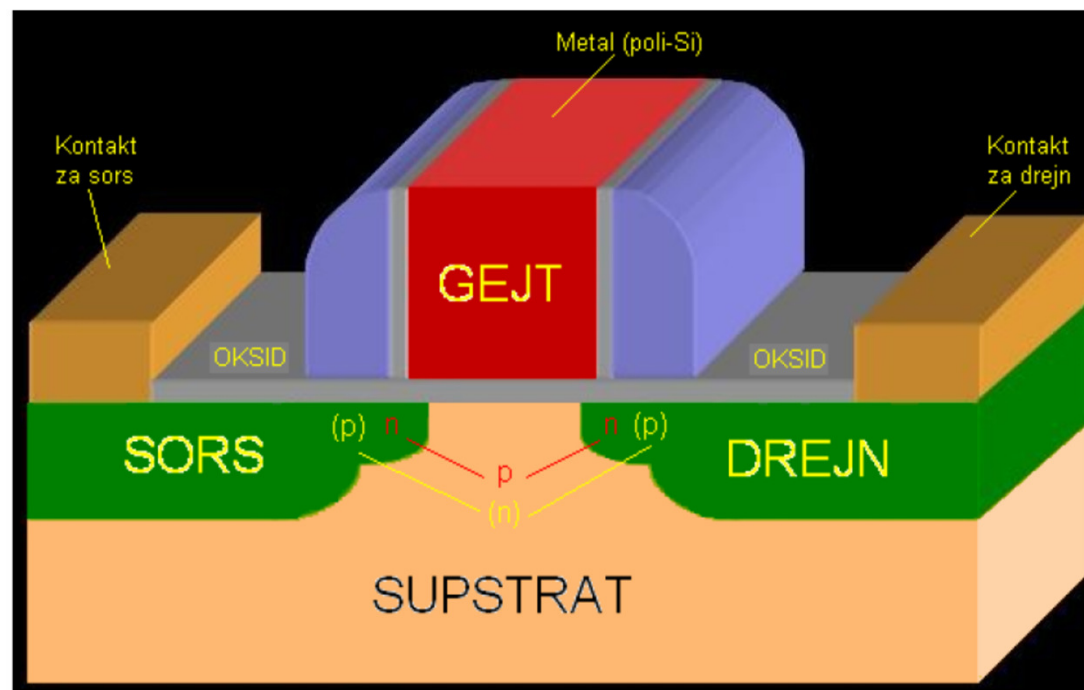


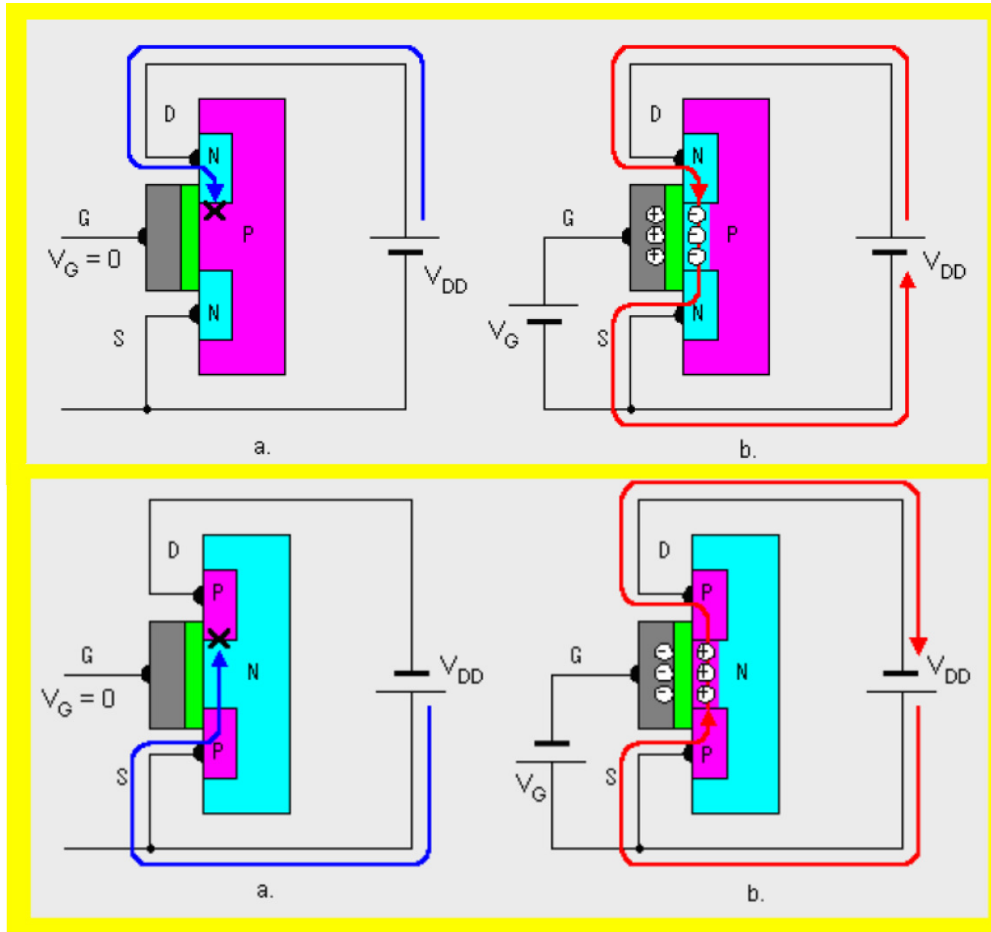
# MOSFET tranzistori

# MOS tranzistor



## Model MOS tranzistora

Da se podsetimo



## MOS tranzistor

nMOS

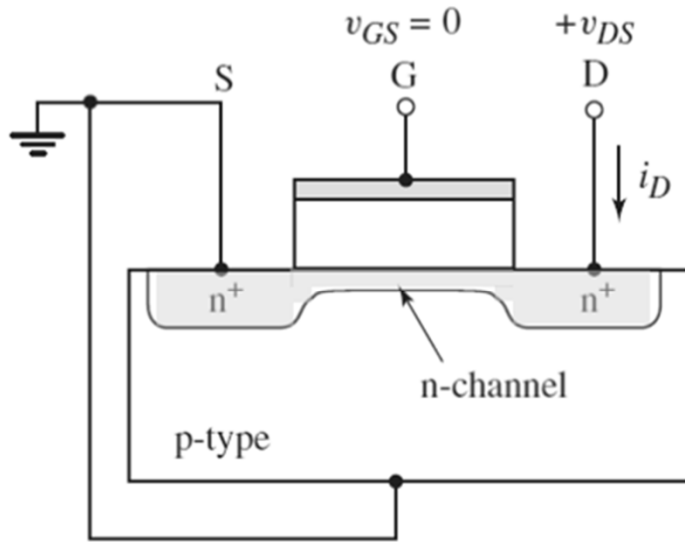
Vodi za  $V_G > 0$

pMOS

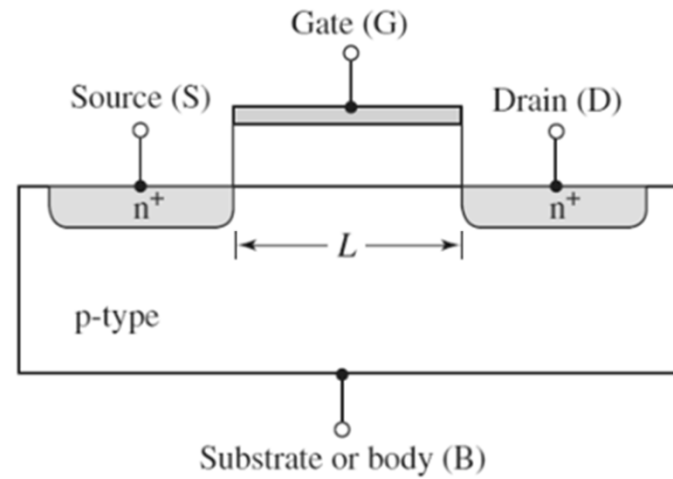
Vodi za  $V_G < 0$

## Model MOS tranzistora

---



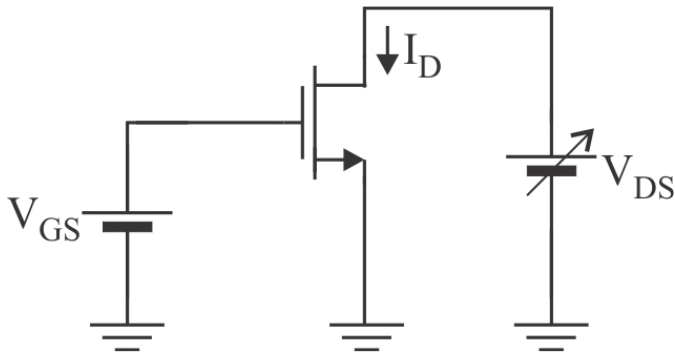
MOSFET sa ugrađenim kanalom



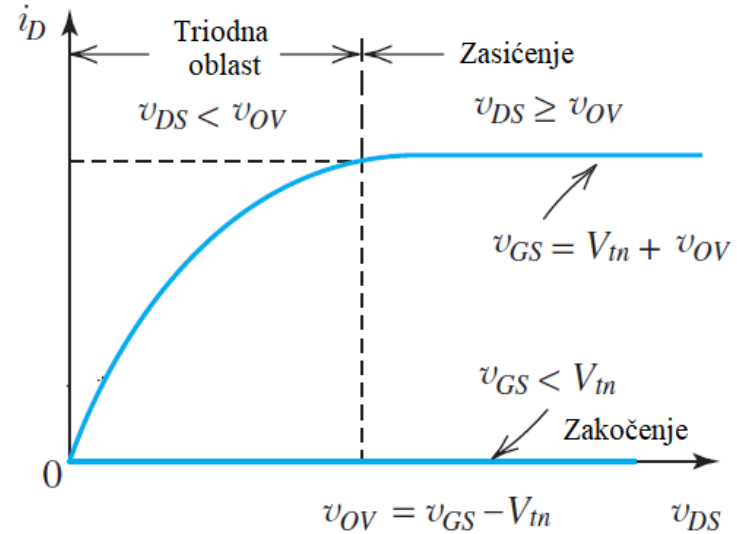
MOSFET sa indukovanim kanalom

## Model MOS tranzistora

### Režimi rada n-kanalong MOSFET-a



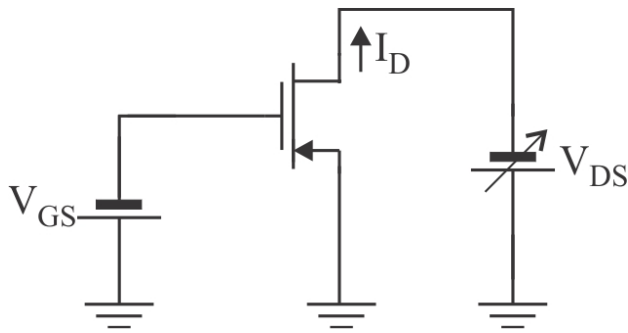
$V_{tn}$  je napon praga provođenja.



| Režimi rada MOSFET |                               | $V_{GS}$          | $V_{DS}$                   |
|--------------------|-------------------------------|-------------------|----------------------------|
|                    | Zakočenje                     | $V_{GS} < V_{tn}$ |                            |
| Vodi               | Zasićenje                     | $V_{GS} > V_{tn}$ | $V_{DS} > V_{GS} - V_{tn}$ |
|                    | Omska oblast (triodna oblast) | $V_{GS} > V_{tn}$ | $V_{DS} < V_{GS} - V_{tn}$ |

