# ESF II projekt Západočeské univerzity v Plzni

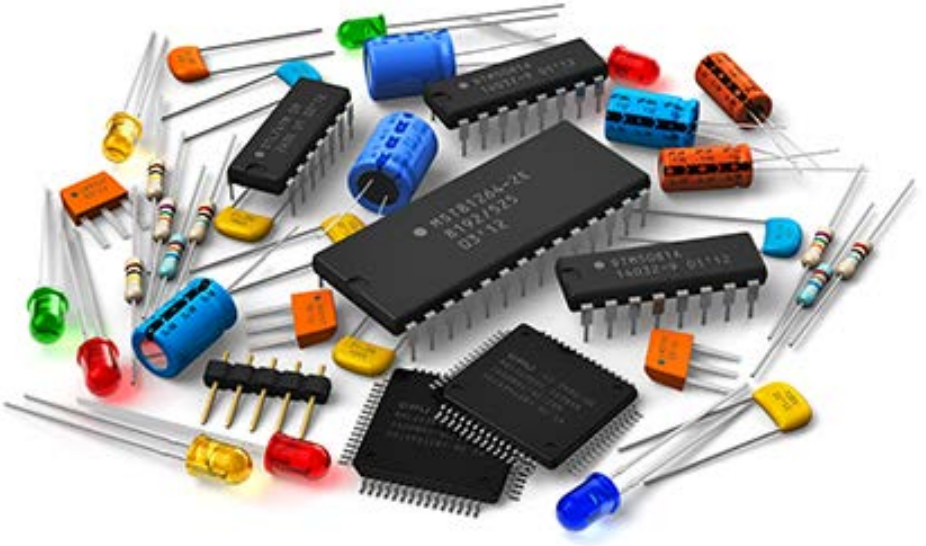
**reg. č. CZ.02.2.69/0.0/0.0/18_056/0013239**

EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

*Fyzikální elektronika*

*KET / FYE*



# *Unipolární tranzistory*

## *Přednáška 6*

EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

# Co se v přednášce dozvíte?

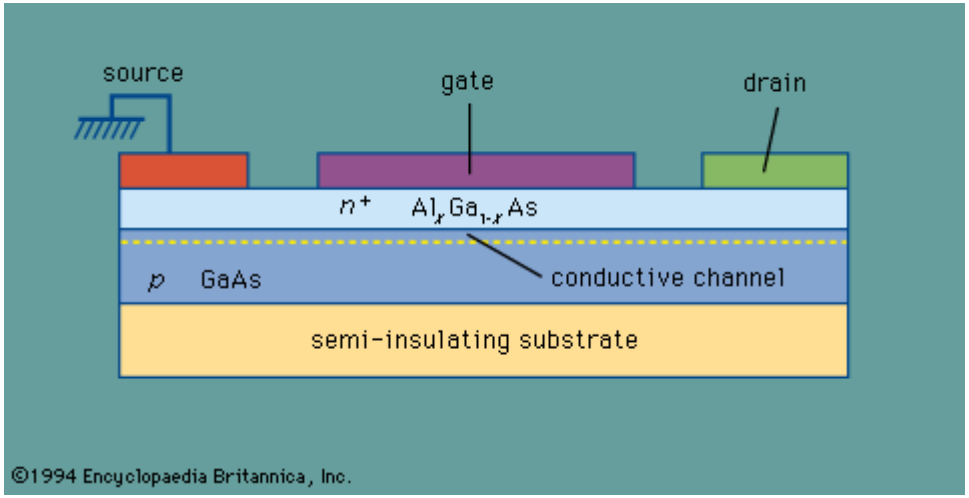
- Dozvíte se, co jsou to unipolární tranzistory a jak se rozdělují.
- Dozvíte se, jak vypadá struktura MOSFETu, JFETu a MeSFETu.
- Zjistíte, jak jednotlivé unipolární tranzistory fungují.
- Zjistíte, jaké jsou důležité parametry unipolárních tranzistorů.
- Zjistíte, k čemu se využívá izolační vrstva $SiO_2$.
- Dozvíte se, co znamená CMOS.
- Zjistíte, jaký je rozdíl mezi tranzistorem s indukovaným a vodivým kanálem.

# Unipolární tranzistory

- aktivní součástka
- **řízení pohybu většinových nosičů náboje elektrickým polem**
  - menšinové nosiče mají parazitní charakter
  - n>>p nebo p>>n
- vedení proudu – kanál
- **FET (Field Efect Transistor) – tranzistory řízené elektrickým polem**

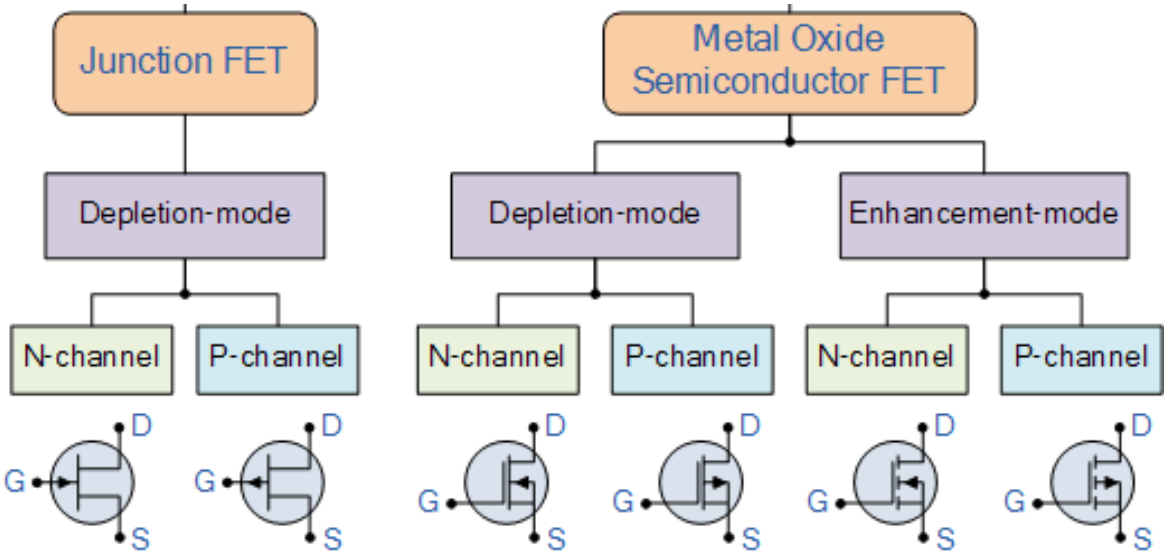
- 2 způsoby řízení
  - **změna průřezu vodivého kanálu rozšířením vyčerpané oblasti – účinek prostorového náboje přechodu PN**
  - **změna koncentrace majoritních nosičů v inverzním kanálu – indukovaný náboj pod izolační vrstvou**

- teorie principu - 1930
- praktická realizace – 1960
- základ tvoří polovodičová destička typu P nebo N
- elektrody – silně dotované oblasti typu N nebo P
  - **source S**
  - **drain D**
- řídící kovová elektroda
  - **gate G**
- **výstup – zdroj proudu**
- **vstup – řízen napětím**

