

# Elektronika

## Auditorne vježbe 7

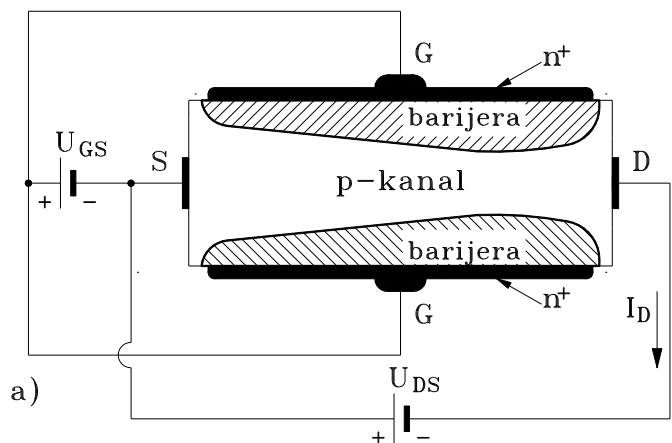
# Unipolarni tranzistor

- Tranzistor s efektom polja – **Field Effect Transistor**
- Unipolarni – u radu tranzistora sudjeluju **ili** elektroni **ili** šupljine.
- Elektrode:
  - Uvod (**S**ource)
  - Odvod (**D**rain)
  - Vrata – upravljačka elektroda (**G**ate)
- Dio tranzistora kroz koji teče struja – **kanal**:
  - n-kanalni
  - p-kanalni

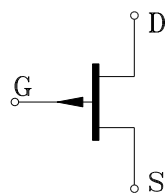
# Unipolarni tranzistori

- Podjela s obzirom na tehnološku izvedbu:
  - Spojni unipolarni tranzistori – **J**unction FET
  - Unipolarni tranzistori s izoliranim vratima:
    - Insulated **G**ate FET
    - **M**etal-**O**xide-**S**emiconductor FET
- Zajedničko svojstvo FET-ova: velik ulazni otpor