## Model MOS tranzistora

### Režimi rada p-kanalng MOSFET-a



Jednosmerna struja drejna teče od sorsa ka drejnu jer su nosioci nalektrisanja šupljine. Polariteti napona na pristupima tranzistora su suprotni u odnosu na one koji se koriste kod n-kanalnog FET-a.

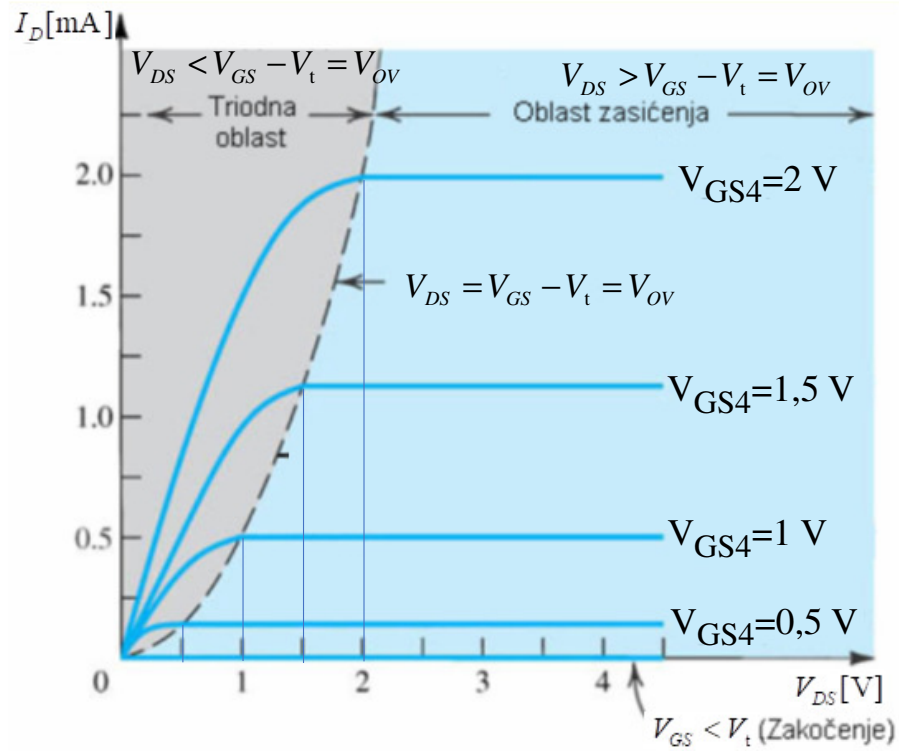
$V_{tp}$  je napon praga provođenja.

| Režimi rada MOSFET |                               | $V_{GS}$          | $V_{DS}$                   |
|--------------------|-------------------------------|-------------------|----------------------------|
| Zakočenje          |                               | $V_{GS} > V_{tp}$ |                            |
| Vodi               | Zasićenje                     | $V_{GS} < V_{tp}$ | $V_{DS} < V_{GS} - V_{tp}$ |
|                    | Omska oblast (triodna oblast) | $V_{GS} < V_{tp}$ | $V_{DS} > V_{GS} - V_{tp}$ |

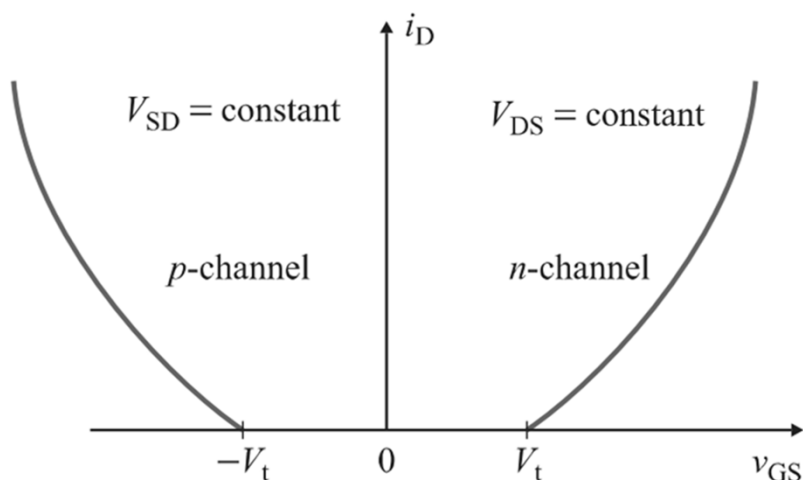
## Model MOS tranzistora

Da se podsetimo

### Izlazne karakteristike MOSFET-a

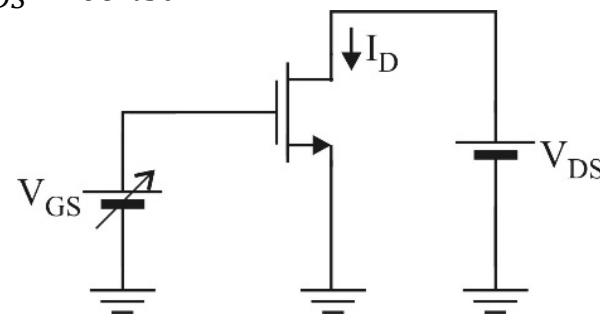


## Prenosna karakteristika MOSFET-a



Prenosna karakteristika je zavisnost struje drejna od napona između gejta i sorsa pri konstantnom naponu između drejna i sorsa.

$$i_D = f(v_{GS})|_{v_{DS} = \text{const}}$$



Kod n-kanalnog MOSFET-a struja drejna raste sa porastom ulaznog napona  $V_{GS}$  (desna karakteristika).