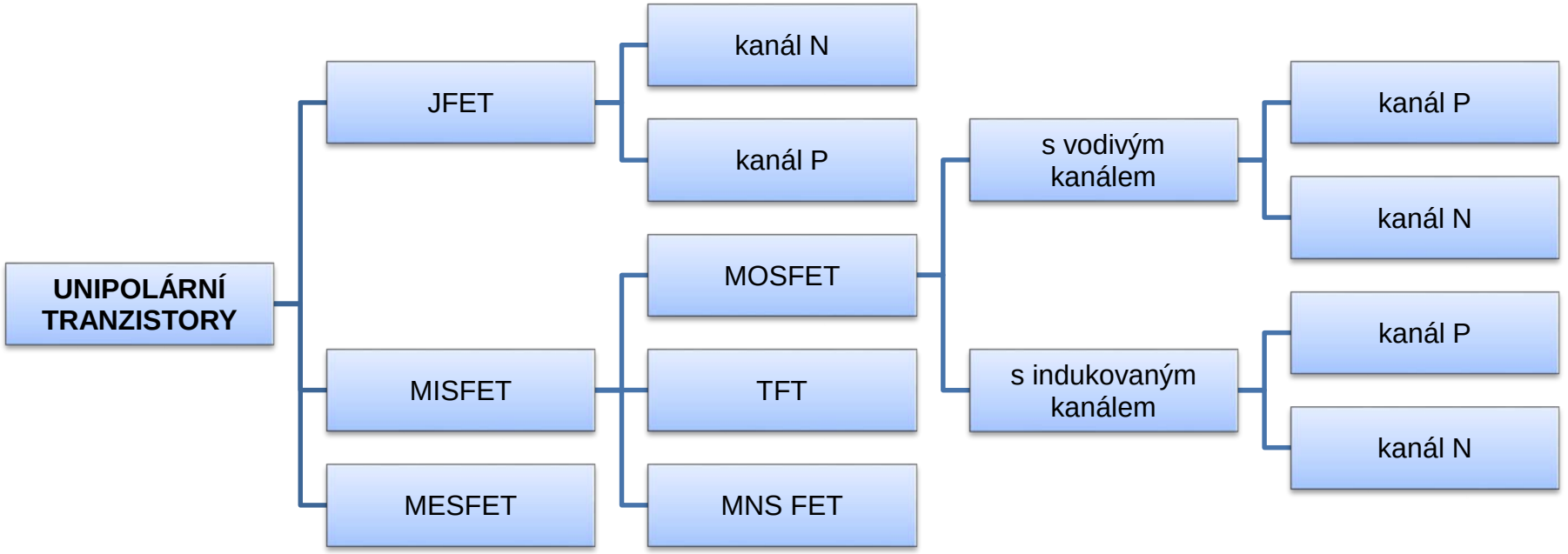


## Rozdělení

- 3 základní typy
  - **tranzistory s přechodovým hradlem – JFET**
  - **tranzistory s izolovaným hradlem – MISFET, MOSFET (Metal Insulator Semiconductor FET)**
    - tenkovrstvé tranzistory s izolovaným hradlem – TFT (Thin Film Transistor)
  - **tranzistory se Schottkyho hradlem - MeSFET**



# Rozdělení


UNIPOLÁRNÍ TRANZISTORY
JFET
MISFET
MESFET
kanál N
kanál P
MOSFET
TFT
MNS FET
s vodivým kanálem
s indukovaným kanálem
kanál P
kanál N
kanál P
kanál N

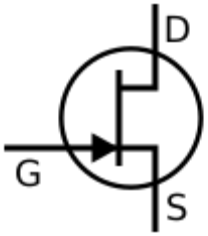
## Rozdělení

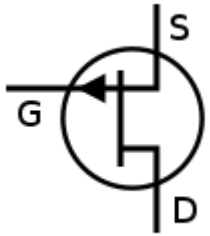
- **kanál N** – nositeli proudu elektrony (NMOS)
- **kanál P** – nositeli proudu díry (PMOS)

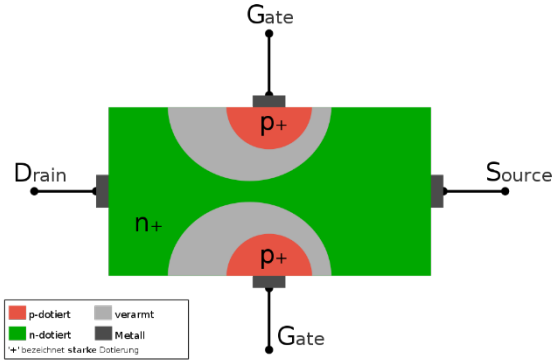
- **proud – tvořen majoritními nosiči**
  - odolnější vůči změnám teploty
  - odolnější vůči dopadajícímu ionizovanému záření
- **nepřítomnost minoritních nosičů**
  - zapínací a vypínací doba – dána parazitními kapacitami
  - parazitní kapacity – teplotně nezávislé → $t_{on}$, $t_{off}$ teplotně nezávislé
  - nedochází k procesu akumulace

# JFET

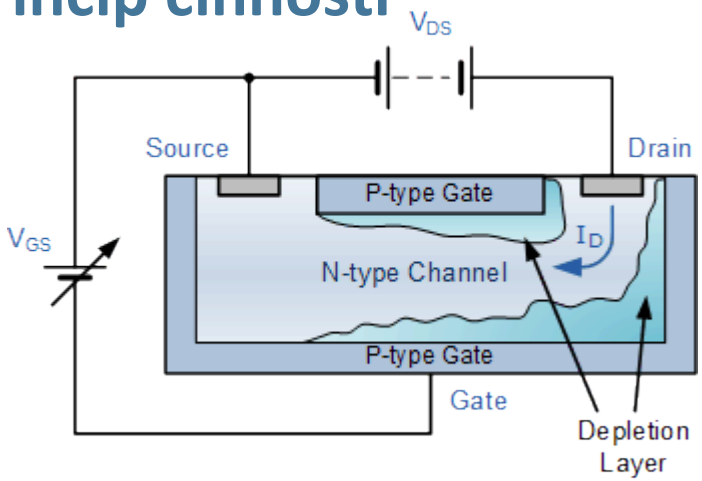
- **řídící elektroda oddělena závěrně polarizovaným PN přechodem**
- řízení výstupního proudu pomocí vyčerpané oblasti
- **kanál typu P**
  - $U_{GS}$ >0 – rozšíření PN přechodu – zaškrcení kanálu
  - zmenšení vodivého kanálu – snížení vodivosti
- **kanál typu N**
  - $U_{GS}$ <0 - rozšíření PN přechodu – zaškrcení kanálu
  - zmenšení vodivého kanálu – snížení vodivosti
- **k řízení je možné použít jen jednu polaritu napětí na $U_G$**
  - polarita, která udržuje PN přechod v nepropustném směru
- GaAs i jiné materiály, není nutný Si