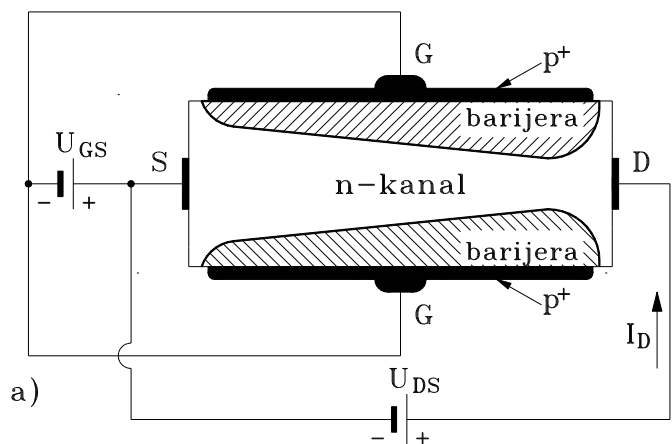
# Spojni unipolarni tranzistor - JFET



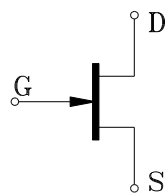
## p-kanalni JFET



- a) Struktura JFET-a
- b) El. simbol



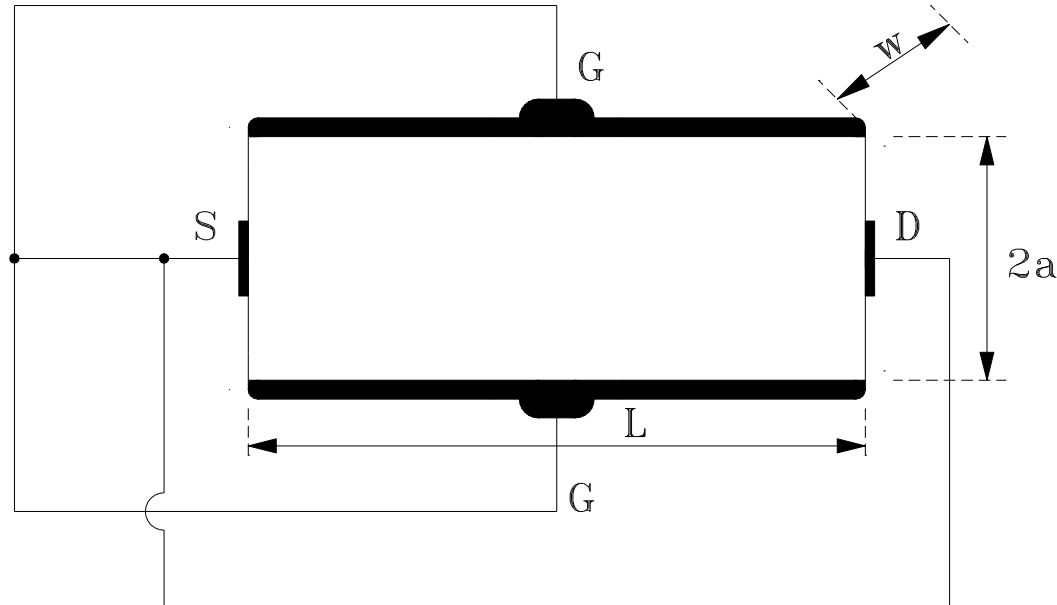
## n-kanalni JFET



- a) Struktura JFET-a
- b) El. simbol

# Potpuno otvoreni kanal

- $U_{DS}=0$  i  $U_{GS}=0$

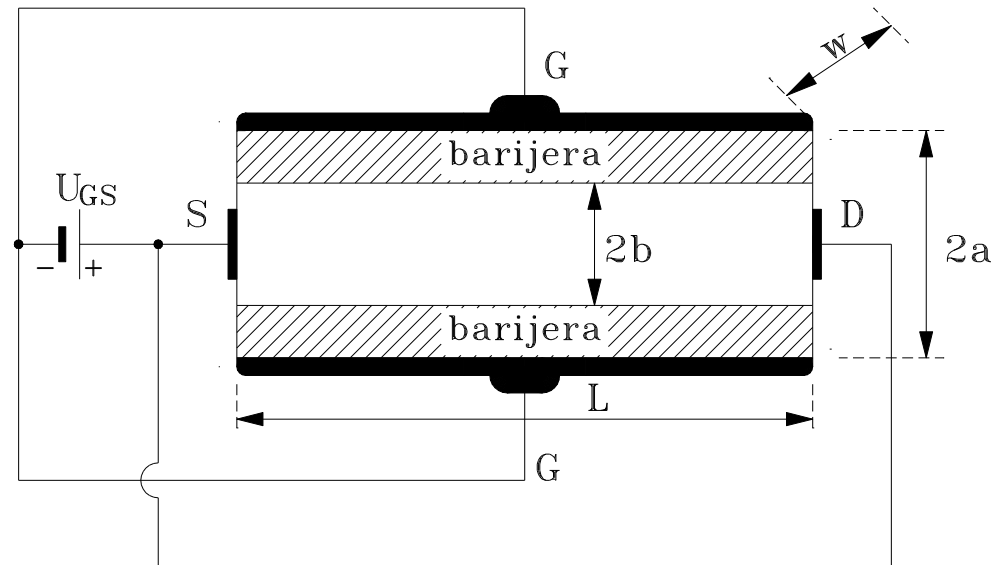


- Vodljivost:

$$G_0 = \frac{1}{R_0} = \frac{q \cdot \mu_n \cdot N_D \cdot 2a \cdot w}{L} = \sigma \cdot \frac{2a \cdot w}{L}$$

# Širina kanala

- $U_{DS}=0, U_{GS} \neq 0$



- Širina barijere:

$$a-b = \sqrt{\frac{2 \cdot \varepsilon \cdot (U_k - U_{GS})}{q \cdot N_D}}$$

# Napon dodira

- Napon pri kojem je širina kanala nula:  $b = 0$ .

$$a^2 = \frac{2 \cdot \varepsilon \cdot (U_k - U_{GS0})}{q \cdot N_D} \quad \Rightarrow \quad U_{GS0} = U_k - \frac{a^2 \cdot q \cdot N_D}{2 \cdot \varepsilon}$$