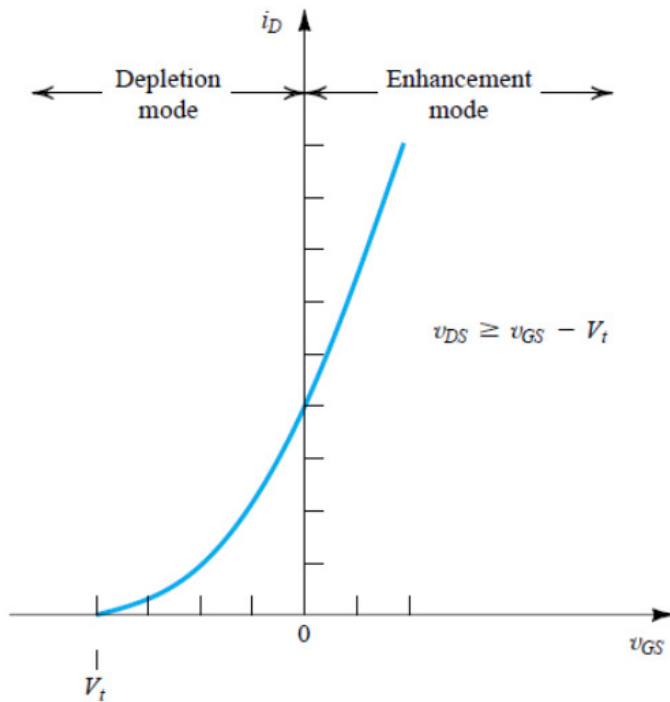
Kod p-kanalnog MOSFET-a je obrnuto, struja drejna raste što je negativniji napon  $V_{GS}$  (leva karakteristika).

Na slici su prikazane prenosne karakteristike MOSFET tranzistora sa indukovanim kanalima.

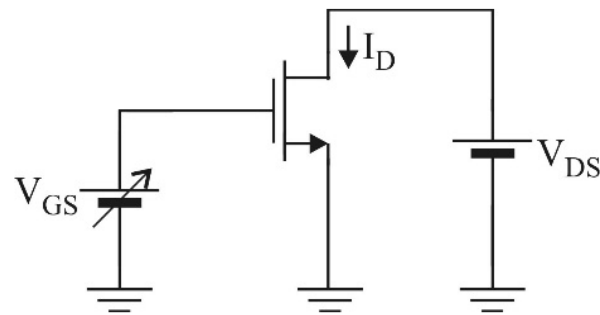


## Prenosna karakteristika MOSFET-a

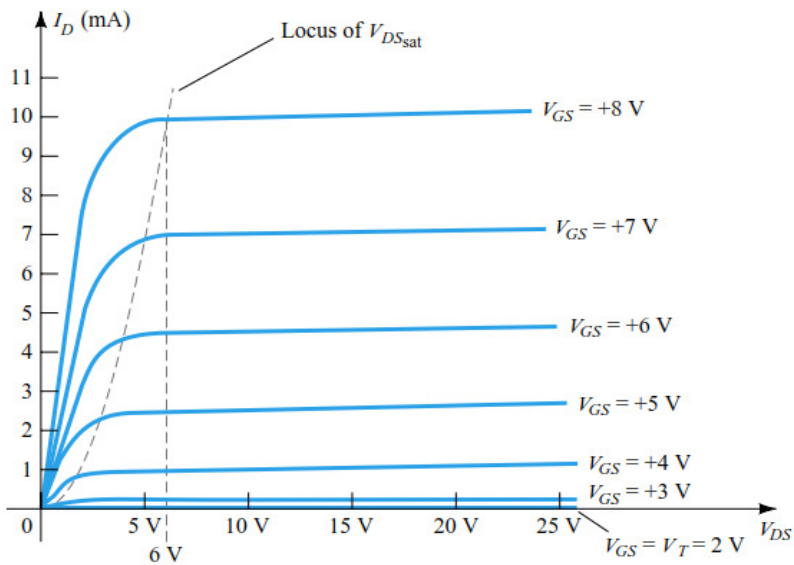
Prenosna karakteristika n-kanalnog MOSFET-a sa ugrađenim kanalom. Kod ove komponente napon praga provođenja,  $V_t$ , je negativan.



$$i_D = f(v_{GS}) \Big|_{v_{DS} = const}$$

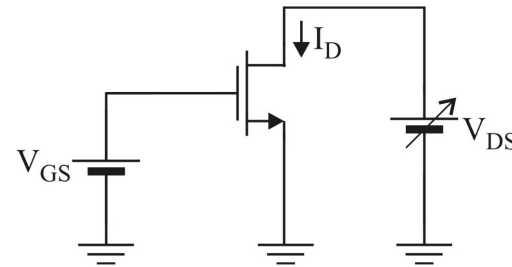


## Izlazna karakteristika MOSFET-a



Izlazna karakteristika je zavisnost struje drejna od napona između drejna i sorsa pri konstantnom naponu između gejta i sorsa.

$$i_D = f(v_{DS})|_{v_{GS} = const}$$

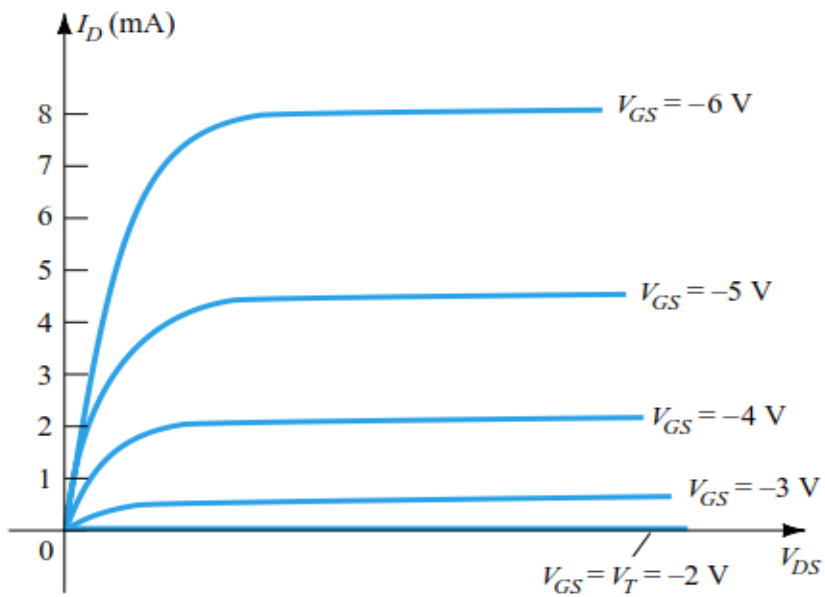


Kod n-kanalnog MOSFET-a struja drejna raste sa porastom ulaznog napona  $V_{GS}$ .