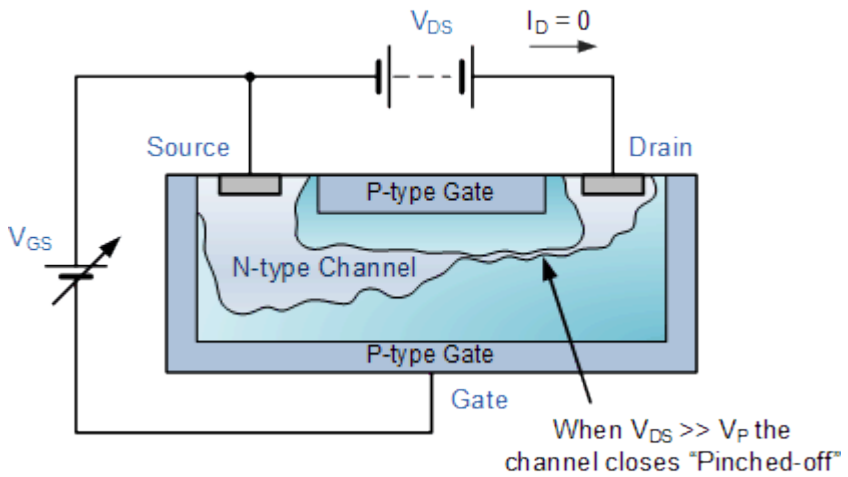


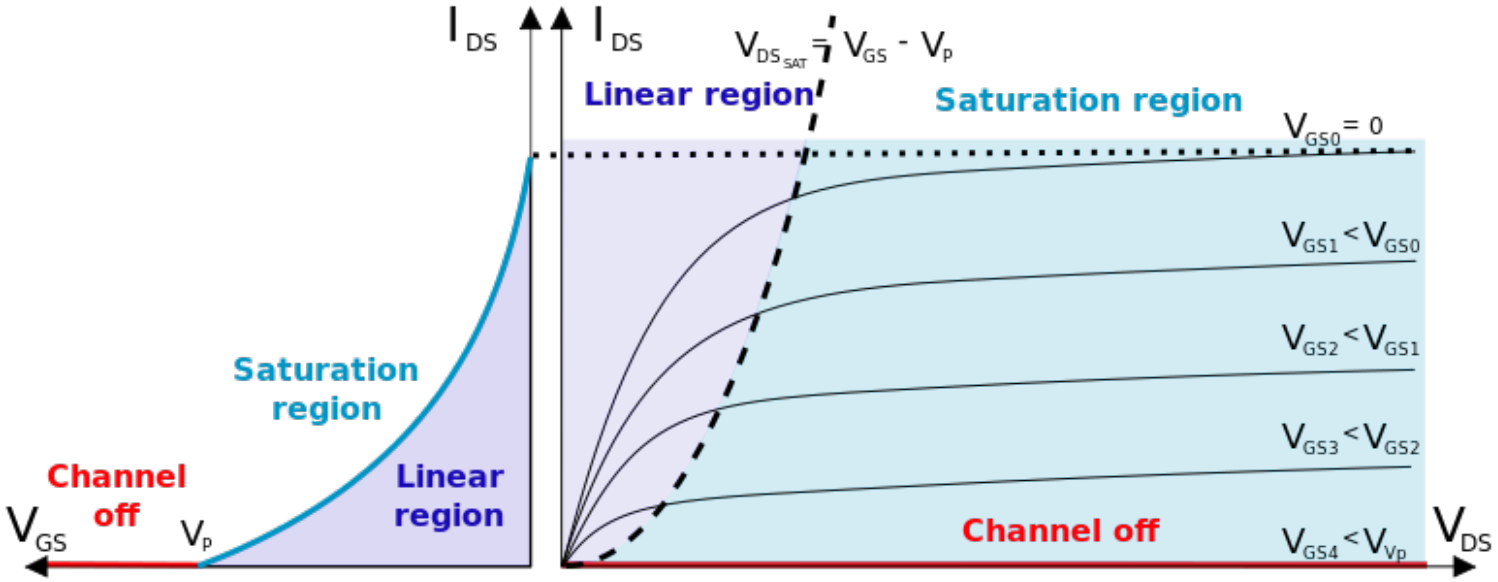



# Princip činnosti



# MOSFET

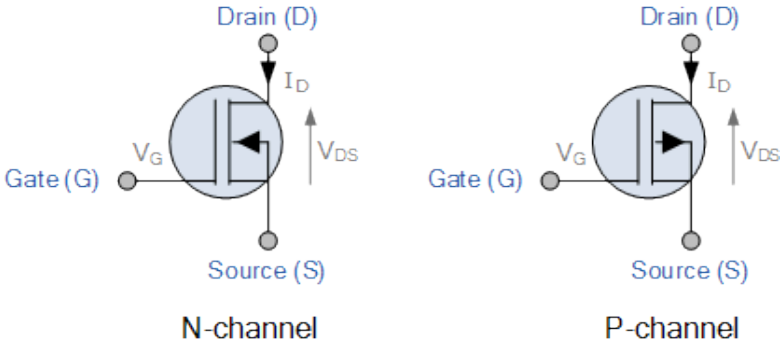
- **řídící elektroda oddělena od polovodiče tenkou dielektrickou vrstvou**

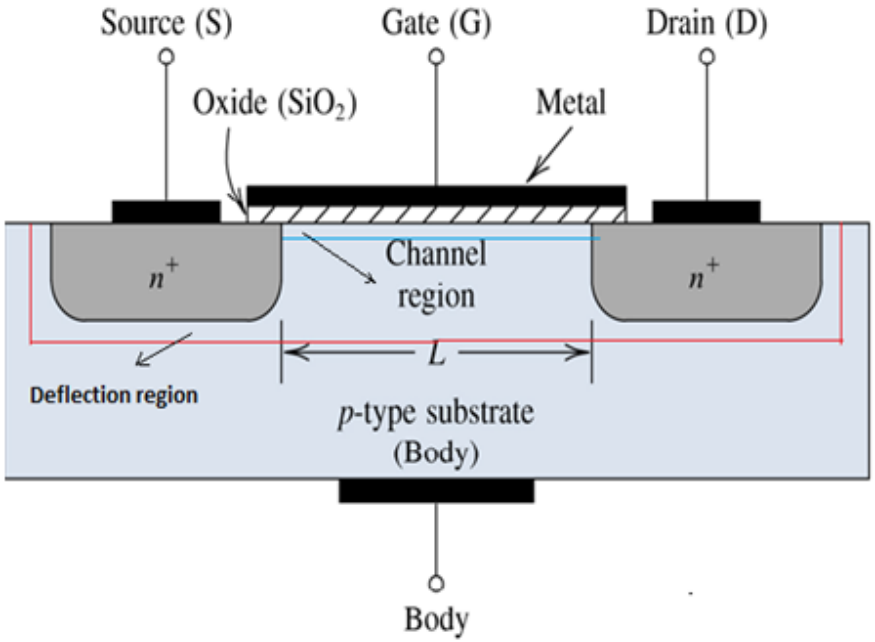
- **$U_G = 0$** – source+základní polovodič+drain tvoří dvě sériové diody zapojené proti sobě
  - **protéká jen sytný proud**

- **$U_G \neq 0$** – k povrchu polovodiče přitaženy elektrony
  - **vznik vrstvy s vyšší koncentrací elektronů než děr – vrstva typu N - vznik inverzní vrstvy**
  - **vznik vodivého kanálu mezi S a D**
  - velikost inverzní vrstvy řiditelná napětím $U_G$

## Princip činnosti

- drain, source – vysoce dotované polovodiče
- izolační vrstva pod G – $SiO_2$
- **vodivý kanál – kanál vytvořen i v klidovém stavu**
- **indukovaný kanál – kanál vytvořen až pro určité napětí $U_G$**



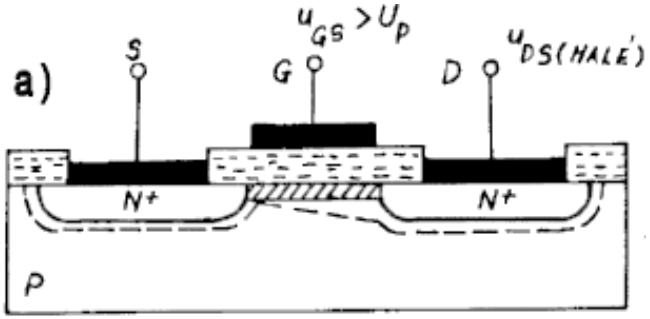



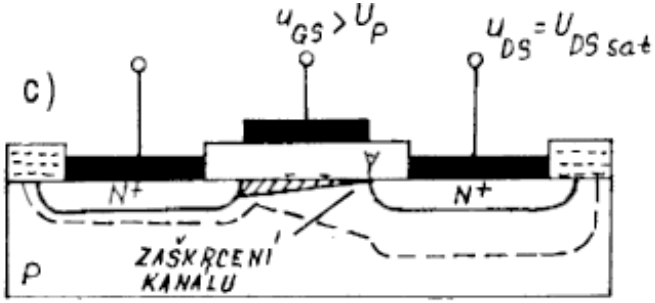
## Princip činnosti

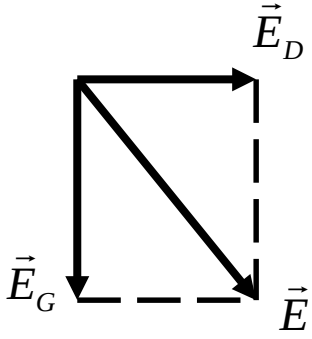
- 2 intenzity elektrického pole

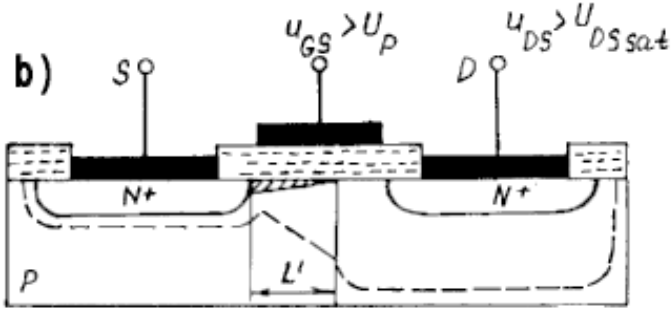
$$\vec{E}_G = \frac{U_G}{t_i} \qquad \vec{E}_D = \frac{U_D}{l}$$

- tvar charakteristik ovlivněn výslednou intenzitou elektrického pole v polovodiči




