAČ**



# MOS tranzistor ako spínač

- Najčastejšie využitie MOS tranzistora v číslicových IO

- **Požiadavky na spínač:**

- Malý odpor spínača v zopnutom stave –  $R_{ON}$
- Nízky úbytok napäťa v zopnutom stave –  $U_{DS}$
- Veľký odpor spínača vo vypnutom stave –  $R_{OFF}$

- Otázka: V ktorom režime bude pracovať MOS tranzistor ako spínač?

Odpoveď: v lineárnom režime

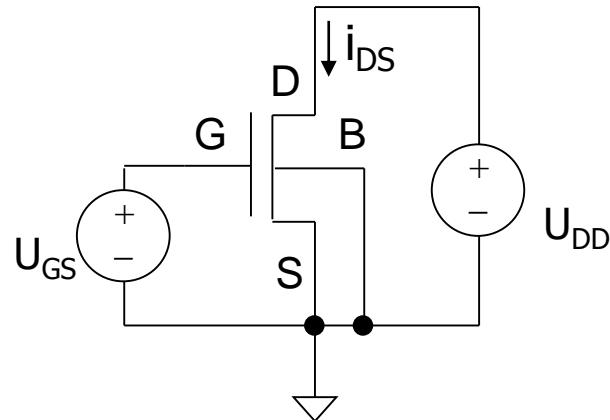
$$I_{DS} = \frac{\mu_n C_{ox} W}{L} \cdot (U_{GS} - U_T) U_{DS} \quad \rightarrow$$

$$R_{ON} = \frac{U_{DS}}{I_{DS}}$$

$$R_{ON} \sim \frac{L}{W}$$

# MOS tranzistor ako spínač

## ■ NMOS ako spínač

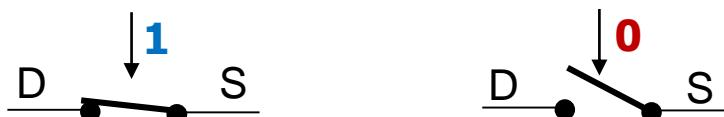


Predpoklad: MOS je ideálny spínač

$$R_{ON}=0 \text{ a } R_{OFF} \rightarrow \infty$$

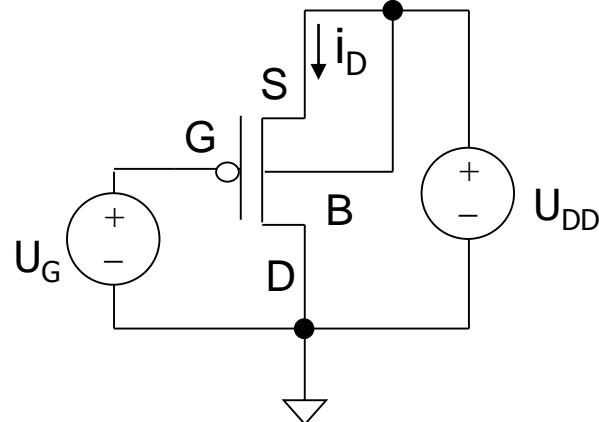
- Digitálne riadený NMOS snímač
  - D vyšší potenciál ako S
  - B na najnižšom potenciáli obvodu (GND)

ak  $U_{GS}=U_{DD}$  (log 1)  $\rightarrow i_{DS}>0$ ,    ak  $U_{GS}=0$  (log 0)  $\rightarrow i_{DS}=0$



# MOS tranzistor ako spínač

## ■ PMOS ako spínač



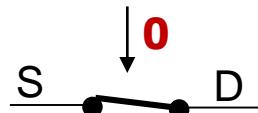
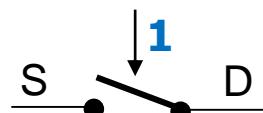
○ Digitálne riadený PMOS snímač

- S vyšší potenciál ako D
- B na najvyššom potenciáli obvodu (VDD)
- PMOS má záporné  $U_T$