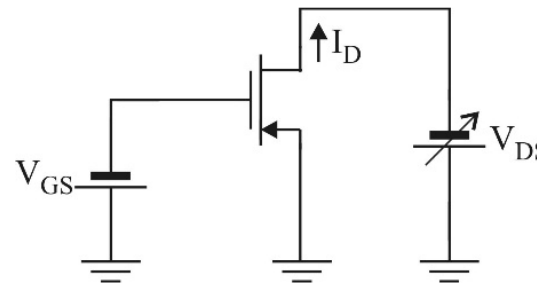
## Izlazna karakteristika MOSFET-a

---

Kod p-kanalnog MOSFET-a je struja drejna raste što je negativniji napon VGS.



$$i_D = f(v_{DS})|_{v_{GS} = const}$$



## Strujno naponske zavisnosti za MOSFET

Strujno naponska karakteristika u triodnoj oblasti:

$$I_D = k_n' \frac{W}{L} \left[ (V_{GS} - V_t) \cdot V_{DS} - \frac{1}{2} V_{DS}^2 \right]$$

Linearna oblast za:

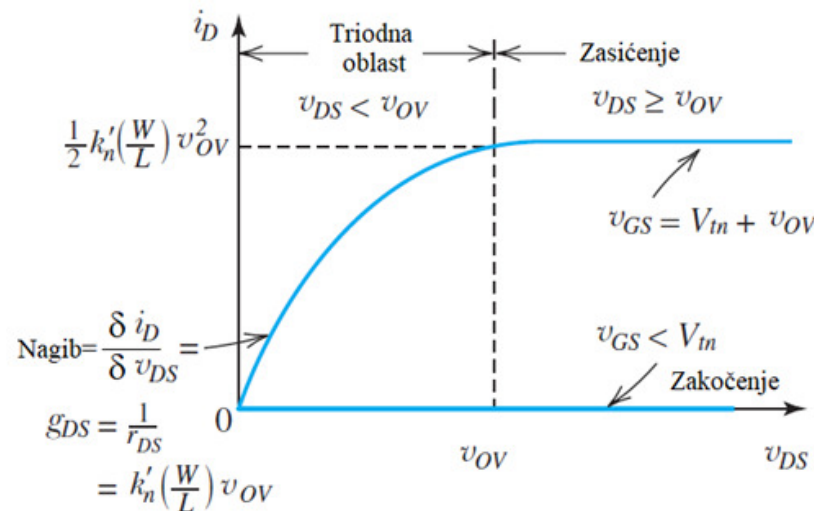
$$V_{DS} \ll V_{GS} - V_t$$

$$I_D \approx k_n' \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t) \cdot V_{DS}$$

U ovoj oblasti tranzistor se ponaša kao otpornik kontrolisan naponom.

Strujno naponska karakteristika u oblasti zasićenja:

$$I_D = \frac{1}{2} k_n' \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t)^2$$

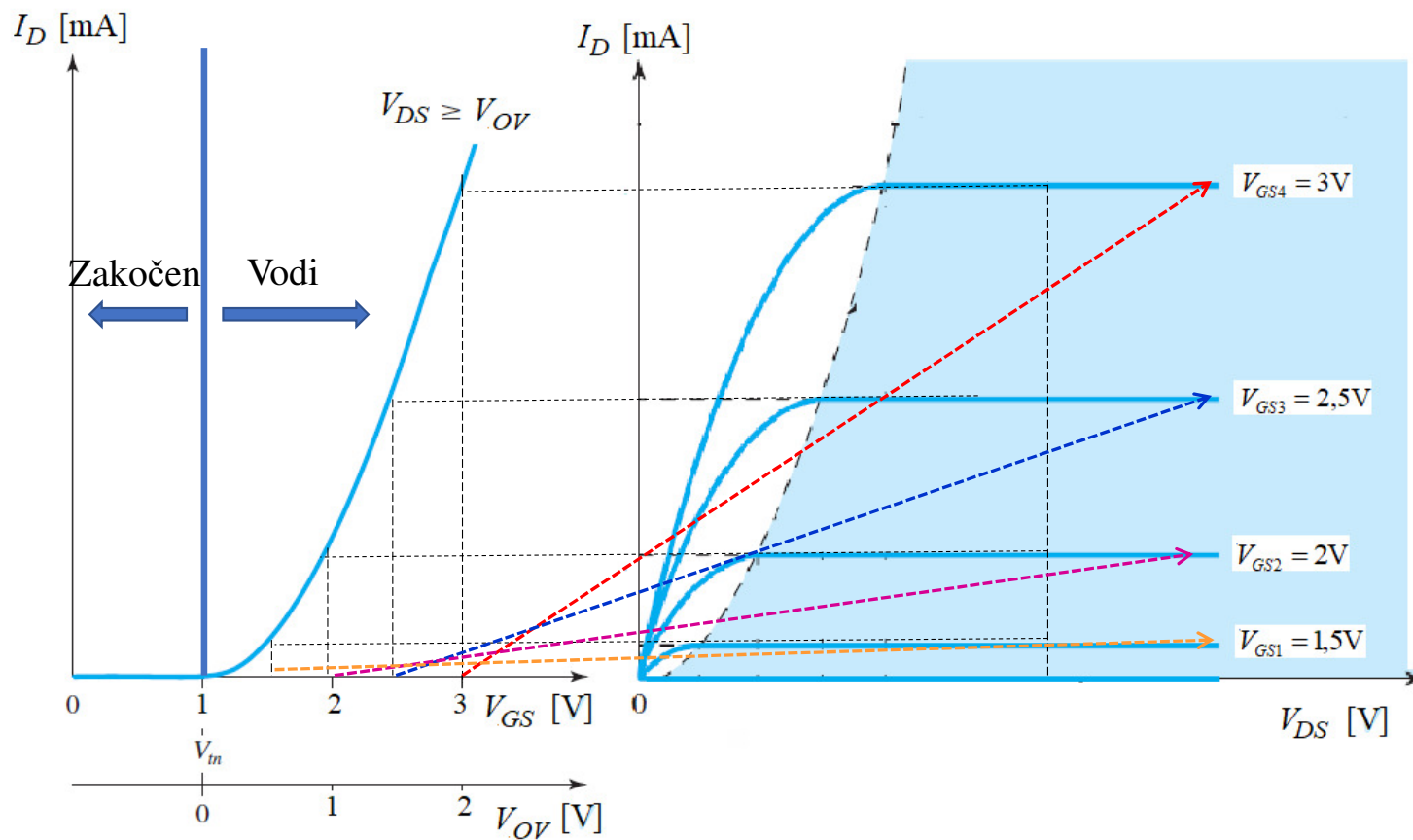


$$k_n' = \mu_n \cdot C_{ox}$$

$k_n'$  je transkonduktanski parameter  
 $C_{ox}$  je kapacitivnost gejta po jedinici površine  
 $\mu_n$  je pokretljivost nosilaca naelektrisanja (kod n-kanalnih tranzistora pokretljivost elektrona, kod p-kanalnih šupljina)

## Model MOS tranzistora

### Da se podsetimo: Prenosna karakteristika MOSFET-a



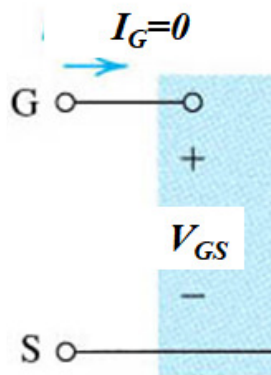
## Model za velike signale - DC model u oblasti zasićenja