$E_G$ – vznik vlivem napětí na G

$t_i$ – tloušťka izolační vrstvy

$E_D$ – souvisí s kanálem

l – délka kanálu mezi DS

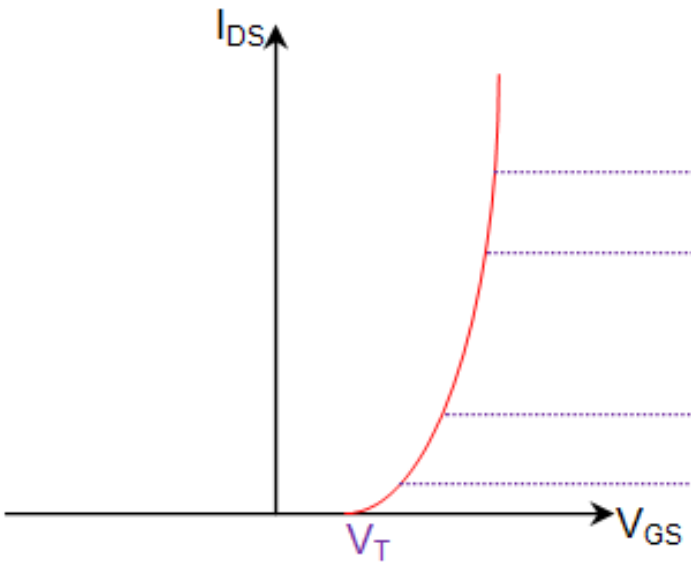
**výsledkem je nakloněná vrstva u G**

**způsobí nasycení charakteristik**

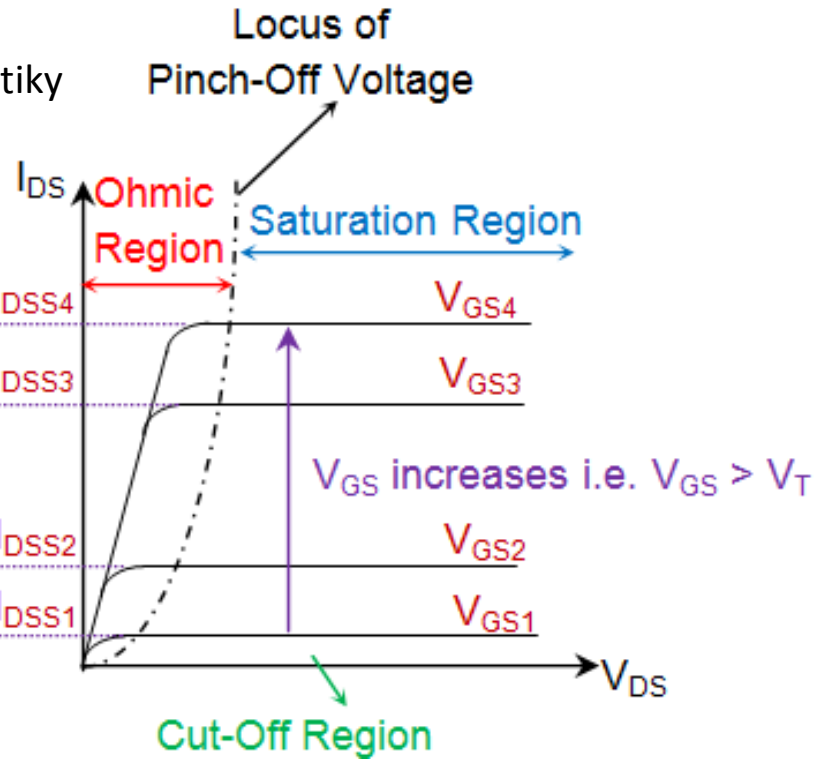
# MOSFET s indukovaným kanálem

- inverzní kanál vytvořen až pro určité napětí $U_G$
- **strmost – tečna k převodní charakteristice**

převodní charakteristika



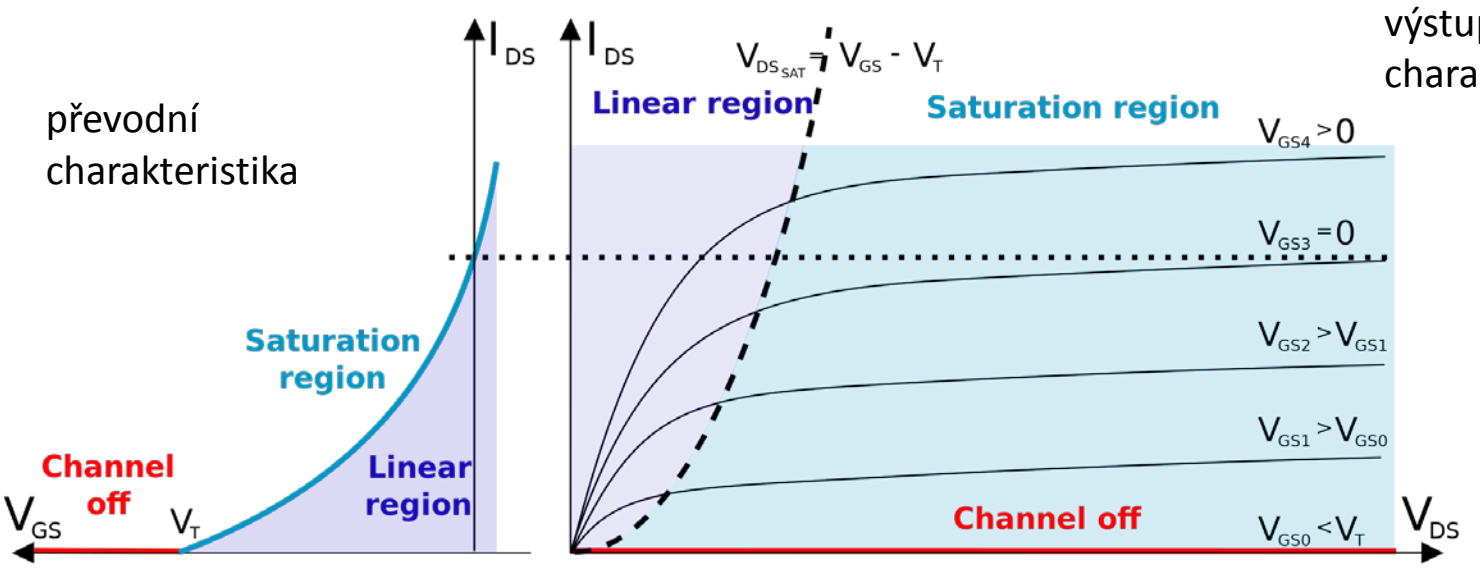

výstupní charakteristiky




**Princip činnosti:** https://www.youtube.com/watch?v=tz62t-q_KEc

# MOSFET s vodivým kanálem

- kanál vytvořen i v klidovém stavu
  - jednou polaritou je inverzní kanál rozšiřován
  - opačnou polaritou je inverzní kanál zužován až do úplného zániku
- **strmost – tečna k převodní charakteristice**
  - vždy kladná
- větší strmost – větší zesilovací účinky



## $SiO_2$

- **výborný izolant**
- celý proces funkční pouze u Si - přirozeně se vytváří na Si
- **čím tenčí vrstva tím účinnější řízení vodivosti kanálu**
- MOSFET tranzistor celý z křemíku – 3 různé formy
  - monokrystal
  - SiO2
  - polykrystal

$$U_G = U_G^{'} + U_T$$

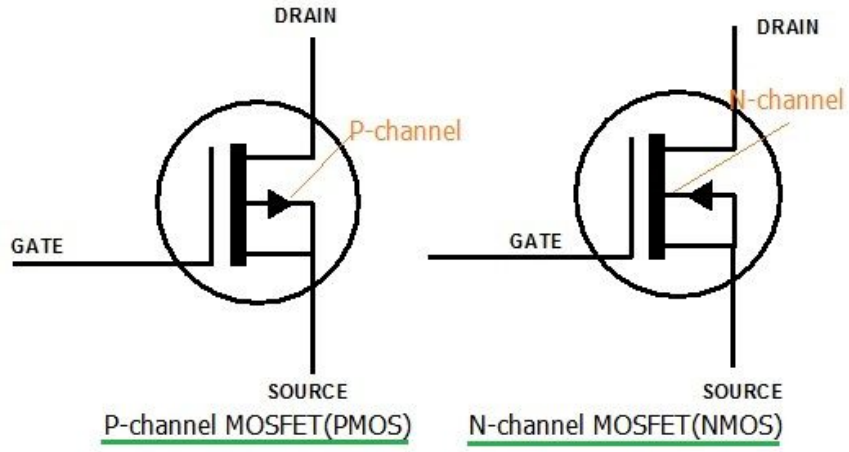
- špatně vytvořené $SiO_2$ – absorpce $O_2$, který je záporně nabit → nutné prahové napětí $U_T$ k odstranění záporných nábojů
- $U_T$ vytváří rozhodovací hladinu pro číslicové obvody – nesmí být 0V
- $SiO_2$ roste dovnitř
- **samozákrytová technologie - $SiO_2$ překrývá celý kanál s malým přesahem**
- **velký přesah $SiO_2$ – zvýšení plochy – zvýšení kapacity**