$$b = a \cdot \left( 1 - \sqrt{\frac{U_k - U_{GS}}{U_k - U_{GS0}}} \right)$$

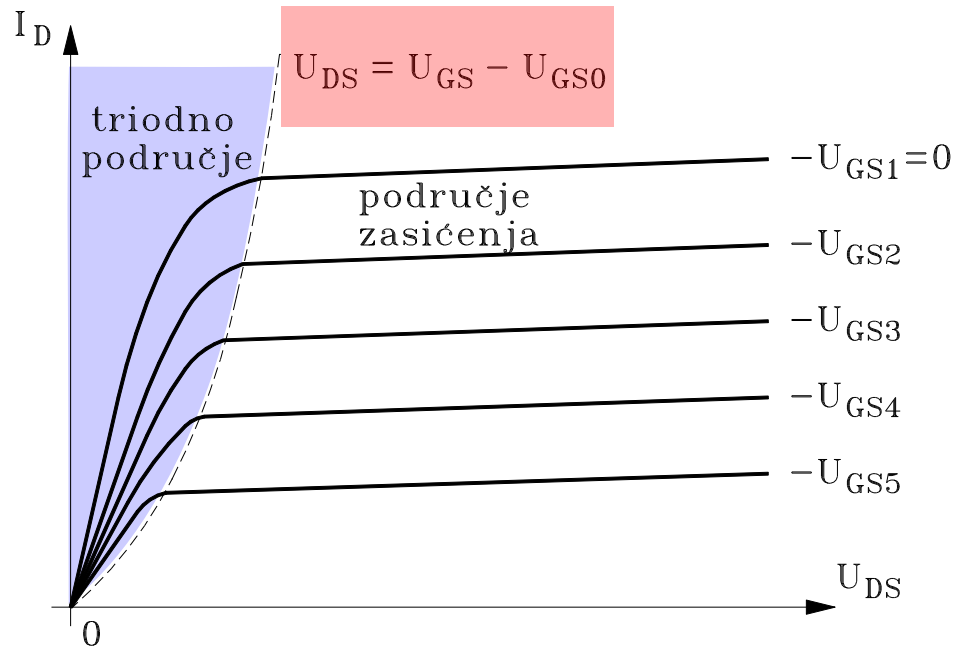
**n-kanalni JFET**

$$a^2 = \frac{2 \cdot \varepsilon \cdot (U_k + U_{GS0})}{q \cdot N_A} \quad \Rightarrow \quad U_{GS0} = \frac{a^2 \cdot q \cdot N_A}{2 \cdot \varepsilon} - U_k$$

$$b = a \cdot \left( 1 - \sqrt{\frac{U_k + U_{GS}}{U_k + U_{GS0}}} \right)$$

**p-kanalni JFET**

# Izlazne karakteristike JFET-a



- Dva područja rada:
  - Triодно područje
  - Područje zasićenja



# Dinamički parametri JFET-a (n-kanalni)

Parametar	Područje	Izraz
Strmina	Triodno	$g_m = G_0 \cdot \frac{\sqrt{U_k - U_{GS} + U_{DS}} - \sqrt{U_k - U_{GS}}}{\sqrt{U_k - U_{GS0}}}$
	Zasićenje	$g_m = G_0 \cdot \left( 1 - \frac{\sqrt{U_k - U_{GS}}}{\sqrt{U_k - U_{GS0}}} \right)$
Izlazna dinamička vodljivost	Triodno	$g_d = G_0 \cdot \left( 1 - \sqrt{\frac{U_k - U_{GS} + U_{DS}}{U_k - U_{GS0}}} \right)$
	Zasićenje	$g_d = I_D \cdot \lambda$
Faktor pojačanja		$\mu = \frac{g_m}{g_d}$

# Dinamički parametri JFET-a (n-kanalni)

Parametar	Područje	Izraz
Struja	Triodno	$I_D = G_0 \cdot \left[ U_{DS} - \frac{2}{3} \cdot \frac{(U_k - U_{GS} + U_{DS})^{\frac{3}{2}} - (U_k - U_{GS})^{\frac{3}{2}}}{\sqrt{U_k - U_{GS0}}} \right]$
	Zasićenje	$I_{Dzas} = G_0 \cdot \left[ U_{GS} - U_{GS0} - \frac{2}{3} \cdot \frac{(U_k - U_{GS0})^{\frac{3}{2}} - (U_k - U_{GS})^{\frac{3}{2}}}{\sqrt{U_k - U_{GS0}}} \right]$

# Dinamički parametri JFET-a (p-kanalni)

Parametar	Područje	Izraz
Strmina	Triodno	$g_m = G_0 \cdot \frac{\sqrt{U_k + U_{GS}} - \sqrt{U_k + U_{GS} - U_{DS}}}{\sqrt{U_k + U_{GS0}}}$
	Zasićenje	$g_m = G_0 \cdot \left( 1 - \frac{\sqrt{U_k + U_{GS}}}{\sqrt{U_k + U_{GS0}}} \right)$
Izlazna dinamička vodljivost	Triodno	$g_d = G_0 \cdot \left( 1 - \sqrt{\frac{U_k + U_{GS} - U_{DS}}{U_k + U_{GS0}}} \right)$
	Zasićenje	$g_d = I_D \cdot \lambda$
Faktor pojačanja		$\mu = \frac{g_m}{g_d}$