---

Na ulazu za sve oblasti važi:

$$I_G = 0$$

Model: Strujni generator  $I_G = 0$ ; prekid u kolu



## Model za velike signale - DC model u oblasti zasićenja

Važi za:  $V_{GS} > V_t$   
 $V_{DS} > V_{GS} - V_t = V_{OV}$

$$I_D = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t)^2,$$

$$I_D = \frac{1}{2} k_n' \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t)^2,$$

$$I_D = A(V_{GS} - V_t)^2,$$

$C_{ox}$  je kapacitivnost gejta po jedinici površine

$\mu_n$  je pokretljivost nosilaca naelektrisanja

$W$  je širina kanala

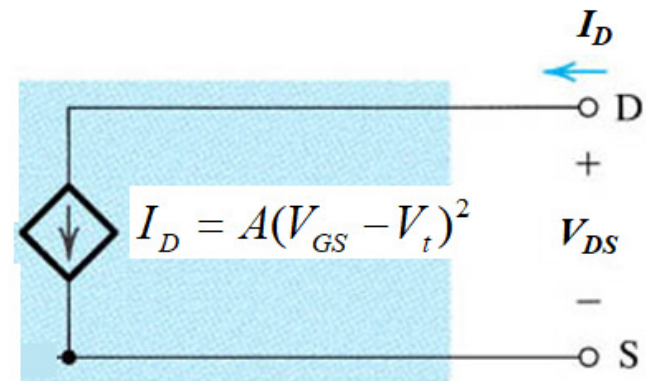
$L$  je dužina kanala

$K_n$  je funkcija tehnološkog postupka ( $10\text{mA/V}^2$ )

Model:

NELINEARNI Strujni generator

$I_D$  kontrolisan naponom  $V_{GS}$



$I_D$  **ne zavisi** od  $V_{DS}$

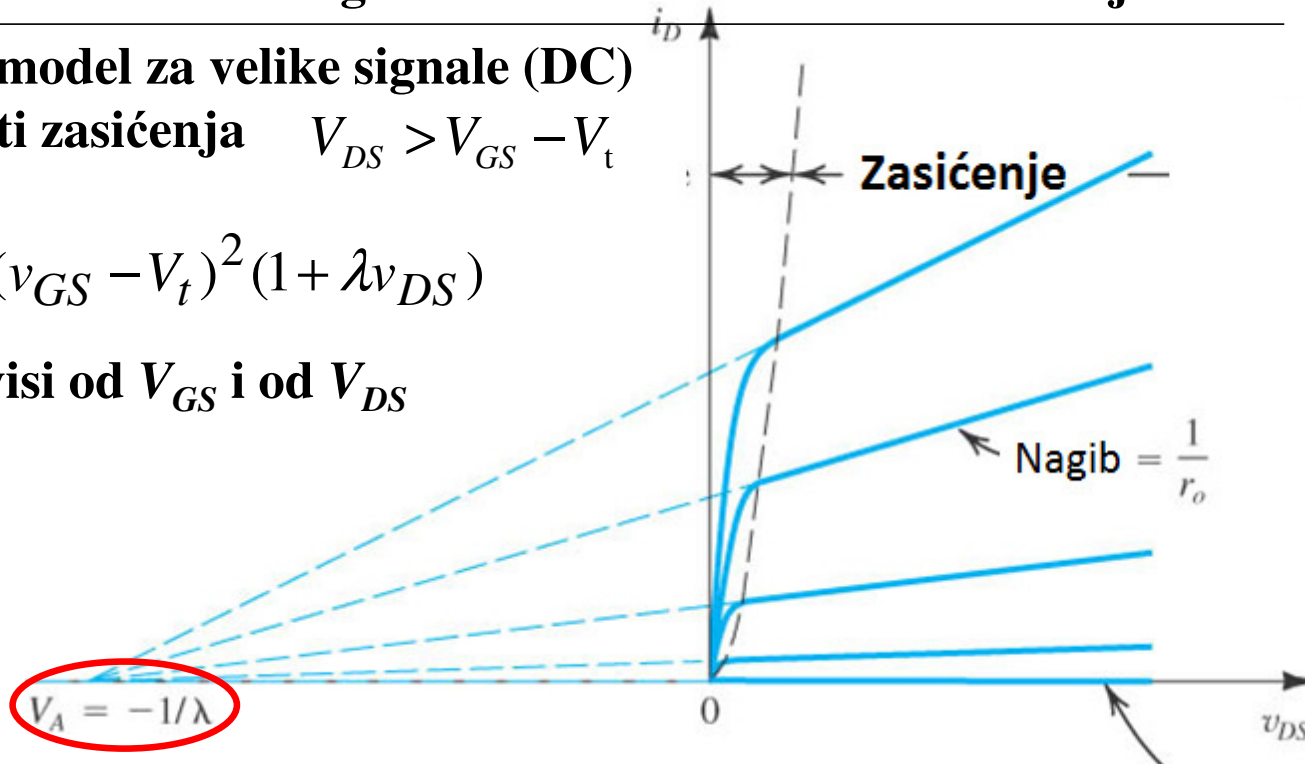
$I_D$  **zavisi** od  $V_{GS}$

## Model za velike signale - DC model u oblasti zasićenja

Realni model za velike signale (DC)  
u oblasti zasićenja  $V_{DS} > V_{GS} - V_t$

$$I_D = A(v_{GS} - V_t)^2(1 + \lambda v_{DS})$$

$I_D$  zavisi od  $V_{GS}$  i od  $V_{DS}$



$$I_D = A(v_{GS} - V_t)^2 \left(1 + \frac{v_{DS}}{V_A}\right) \quad \left\{ V_A = \frac{1}{\lambda} \right\}$$

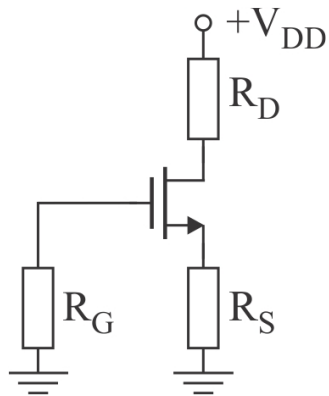
Efektivna dužine kanala zavisi od izlaznog napona  $v_{DS}$ . Kao posledica ove činjenice i struja drejna zavisi od napona  $v_{DS}$ .



## Jednosmerni režim rada MOSFET-a

### Automatska polarizacija u sorsu

- Ovaj tip polarizacije primenjiv je na MOSFET sa ugrađenim kanalom ( $V_t < 0$ ). Otpornost u kolu sorsa  $R_S$  dimenzioniše se na takav način da se na sorsu dobije negativna vrednost napona  $V_{GS}$ .



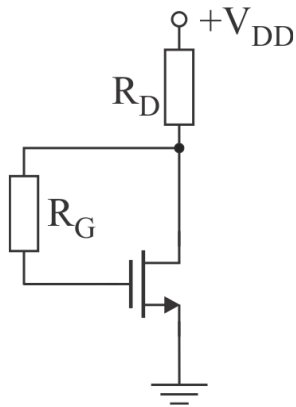
$$\begin{aligned} V_G &= 0 \\ V_S &= -R_S \cdot I_D \\ \hline V_{GS} &= R_S \cdot A \cdot (V_{GS} - V_t)^2 \end{aligned}$$

## Jednosmerni režim rada MOSFET-a

### Polarizacija tranzistora sa indukovanim kanalom

Ovaj tip polarizacije primenjiv je na MOSFET-ove sa indukovanim kanalom ( $V_t > 0$ ). Kroz otpornik koji povezuje gejta i drejna ne teče jednosmerna struja tako da je praktično potencijal gejta izjednačen sa potencijalom drejna, a samim tim obezbeđeno da je tranzistor uvek u zasićenju ( $V_{DS} > V_{GS} - V_t$ ). Prednost ove povratne sprege je stabilizacija radne tačke koja se uspostavlja povratnom spregom preko otpornika  $R_G$ . Nedostatak je što se ovim otpornikom umanjuje ulazna otpornost kola.

$$I_D \nearrow, V_D \searrow, V_G \searrow, V_{GS} \searrow, I_D \searrow$$



$$V_G = V_D = V_{DD} - R_D I_D$$

$$I_D = A \cdot (V_{GS} - V_t)^2$$

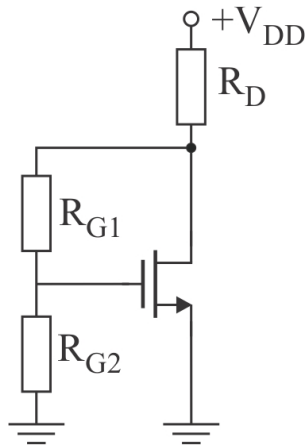
$$V_{GS} = V_{DD} - R_D \cdot A \cdot (V_{GS} - V_t)^2$$