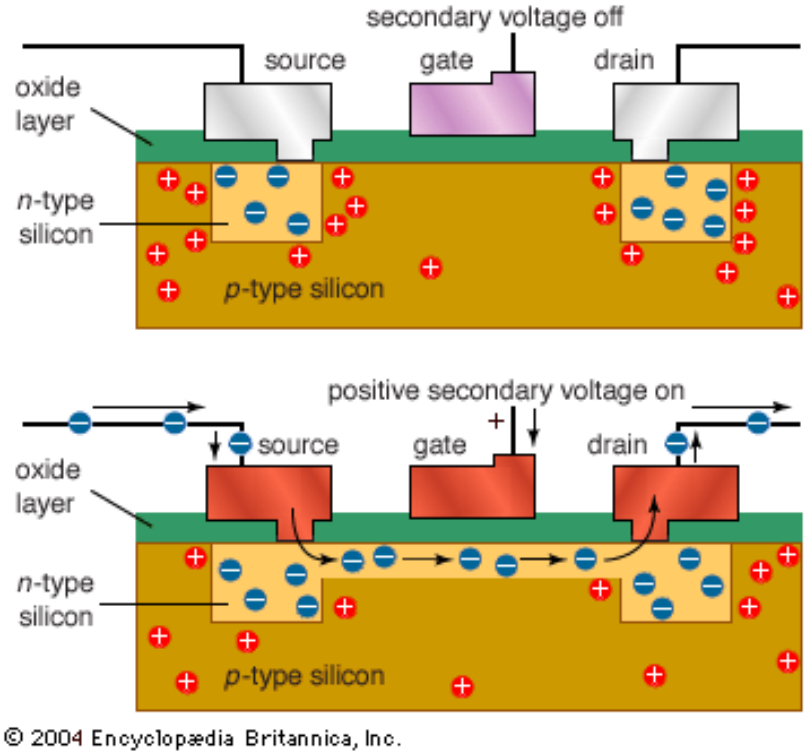
## NMOS

- **základní polovodič - Si typu P**
- **drain a source - vytváří se Si vrstva typu N**
- lepší řešení díky větší pohyblivosti elektronů

## PMOS

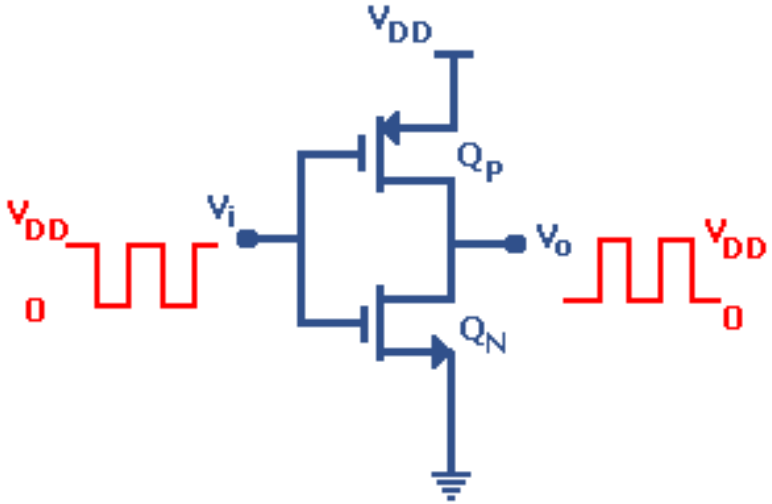
- **základní polovodič - Si typu N**
- **drain a source - vytváří se Si vrstva typu P**

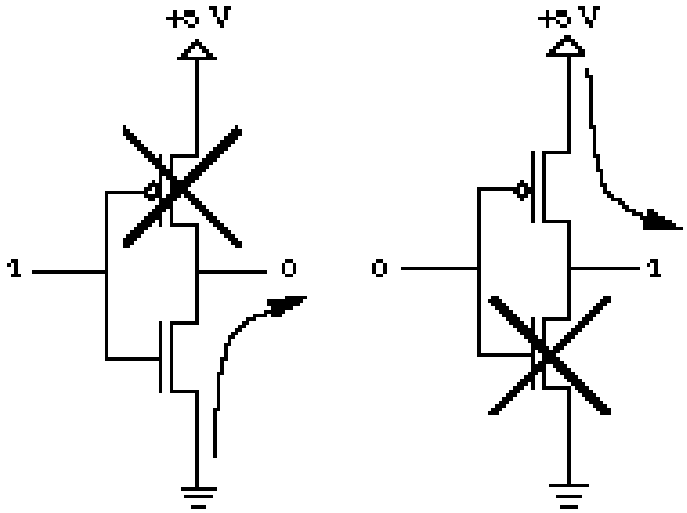


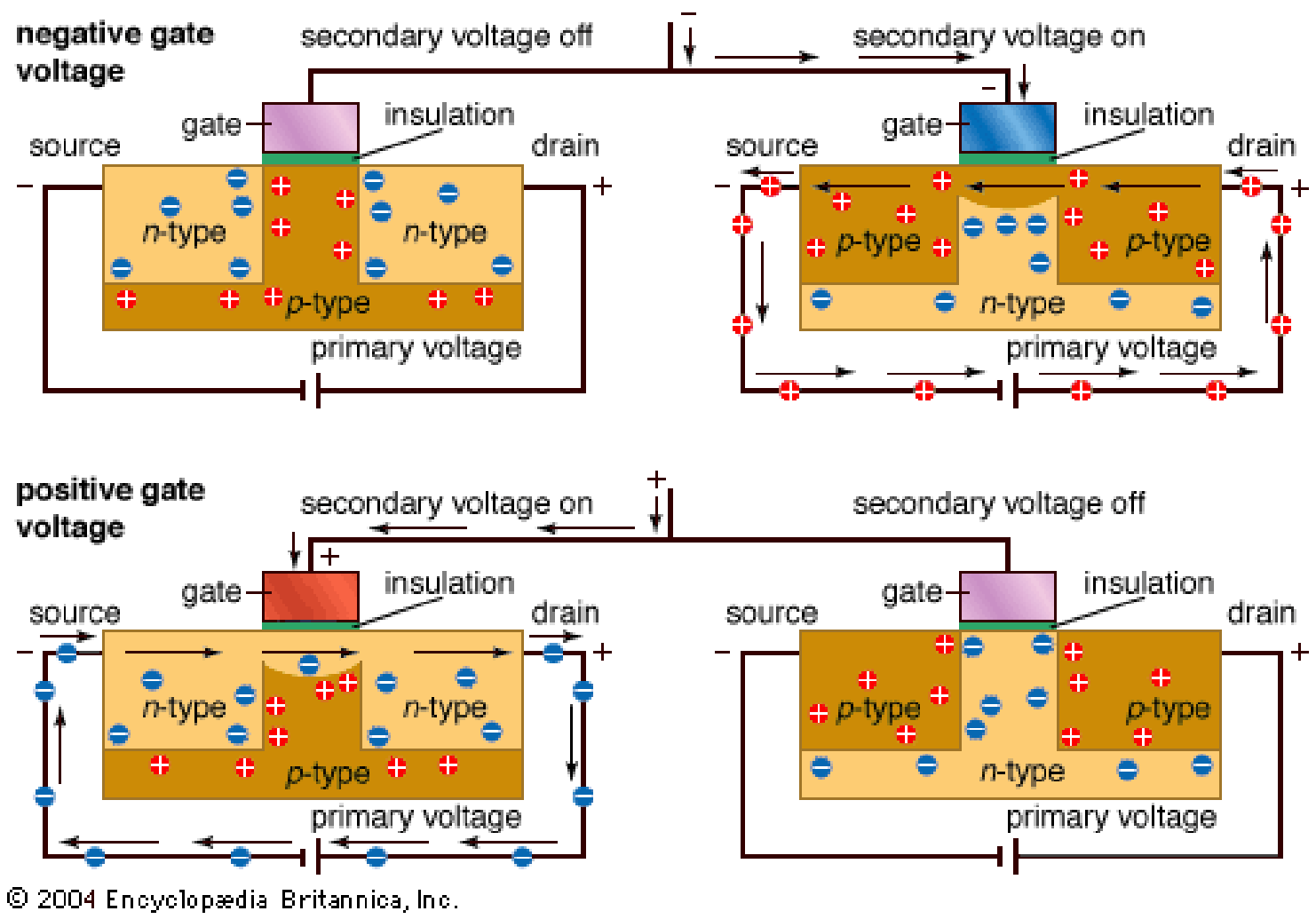
## CMOS

- **CMOS = NMOS + PMOS**
- napětím buzený prvek – řídící veličina $U_G$
- **jeden z tranzistorů vždy uzavřen – protéká jen malý proud**
- malý energetický úbytek