# Dinamički parametri JFET-a (p-kanalni)

Parametar	Područje	Izraz
Struja	Triodno	$-I_D = G_0 \cdot \left[ -U_{DS} - \frac{2}{3} \cdot \frac{(U_k + U_{GS} - U_{DS})^{\frac{3}{2}} - (U_k + U_{GS})^{\frac{3}{2}}}{\sqrt{U_k + U_{GS0}}} \right]$
	Zasićenje	$-I_{Dzas} = G_0 \cdot \left[ -U_{GS} + U_{GS0} - \frac{2}{3} \cdot \frac{(U_k + U_{GS0})^{\frac{3}{2}} - (U_k + U_{GS})^{\frac{3}{2}}}{\sqrt{U_k + U_{GS0}}} \right]$

## Zadatak 26.

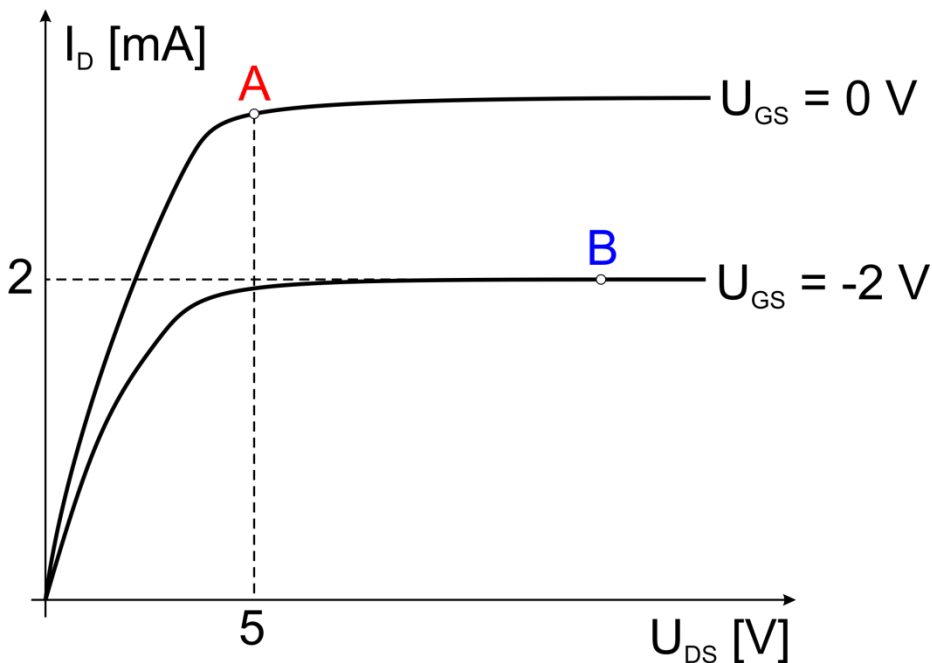
- Za silicijski n-kanalni JFET zadano je:  $N_A=10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ,  $N_D=10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ,  $a=3 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $L/w=1$ ,  $T=300 \text{ K}$ . Odrediti:
  - a) Vodljivost potpuno otvorenog kanala;
  - b) Poluširinu  $b$  i vodljivost pri naponu  $U_{GS}=1/2 U_{GS0}$ .

### ✓ Rješenje:

- a)  $G_0=1,33 \cdot 10^{-4} \text{ A/V}$ ;
- b)  $b=0,7725 \text{ }\mu\text{m}$ ;  $G=34,3 \cdot 10^{-6} \text{ A/V}$  .

## Zadatak 27.

- Zadane su izlazne karakteristike silicijskog n-kanalnog JFET-a. Treba odrediti sve dinamičke parametre u tačkama A i B, ako je poznato:  $N_A = 1,2 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ,  $N_D = 2 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ,  $a = 2 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $\lambda = 0,01 \text{ V}^{-1}$ ,  $T = 300 \text{ K}$ .



### ✓ Rješenje:

$$\begin{aligned} g_{mA} &= 2,29 \text{ mA/V}; & g_{dA} &= 0,137 \text{ mA/V}; \\ r_{dA} &= 7,3 \text{ k}\Omega; & \mu_A &= 16,7; \\ g_{mB} &= 1,24 \text{ mA/V}; & g_{dB} &= 0,02 \text{ mA/V}; \\ r_{dB} &= 50 \text{ k}\Omega; & \mu_B &= 62,2. \end{aligned}$$

## Zadatak 28.

- Za silicijski p-kanalni FET zadano je:  $N_A=10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ,  $N_D=5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ,  $a=1 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $w/L=10$ ,  $T=300 \text{ K}$ . Odrediti struju odvoda  $I_D$  i strminu pri naponu  $U_{DS}=-6 \text{ V}$  i naponima  $U_{GS}=0 \text{ V}$ , i  $U_{GS}=2 \text{ V}$ .