$V_{GS}$  se određuje rešavanjem kvadratne jednačine pri čemu se uzima rešenje koje ima fizički smisao a to je  $V_{GS} > V_t$

## Jednosmerni režim rada MOSFET-a

### Polarizacija tranzistora sa indukovanim kanalom

- Ukoliko je zbog linearnosti ili maksimalnog naizmeničnog napona na izlazu potrebno podesiti radnu tačku tako da  $V_{DS} \neq V_{GS}$  uvodi se dodatni otpornik između gejta i mase  $R_{G2}$ . Na ovaj način  $V_{GS}$  će moći da se podešava nezavisno od napona  $V_{DS}$ .



$$V_G = V_D \cdot \frac{R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}}$$
$$V_D = V_{DD} - R_D \cdot I_D$$

---

$$R_D \cdot A \cdot (V_{GS2} - V_t)^2 + V_{GS} \left( \frac{R_{G1} + R_{G2}}{R_{G2}} \right) - V_{DD} = 0$$

$V_{GS}$  se određuje rešavanjem kvadratne jednačine pri čemu se uzima rešenje koje ima fizički smisao a to je  $V_{GS} > V_t$

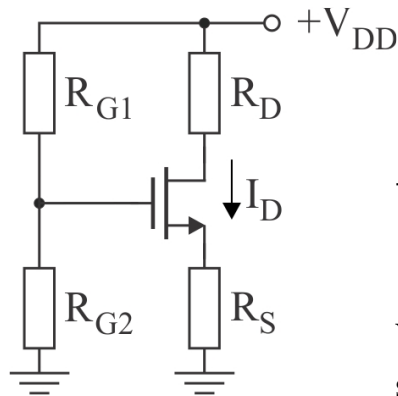
## Jednosmerni režim rada MOSFET-a

### Polarizacija sa četiri otpornika

Otpornikom  $R_S$  uspostavlja se povratna sprega koja stabilše radnu tačku tranzistora. Ona deluje na takav način da umanjuje promene struje drejna usled spojnjih uticaja.

$$I_D \nearrow, V_S \nearrow, V_{GS} \searrow, I_D \searrow$$

Razdelnikom napona  $R_{G1}$  i  $R_{G2}$  podešava se potencijal gejta nezavisno od struje drejna. Za ove otpornike se usvajaju vrlo velike vrednosti da nebi umanjili ukupno naponsko pojačanje i ulaznu otpornost.



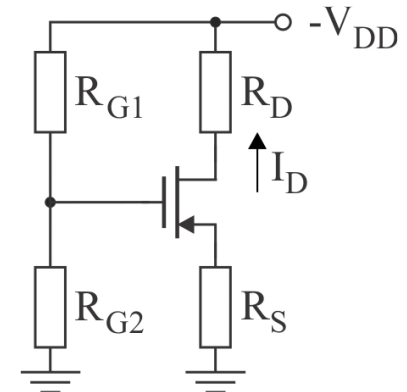
$$V_G = \frac{R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} V_{DD}$$

$$V_S = R_S \cdot I_D$$


---


$$R_S \cdot A \cdot (V_{GS} - V_t)^2 + V_{GS} - \frac{R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} V_{DD} = 0$$

$V_{GS}$  se određuje rešavanjem kvadratne jednačine pri čemu se uzima rešenje koje ima fizički smisao a to je  $V_{GS} > V_t$



## Jednosmerni režim rada MOSFET-a

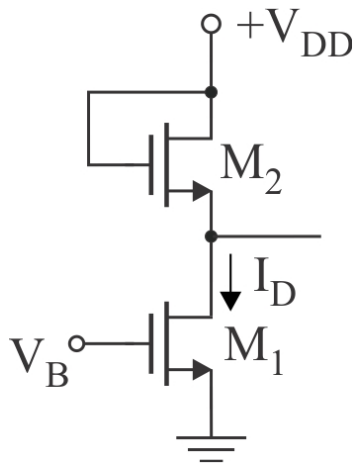
### Polarizacija MOSFETA i integrisanim kolima

- Za polarizaciju FET-a u integrisanim kolima prihvatljivija je primena tranzistora umesto otpornika jer zauzimaju manju površinu čipa.
- Za pojačanje signala u integrisanim kolima se uglavnom koriste n-kanalni tranzistori jer daju veću struju pri istoj širini kanala zahvaljujući većoj pokretljivosti elektrona u odnosu na šupljine ( $\mu_n=1350 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ,  $\mu_p=480 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ).
- Smanjenje površine čipa ima poseban značaj za primene MOSFET-a kao prekidača. Manja površina znači manju vrednost parazitnih kapacitivnosti.
- U integrisanim kolima se uglavnom koriste MOSFET-ovi sa indukovanim kanalom ( $V_t > 0$ ) jer je polarizacija ovih komponenata jednostavnija.

## Jednosmerni režim rada MOSFET-a

### Automatska polarizacija

- Ukoliko se kao opterećenje koristi n-kanalni MOSFET sa indukovanim kanalom on se povezuje na taj način da su gejt i drejn međusobno povezani. Tranzistor koji služi kao dinamičko opterećenje je uvek u režimu zasićenja (M2 na slici).

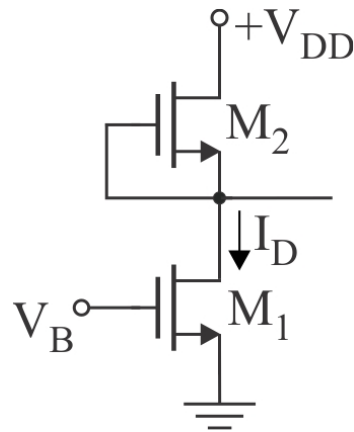


Kada se tranzistor koristi kao aktivno opterećenje mora se voditi računa o opsegu ulaznog i izlaznog napona. Pri određenom izlaznom ili ulaznom naponu ovaj tranzistor može da izađe iz odgovarajućeg režima rada.

## Jednosmerni režim rada MOSFET-a

### Automatska polarizacija

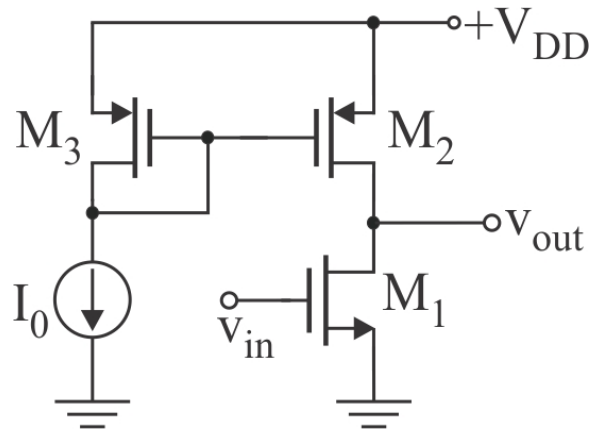
- Ukoliko se kao opterećenje koristi n-kanalni mosfet sa ugrađenim kanalom on se povezuje u kolu na taj način što su gejt i sors međusobno povezani. Ovaj način polarizacije je bolji od prethodnog jer se sa njim dobija veća vrednost dinamičke otpornosti.