# CMOS



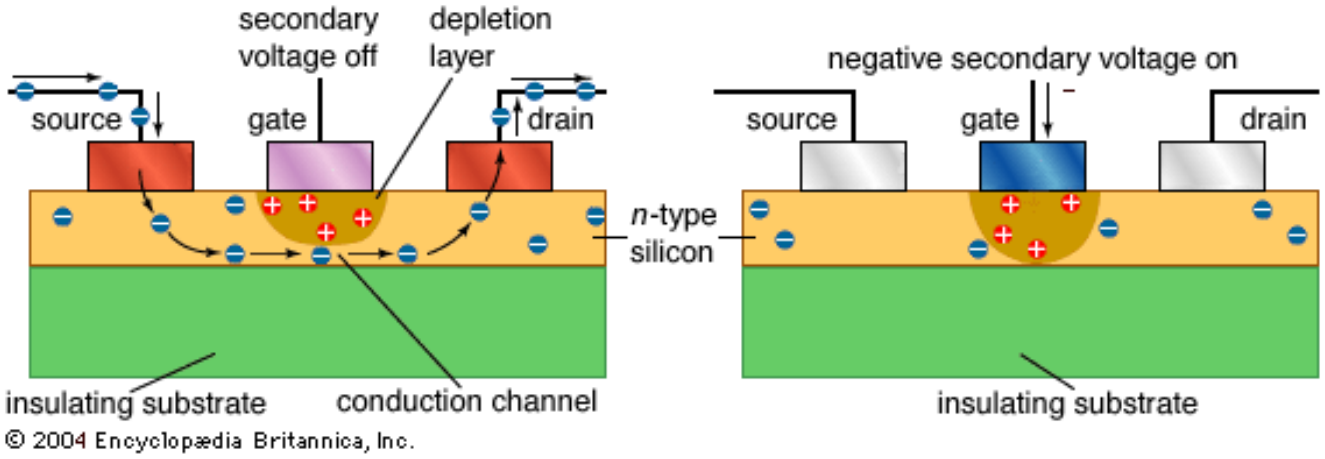

nelze v elektronkové verzi – neexistuje komplementární obvod

# MeSFET

- tři kovové elektrody na polovodičovém základu
- **založeno na Schottkyho jevu**

- **source+drain – ohmický kontakt**
  - výstupní práce $W_S > W_C$ pro typ N

- **gate – Shottkyho bariéra**
- výstupní práce $W_S < W_C$ pro typ N

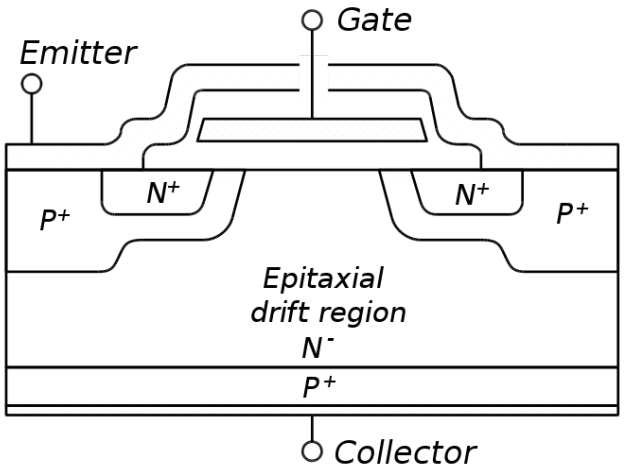


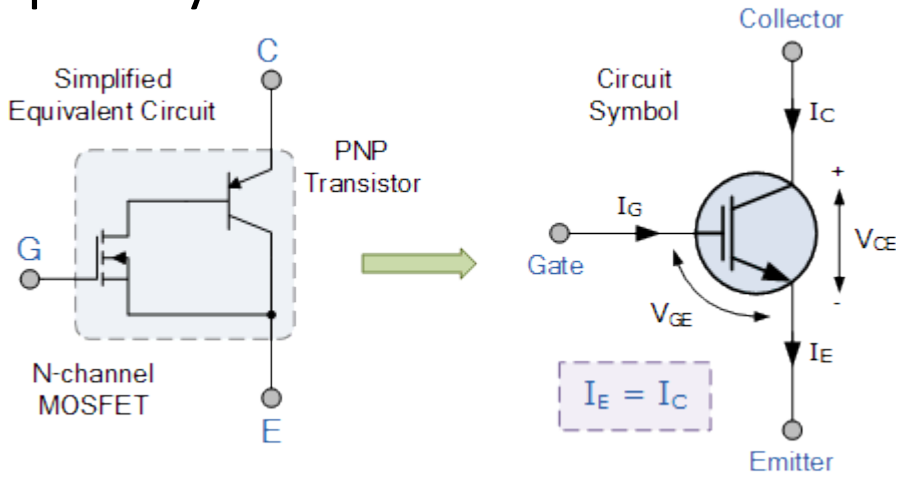
- nízké statické a dynamické ztráty
- polovodičové vlastnosti jako JFET
- **planární struktura – snadnější možnost integrace**
- GaAs – větší pohyblivost → větší rychlost přepínání
- délka kanálu pod 1 μm → **mezní frekvence 10 GHz**

# Speciální unipolární tranzistory

## IGBT

- podobné struktuře MOSFET
- **spojuje funkce struktury MOSFET, bipolárního tranzistoru a výkonové diody**
- pro $U_G>0$ – vytvoření inverzní vrstvy
- velká proudová hustota – velký proud (300 A)
- vysoké blokovací napětí (1400 V)
- velký úbytek napětí i pro malé proudy



# Model unipolárního tranzistoru

- popis pomocí Y parametrů (admitančních parametrů)

- **$y_{11}$ – vstupní admitance**
- **$y_{12}$ – zpětná převodní vodivost**
- **$y_{21}$ – převodní vodivost (strmost) – aktivní činnost součástky**
- **$y_{22}$ – výstupní admitance**

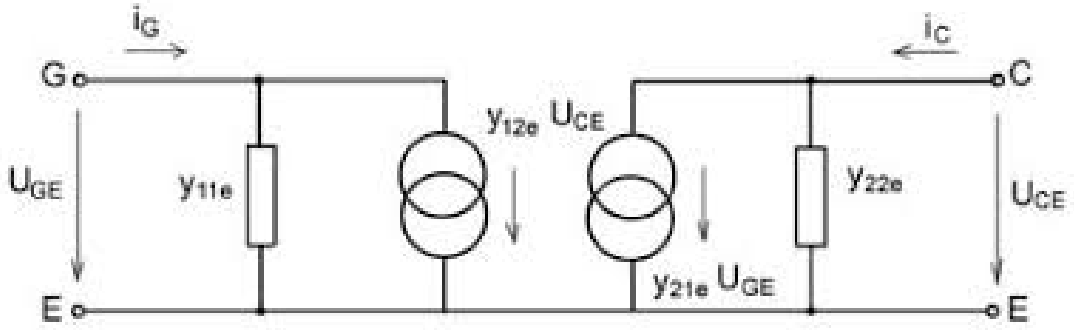
$$y_{11} = \frac{i_G}{u_{GS}} \quad (u_{DS}=0) \qquad y_{12} = \frac{i_G}{u_{DS}} \quad (u_{GS}=0)$$

$$y_{21} = \frac{i_D}{u_{GS}} \quad (u_{DS}=0) \qquad y_{22} = \frac{i_D}{u_{DS}} \quad (u_{GS}=0)$$

$$\begin{bmatrix} i_G \\ i_D \end{bmatrix} = [Y] \begin{bmatrix} u_{GS} \\ u_{DS} \end{bmatrix}$$