✓ Rješenje:

a)  $I_{DA}=2,57 \text{ mA}$ ;  $g_{mA}=0,826 \text{ mA/V}$ ;

b)  $I_{DB}=1,2 \text{ mA}$ ;  $g_{mB}=0,534 \text{ mA/V}$  .

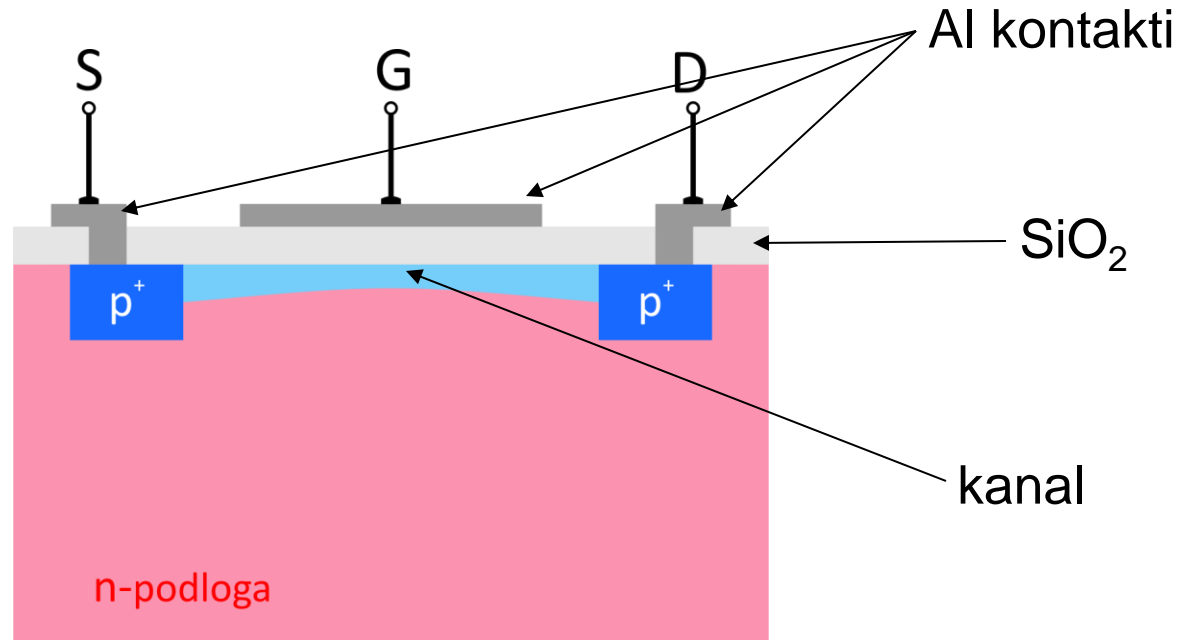
# MOSFET

- Izvedbe:
  - n-kanalni na p-podlozi
  - p-kanalni na n-podlozi
- Podloga: Si (mala gustoća nečistoća)
- Područja uvoda i odvoda: Si (velika gustoća nečistoća), suprotnog tipa od podloge
- Kanal: dio poluvodiča između uvoda i odvoda
- Struja kroz kanal može teći samo ako je on istog tipa kao uvod i odvod – na podlozi se mora stvoriti **inverzijski sloj**.



# Struktura MOSFET-a

- P-kanalni

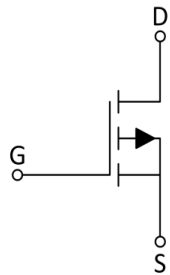


# Tipovi MOSFET-a

- Obogaćeni tip: potrebno je stvoriti inverzijski sloj (kanal)
  - Obogaćeni mod
- Osiromašeni tip: inverzijski sloj je stvoren tehnološkim postupkom
  - Obogaćeni mod – dodatno obogaćivanje kanala
  - Osiromašeni mod – osiromašivanje kanala