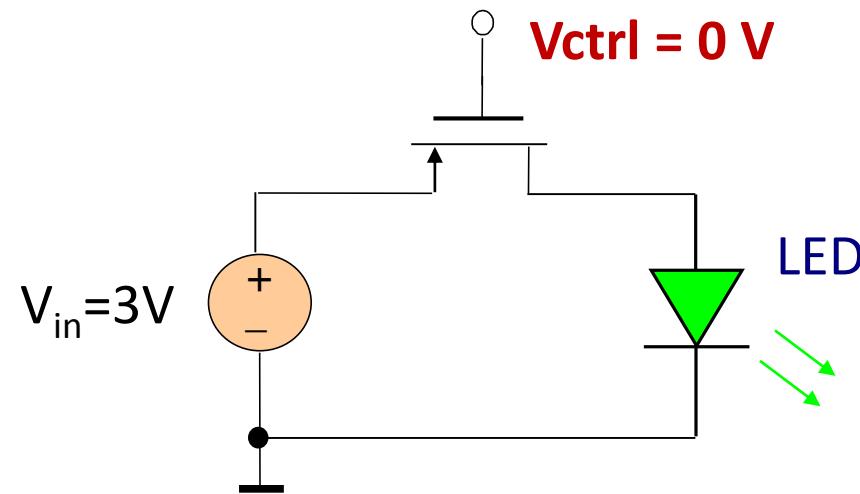
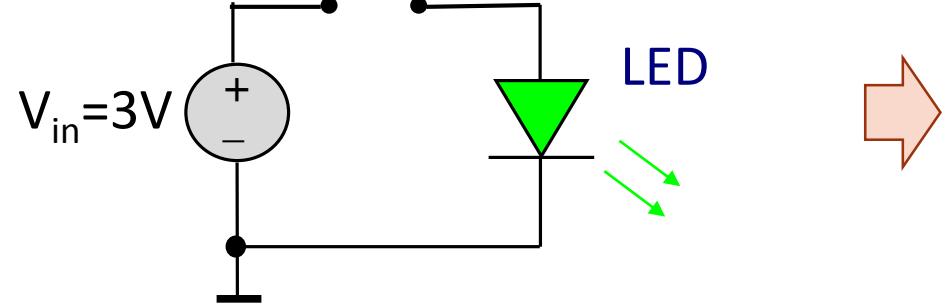
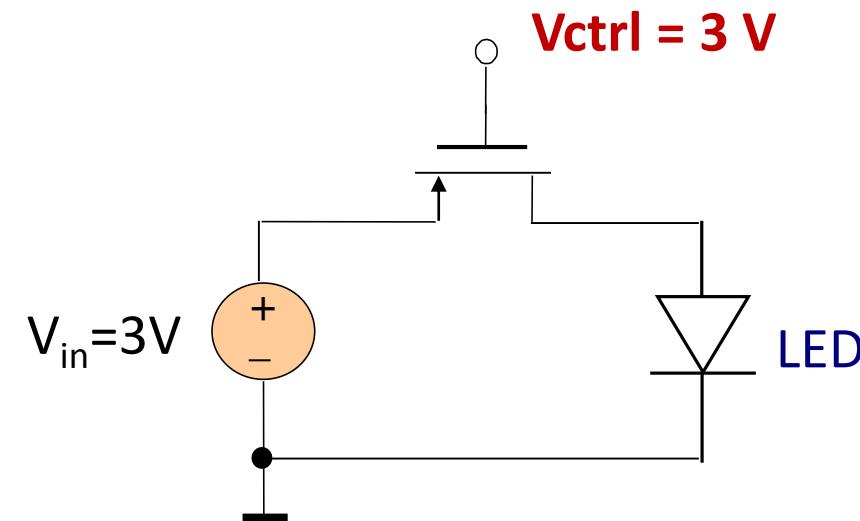
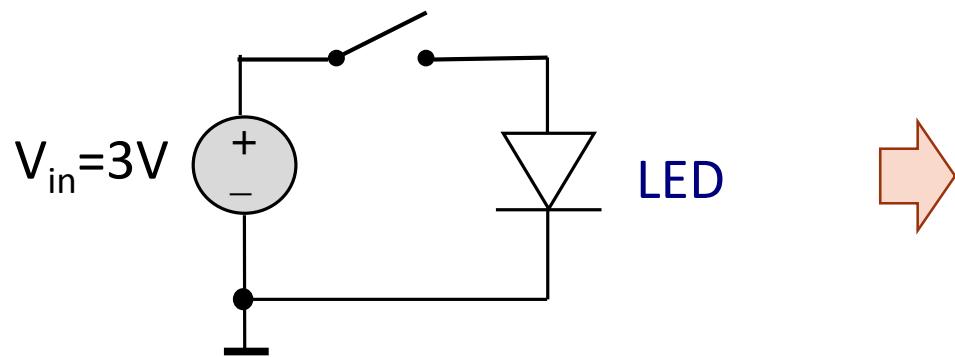
ak  $U_G = U_{DD}$  (log 1)  $\rightarrow U_{GS} = 0 \rightarrow i_D = 0$

ak  $U_G = 0$  (log 0)  $\rightarrow U_{GS} = -U_{DD} < U_T \rightarrow i_D > 0$

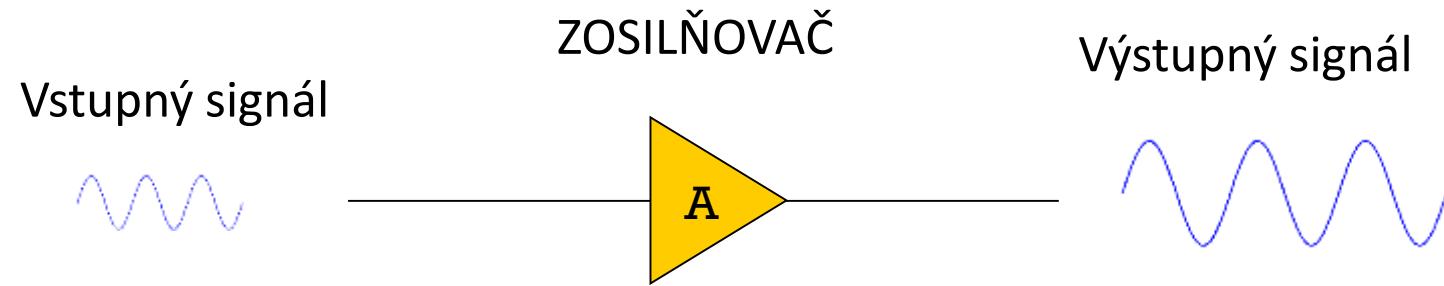


# MOS tranzistor ako spínač

- PMOS pre rozsvietenie LED diódy



# MOS tranzistor ako zosilňovač



Vstupný signál je na výstupe zosilnený.  
Veľkosť zosilnenia určuje tzv. **zisk zosilňovača**

Na zosilnenie vstupného signálu môžeme použiť  
ľubovoľný prvok so **zosilňovacou vlastnosťou**

**napr. MOS tranzistor**