$$i_G = y_{11}u_{GS} + y_{12}u_{DS}$$

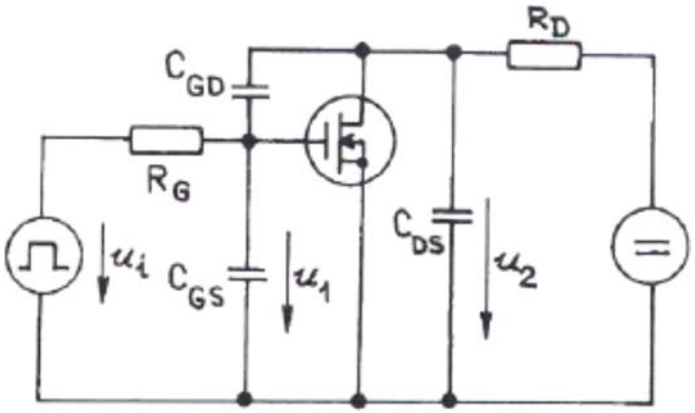
$$i_D = y_{21}u_{GS} + y_{22}u_{DS}$$

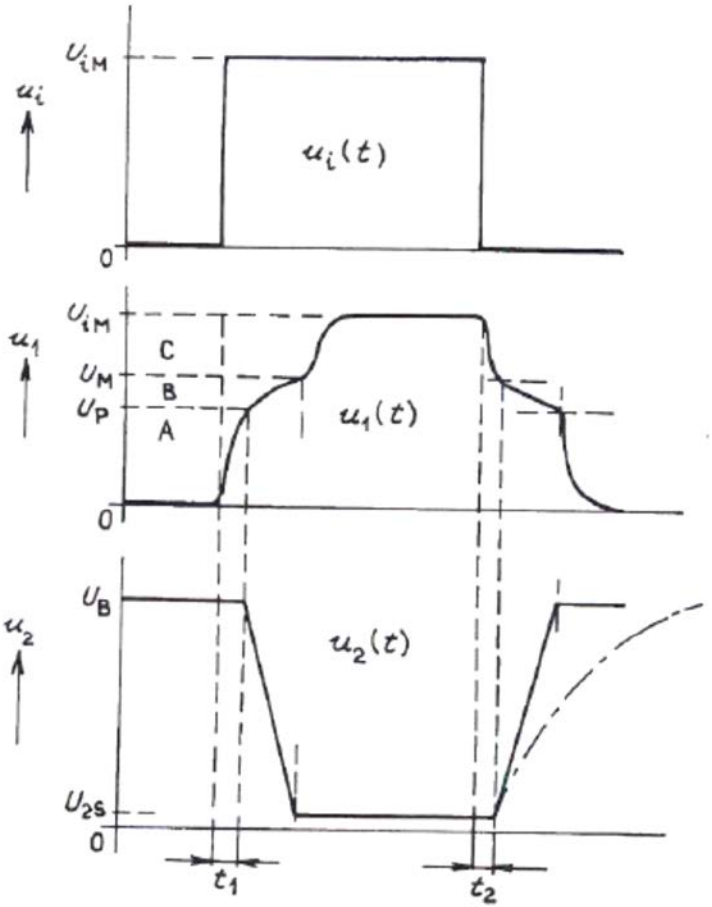


# Spínací vlastnosti

- **vliv kapacit – $C_{GS}$, $C_{GD}$, $C_{DS}$**
- setrvačnost FETů
  - závislost na době průchodu náboje kanálem (kanál co nejkratší)
  - mezielektrodové kapacity (jednotky pF)

$$C_{GS} > C_{GD} > C_{DS}$$



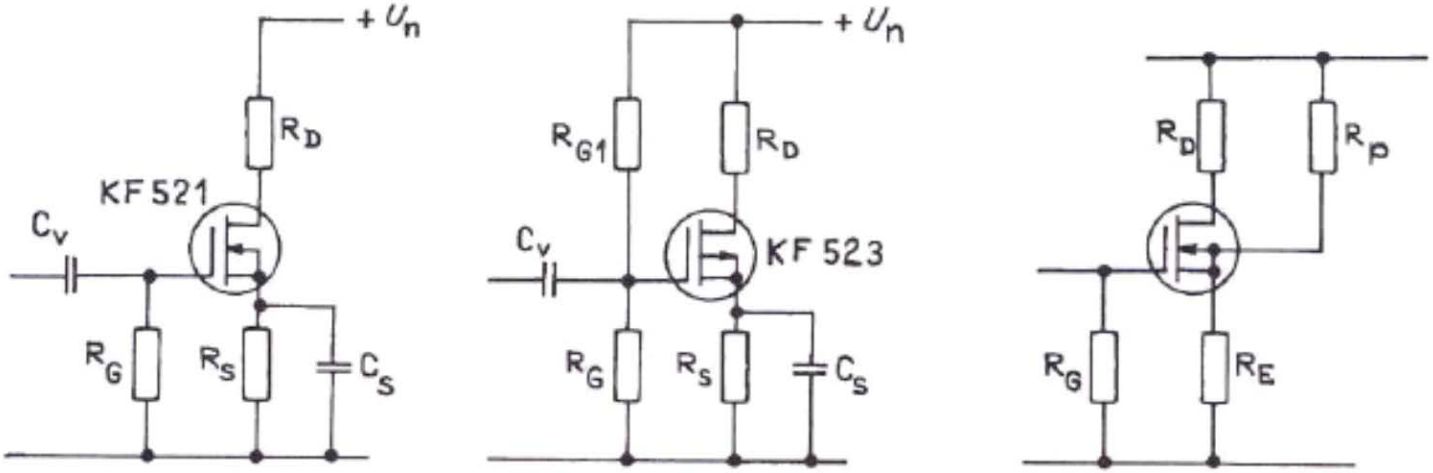



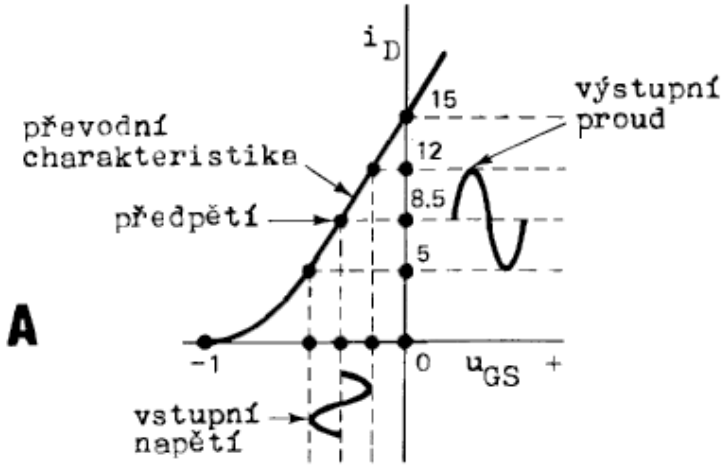

$$\tau_A = R_i C_{GS} \qquad \tau_C = R_i\left(C_{GS} + C_{GD}\right)$$

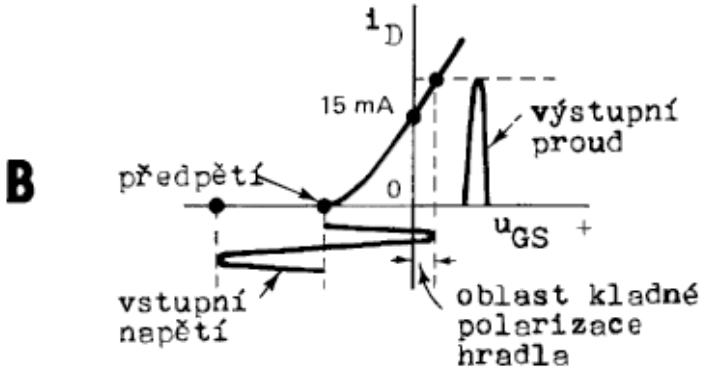
$$\tau_B = R_i\left[C_{GS} + C_{GD}\left(1 + SR_Z\right)\right]$$

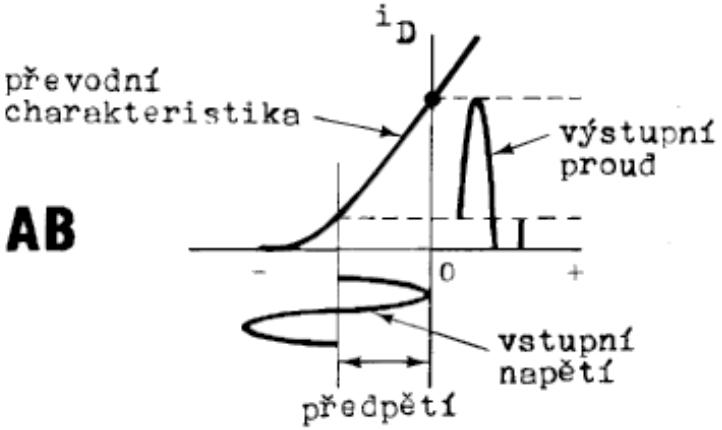
# Nastavení pracovního bodu

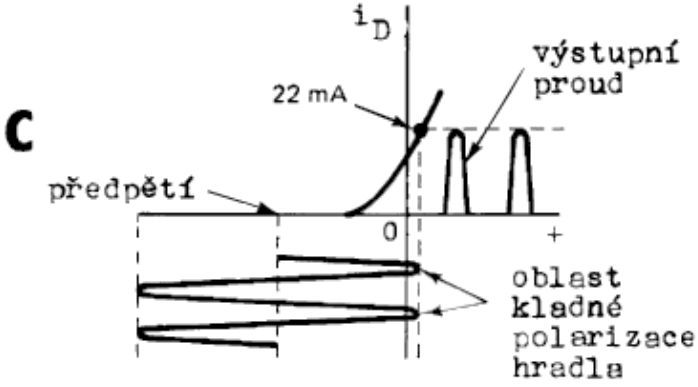
- nutné znát průběh výstupních charakteristik
- graficko-početní metoda pro určení hodnot součástek