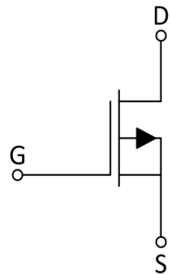
# Simbol MOSFET-a

- **p**-kanalni MOSFET na **n**-podlozi



P-kanalni MOSFET  
obogaćenog tipa

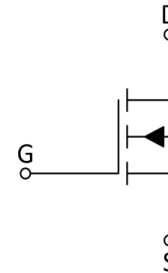
$$U_{GS} < U_{GS0} < 0$$



P-kanalni MOSFET  
osiromašenog tipa

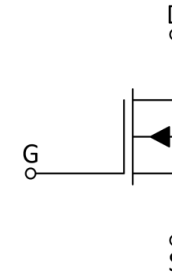
$$U_{GS} < U_{GS0} \\ 0 < U_{GS0}$$

- **n**-kanalni MOSFET na **p**-podlozi



N-kanalni MOSFET  
obogaćenog tipa

$$U_{GS} > U_{GS0} > 0$$



P-kanalni MOSFET  
osiromašenog tipa

$$U_{GS} > U_{GS0} \\ 0 > U_{GS0}$$

# Dinamički parametri MOSFET-a (n-kanalni)

Parametar	Područje	Izraz
Strmina	Triodno	$g_m = K \cdot U_{DS}$
	Zasićenje	$g_m = K \cdot (U_{GS} - U_{GS0})$
Izlazna dinamička vodljivost	Triodno	$g_d = K \cdot (U_{GS} - U_{GS0} - U_{DS})$
	Zasićenje	$g_d = I_D \cdot \lambda$
Faktor pojačanja		$\mu = \frac{g_m}{g_d}$

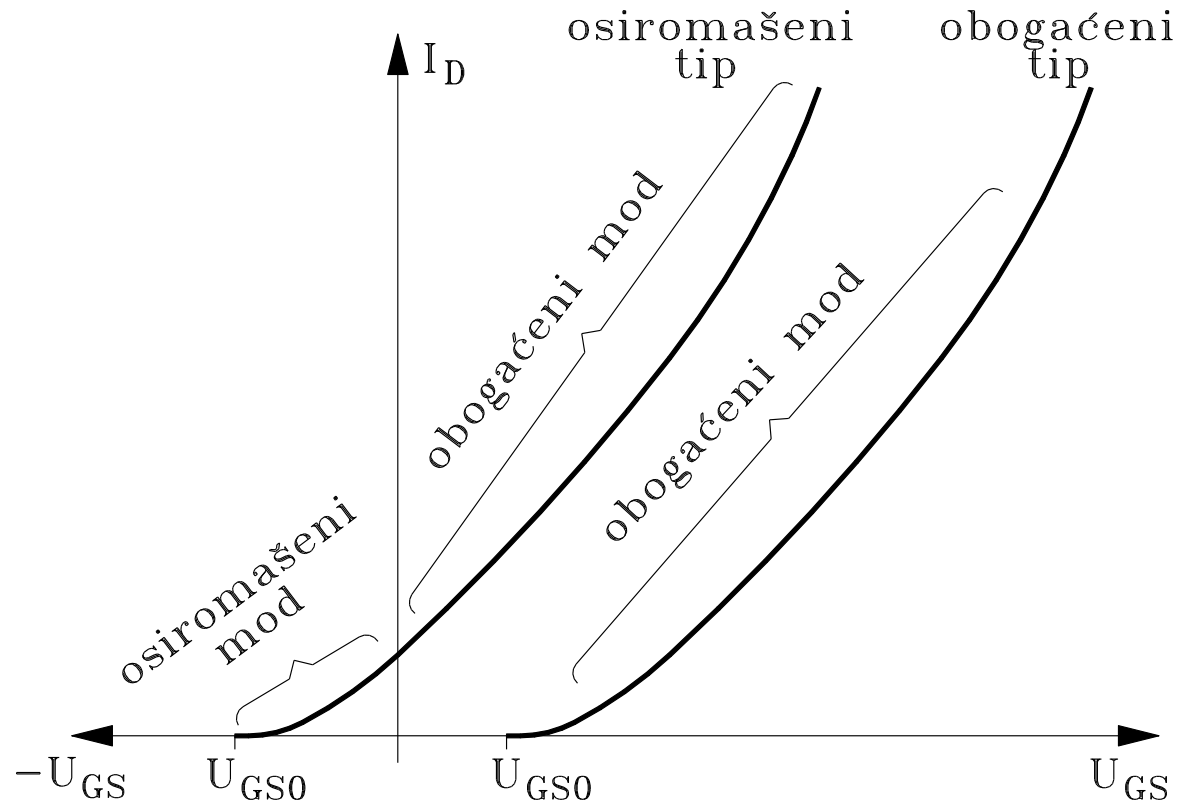
$$K = \frac{\mu_{nk} \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{ox} \cdot W}{t_{ox} \cdot L} \quad \dots \text{konstanta tranzistora}$$