## Jednosmerni režim rada MOSFET-a

### Polarizacija izvorom konstantne struje

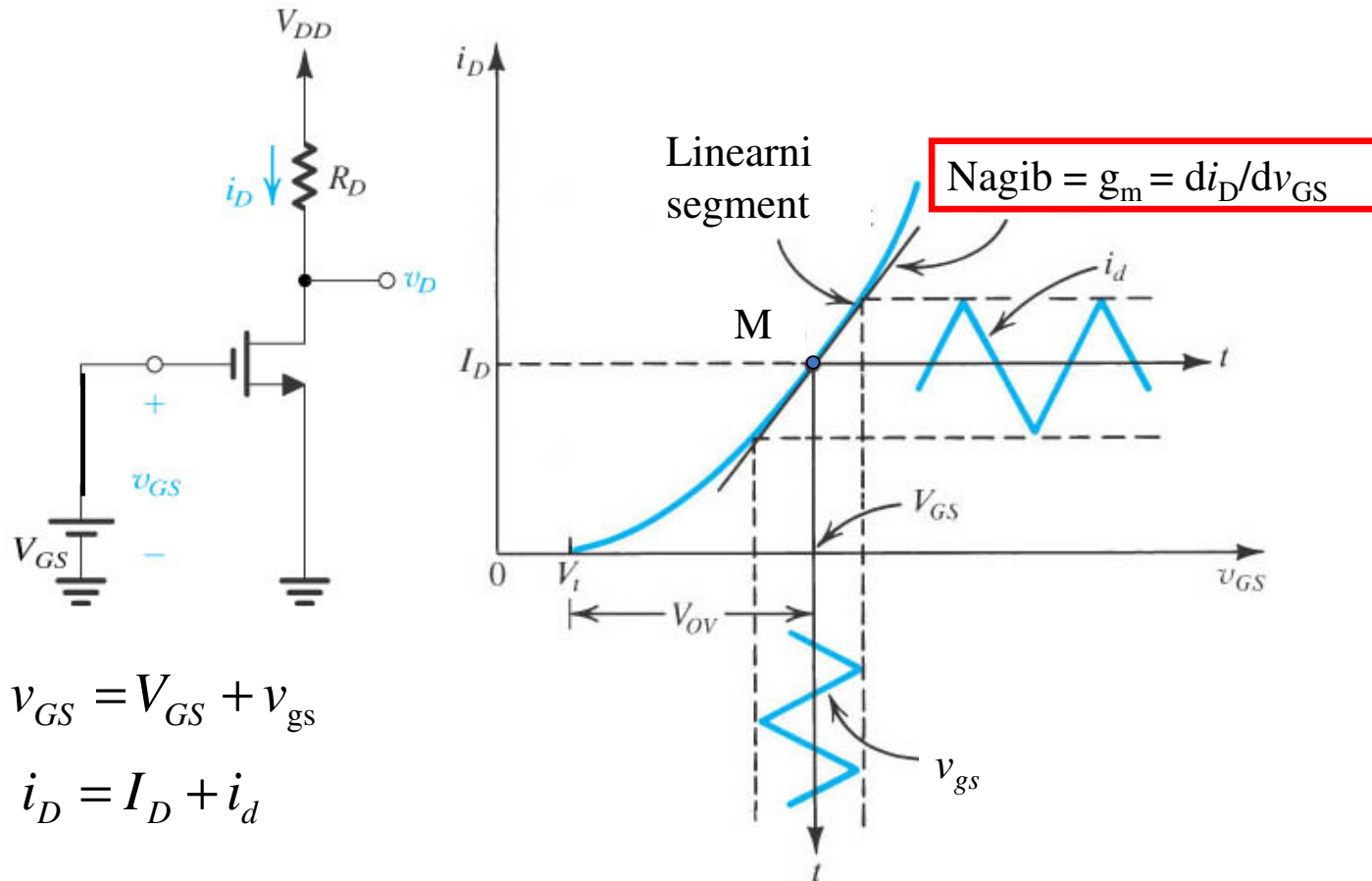
- Poboljšanje performansi pojačavača može se dobiti ukoliko se za pojačanje koristi n-kanalni tranzistor a kao opterećenje p-kanalni MOSFET. Kola u kojima se primenjuju oba tipa mosfeta nazivaju se CMOS kola (Complementary MOS).
- U komplementarnim mos pojačivačima kao pojačavač koristi se n-kanalni fet sa indukovanim kanalom (M1) a kao opterećenje p-kanalni fet sa indukovanim kanalom. Polarizacija p-kanalnog feta obavlja se pomoću strujnog ogledala (M2, M3 i izvor konstantne struje I). Najjednostavnije rešenje je da se na mestu jednosmernog izvora struje  $I_0$  koristi otpornik.





## Model MOS tranzistora

### Radna tačka – značenje modela za male signale



$$v_{GS} = V_{GS} + v_{gs}$$

$$i_D = I_D + i_d$$

## Modela za male signale u oblasti zasićenja

### Izlazna otpornost MOSFET-a

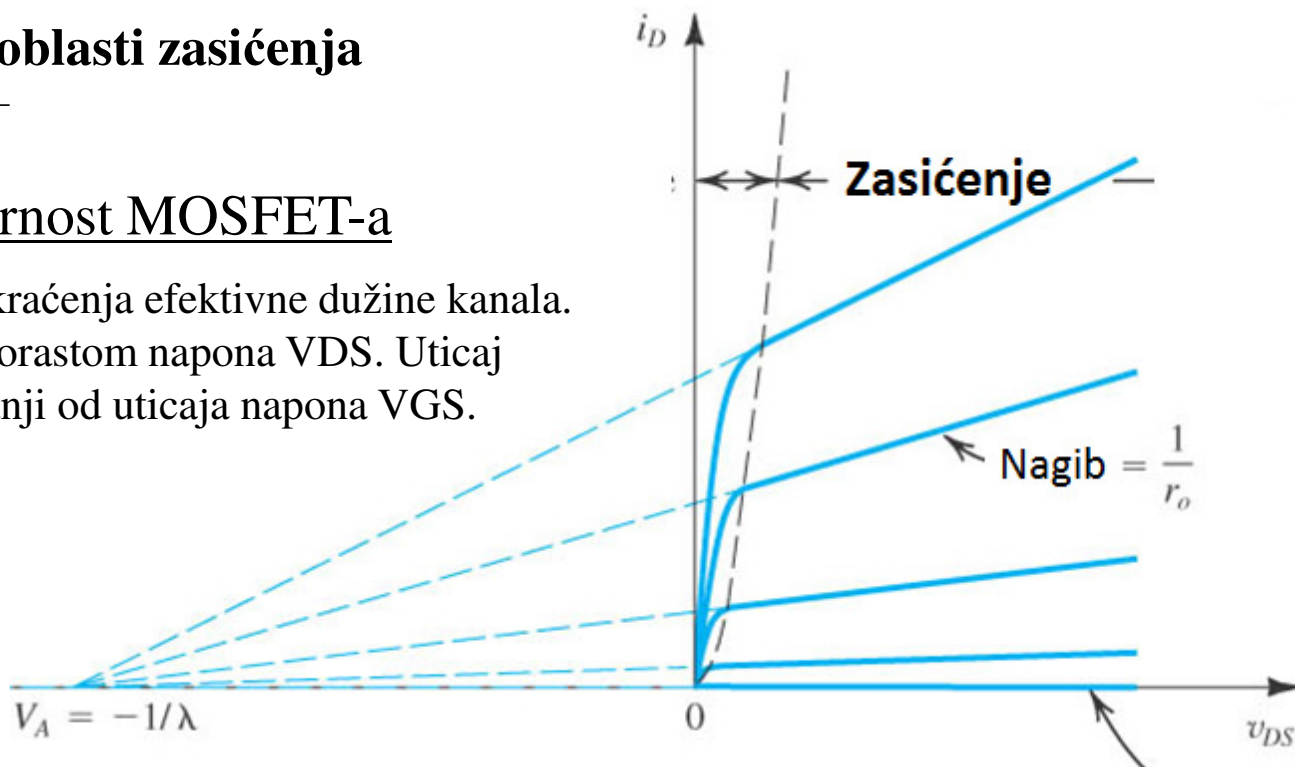
Prilikom porasta napona VDS dolazi do skraćanja efektivne dužine kanala. Kao posledica toga struja drejna raste sa porastom napona VDS. Uticaj napona VDS na struju drejna je daleko manji od uticaja napona VGS.