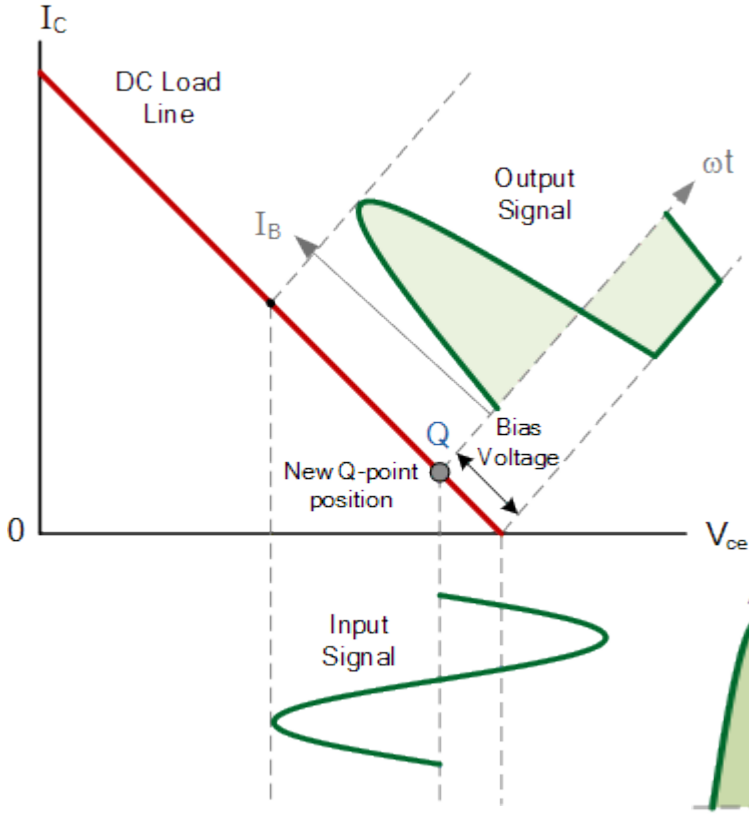


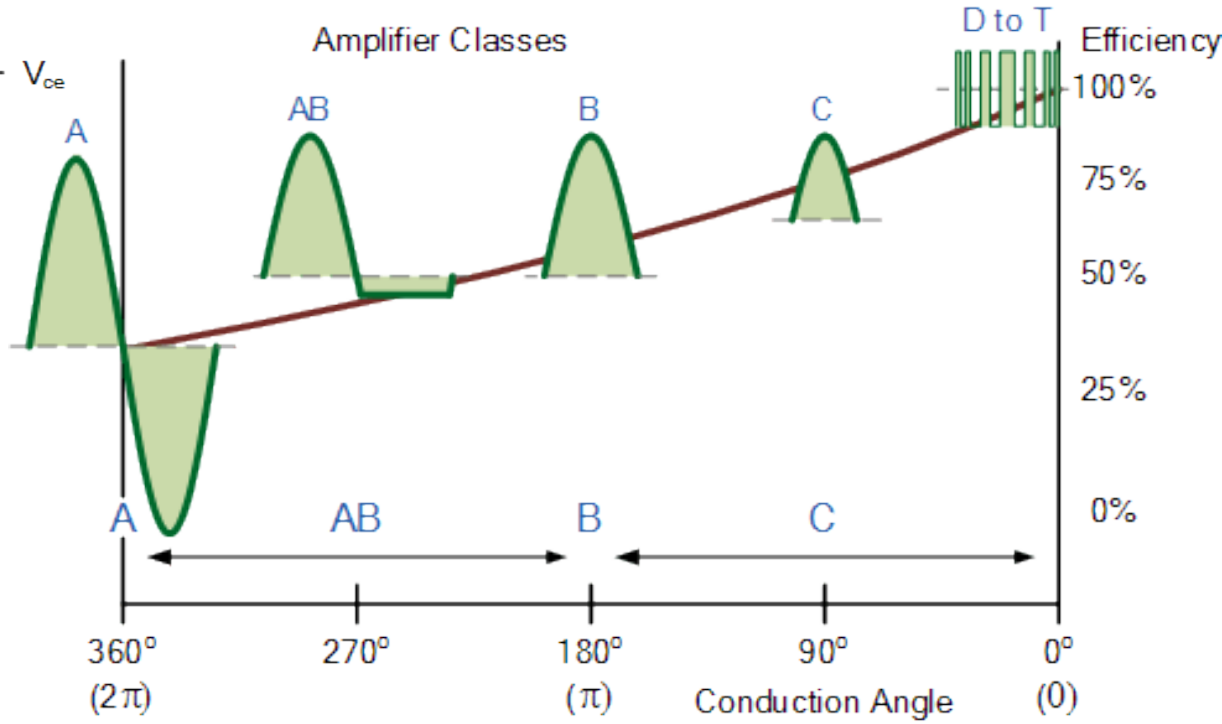

A
$i_D$
15
12
8.5
5
převodní charakteristika
předpětí
výstupní proud
-1
0
$u_{GS}$
+
vstupní napětí


B
$i_D$
15 mA
výstupní proud
předpětí
0
$u_{GS}$
+
vstupní napětí
oblast kladné polarizace hradla


AB
$i_D$
převodní charakteristika
výstupní proud
-
0
+
vstupní napětí
předpětí


C
$i_D$
22 mA
výstupní proud
předpětí
0
+
oblast kladné polarizace hradla

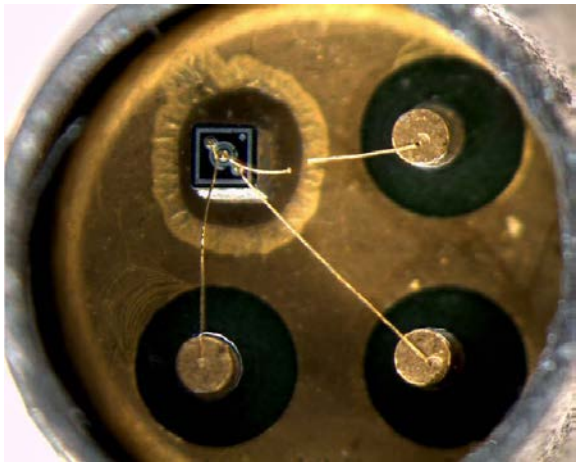

$I_C$
DC Load Line
$I_B$
Output Signal
ωt
Q
Bias Voltage
New Q-point position
0
Input Signal

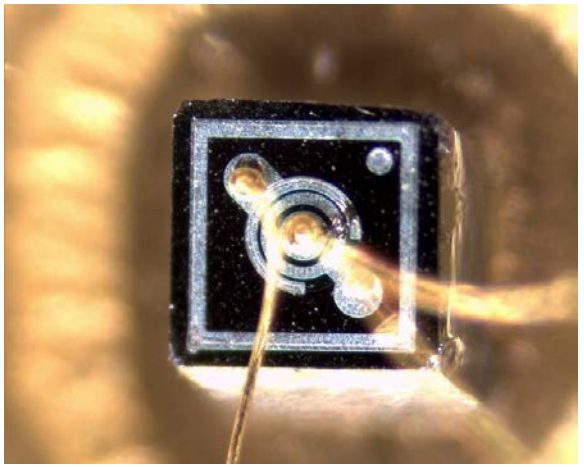

Amplifier Classes
D to T
Efficiency
$V_{ce}$
A
AB
B
C
100%
75%
50%
25%
0%
360°
(2π)
270°
180°
(π)
90°
0°
(0)
Conduction Angle

# Unipolární technologie

- **lépe integrovatelná**
- **nebezpečí vzniku „short canal effect“**
  - krátký kanál – vede k odsycení charakteristik
  - stejný efekt jako Earlyho jev u bipolárních tranzistorů
- délka kanálu – jednotky µm – menší nebezpečí







# Kontrolní otázky

- Nakreslete a vysvětlete strukturu JFET.
- Nakreslete a vysvětlete strukturu MOSFET.
- Nakreslete a vysvětlete strukturu MeSFET.
- Vysvětlete princip CMOS.
- Jaký je rozdíl mezi tranzistorem s vodivým a indukovaným kanálem?
- Co je to strmost?



# Použitá literatura


- Musil, V.: **Elektronické součástky.** VUT Brno, 2005, ISBN 80-214-2627-6
- Vaníček, F.: **Elektronické součástky: principy, vlastnosti, modely.** ČVUT Praha, 2004, ISBN 80-01-03112-8
- Jerhot, J.: **Elektronické součástky a zesilovače.** VŠSE Plzeň, 1979
- FOIT, J.; HUDEC, L.: **Základy elektroniky.** ČVUT v Praze, 2009, ISBN 978-80-01-04236-6
- Vobecký, J.; Záhlava, V.: **Elektronika : součástky a obvody, principy a příklady.** Grada Publishing, 2005, ISBN 80-247-1241-5
- Sze, S.M.; Kwok, K.Ng.: **Physics of semiconductor devices.** Wiley-Interscience, 2007, ISBN 978-0-471-14323-9
- Kasap, S.O.: **Principles of electronic materials and devices.** McGraw-Hill, 2006, ISBN 0-07-124458-1
- Schroder, D.K.: **Semiconductor material and device characterization.** John Wiley & Sons, 2006, ISBN 0-471-73906-5