# Dinamički parametri MOSFET-a (p-kanalni)

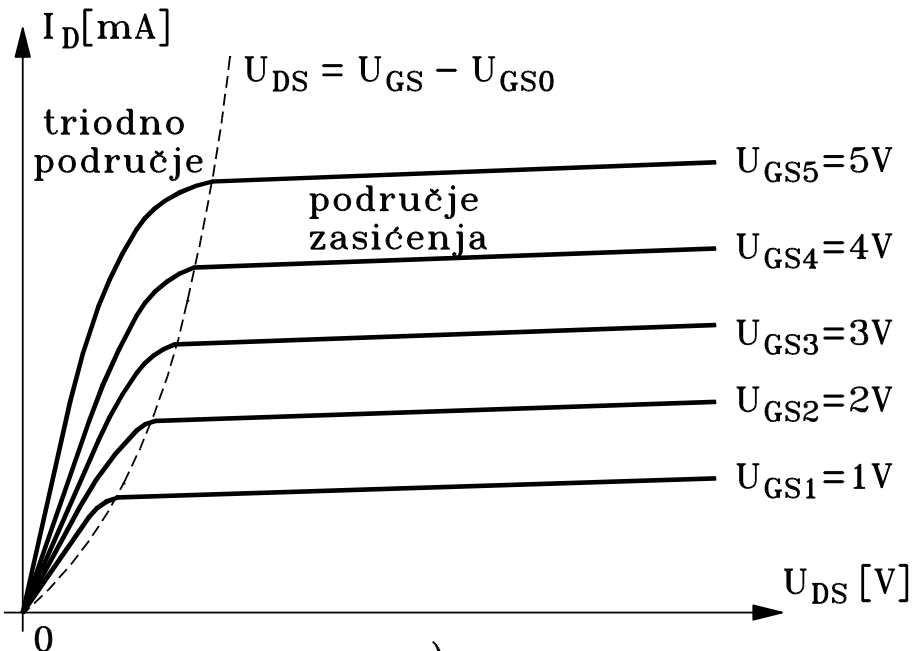
Parametar	Područje	Izraz
Strmina	Triodno	$g_m = K \cdot (-U_{DS})$
	Zasićenje	$g_m = K \cdot (-U_{GS} + U_{GS0})$
Izlazna dinamička vodljivost	Triodno	$g_d = K \cdot (-U_{GS} + U_{GS0} + U_{DS})$
	Zasićenje	$g_d = I_D \cdot \lambda$
Faktor pojačanja		$\mu = \frac{g_m}{g_d}$

$$K = \frac{\mu_{pk} \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{ox} \cdot W}{t_{ox} \cdot L} \quad \dots \text{konstanta tranzistora}$$

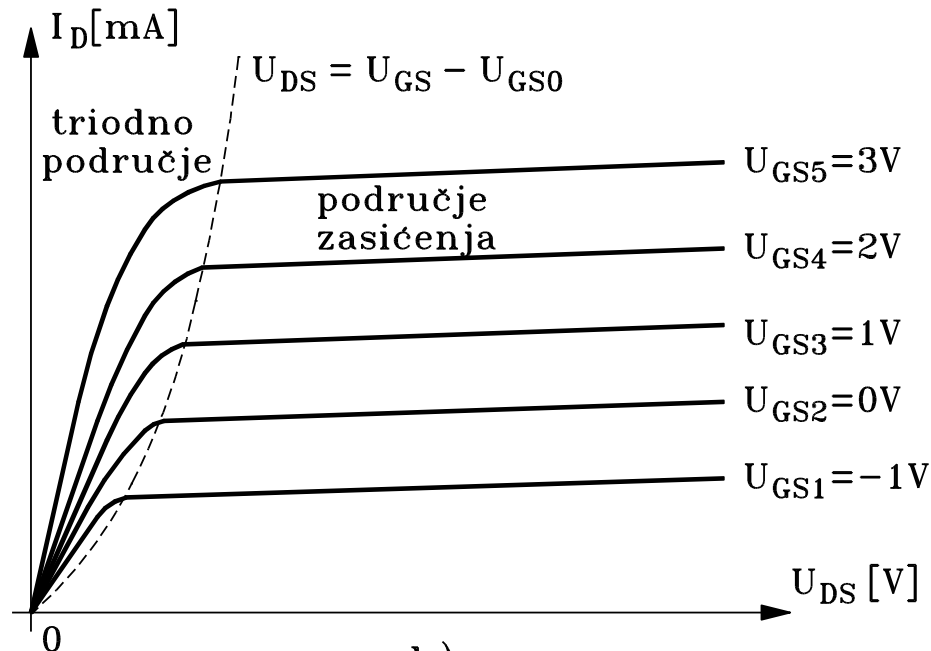
# Prijenosne karakteristike



# Izlazne karakteristike



a)



b)

$$I_D = K \cdot \left[ (U_{GS} - U_{GS0}) \cdot U_{DS} - \frac{1}{2} \cdot U_{DS}^2 \right] \quad \dots \text{triодно područje}$$

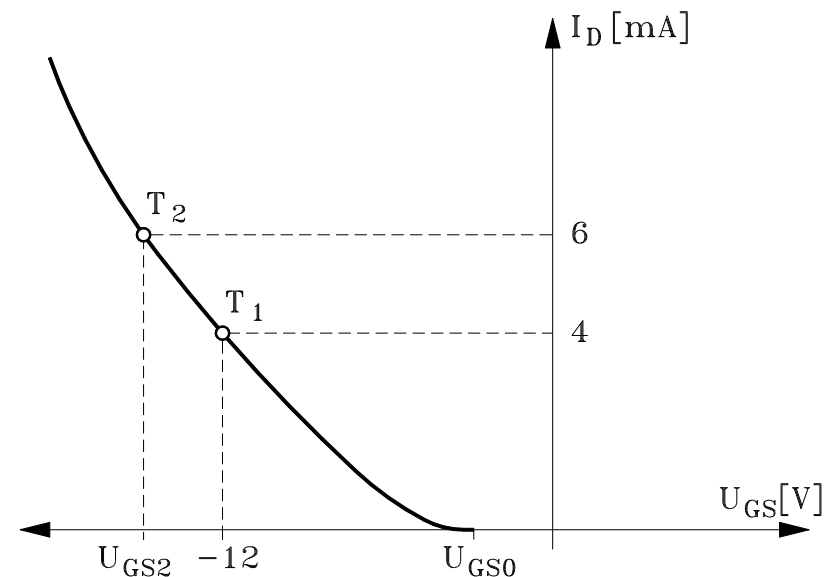
$$I_D = \frac{K}{2} \cdot (U_{GS} - U_{GS0})^2 \quad \dots \text{područje zasićenja}$$

## Zadatak 29.

- Zadana je prijenosna karakteristika MOSFET-a u zasićenju. Odrediti dinamičke parametre u točki  $T_2$ . Zadano je:  $N_D=10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ,  $\epsilon_{ox}=3,82$ ,  $t_{ox}=0,1 \text{ } \mu\text{m}$ ,  $w/L=10$ ,  $\lambda=0,01 \text{ V}^{-1}$ ,  $T=300 \text{ K}$ , a pokretljivost u kanalu je upola manja od pokretljivosti u podlozi.

### ✓ Rješenje:

$K=7,64 \cdot 10^{-5} \text{ A/V}^2$ ;  $U_{GS0}=-1,77 \text{ V}$ ;  
 $U_{GS2}=-14,3 \text{ V}$ ;  $g_{m2}=0,957 \text{ mA/V}$ ;  
 $g_{d2}=0,06 \text{ mA/V}$ ;  $r_{d2}=16,67 \text{ k}\Omega$ ;  
 $\mu_2=15,96$ .





## Zadatak 30.

- Za MOSFET čija je prijenosna karakteristika dana na slici, zadani su podaci:  $N_A=5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ,  $\epsilon_{\text{ox}}=3,82$ ,  $t_{\text{ox}}=0,1 \text{ } \mu\text{m}$ ,  $w/L=5$ ,  $\lambda=0,01 \text{ V}^{-1}$ ,  $T=300 \text{ K}$ ,  $\mu_{nk}=1/2 \mu_{nv}$ . Izračunati dinamičke parametre u točkama:
- $U_{GS}=6 \text{ V}$ ,  $U_{DS}=1,8 \text{ V}$
- $U_{GS}=6 \text{ V}$ ,  $U_{DS}=8 \text{ V}$

### ✓ Rješenje:

$$K=1,1 \cdot 10^{-4} \text{ A/V}^2;$$

$$1) g_{m1}=1,98 \cdot 10^{-4} \text{ A/V}; g_{d1}=2,2 \cdot 10^{-5} \text{ A/V};$$

$$r_{d1}=45,5 \text{ k}\Omega; \mu_1=9;$$

$$2) g_{m2}=2,2 \cdot 10^{-4} \text{ A/V}; g_{d2}=2,2 \cdot 10^{-6} \text{ A/V};$$

$$r_{d2}=454,5 \text{ k}\Omega; \mu_2=100.$$