$$I_D = A(V_{GS} - V_t)^2 \left(1 + \frac{1}{V_A} V_{DS}\right)$$

$$\left\{ V_A = \frac{1}{\lambda} \right\}$$

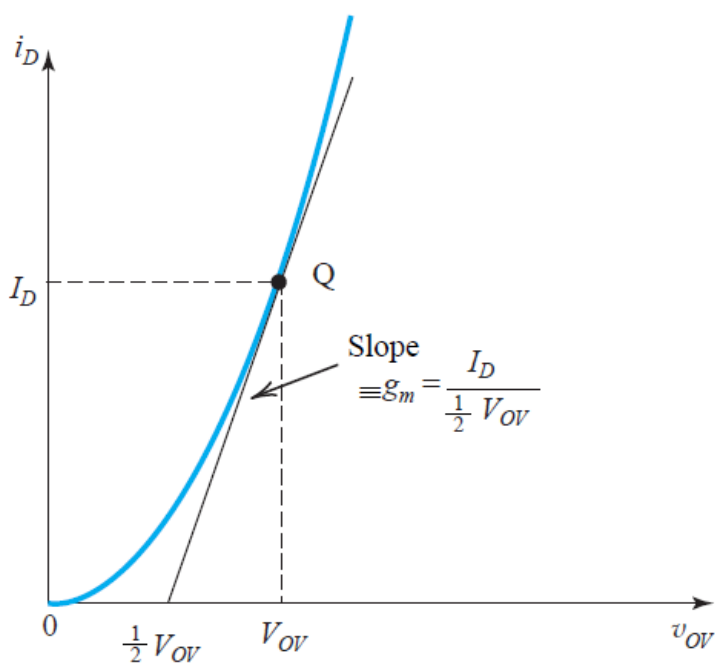
$$r_o = \frac{\partial V_{DS}}{\partial I_D} = 1 / \left[ \frac{\partial I_D}{\partial V_{DS}} \right] = 1 / \left[ \frac{1}{V_A} A(V_{GS} - V_t)^2 \right] = \frac{V_A}{I_D}$$

$$r_o = \frac{V_A}{I_D}$$



## Modela za male signale u oblasti zasićenja

### Transkonduktansa



$$g_m = \frac{\partial i_D}{\partial v_{GS}}$$

$$g_m \approx \frac{\Delta i_D}{\Delta v_{GS}} = \frac{i_d}{v_{gs}}$$

$$I_D = A(V_{GS} - V_t)^2 \left(1 + \frac{1}{V_A} V_{DS}\right)$$

$$g_m = 2 \cdot A \cdot (v_{GS} - V_t) \cdot \left(1 + \frac{v_{DS}}{V_A}\right)$$

$$g_m \approx 2 \cdot A \cdot (v_{GS} - V_t)$$

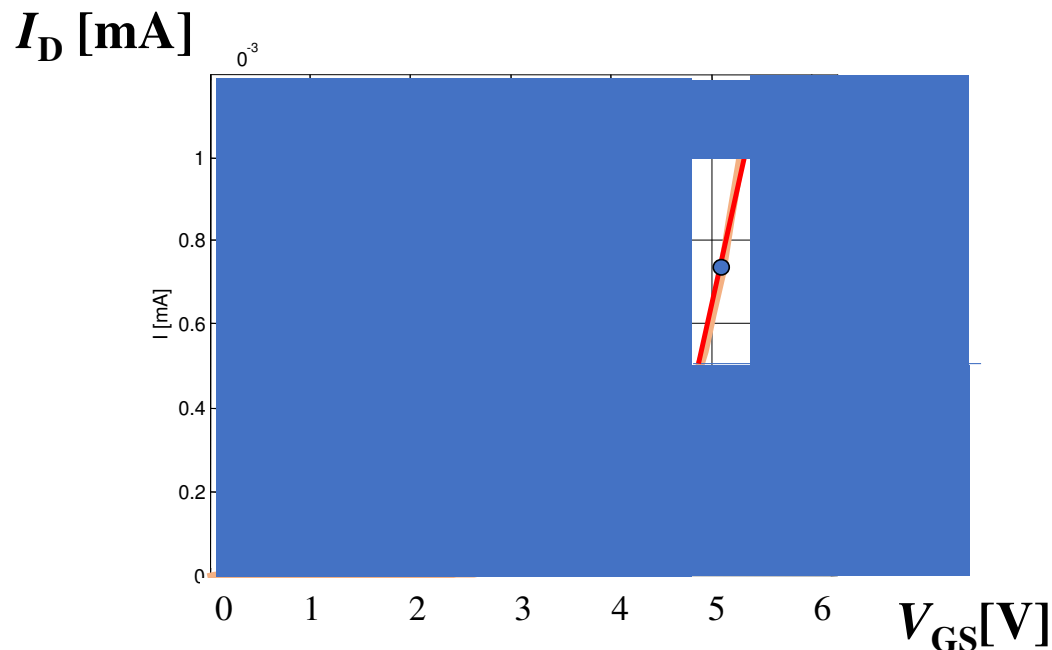
$$g_m = \frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}} \approx \frac{2I_D}{(V_{GS} - V_t)}$$

## Model MOS tranzistora

Radna tačka – značenje modela za male signale **u oblasti zasićenja**

$$V_{DS} > V_{GS} - V_t$$

$$I_D = A(V_{GS} - V_t)^2$$



$g_m$  ZAVISI od položaja mirne (DC) radne tačke.  
Ista promena  $v_{gs}$  izazvaće različitu promenu struje  $i_d$

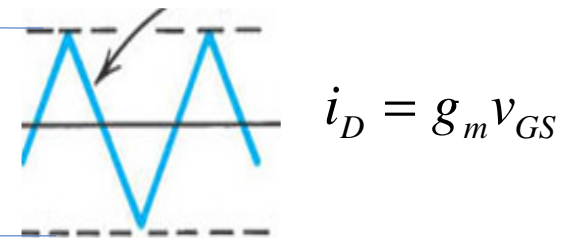
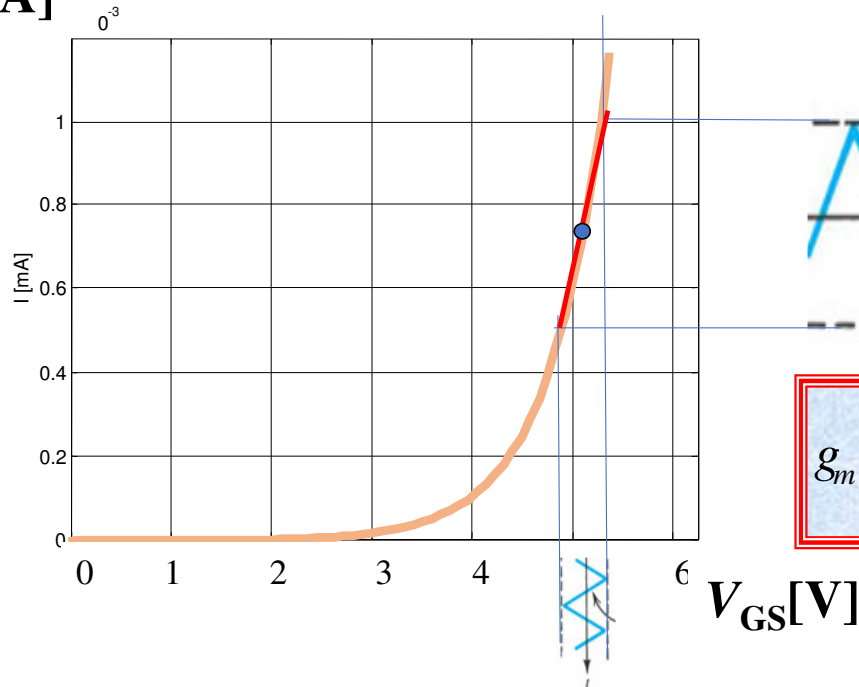
## Model MOS tranzistora

Radna tačka – značenje modela za male signale **u oblasti zasićenja**

$$V_{DS} > V_{GS} - V_t$$

$$I_D = A(V_{GS} - V_t)^2$$

$I_D$  [mA]



$$g_m = \frac{\Delta I_D}{\Delta V_{GS}} \approx \frac{dI_D}{dV_{GS}} = \frac{2I_D}{(V_{GS} - V_t)} = \frac{2I_D}{V_{OV}}$$

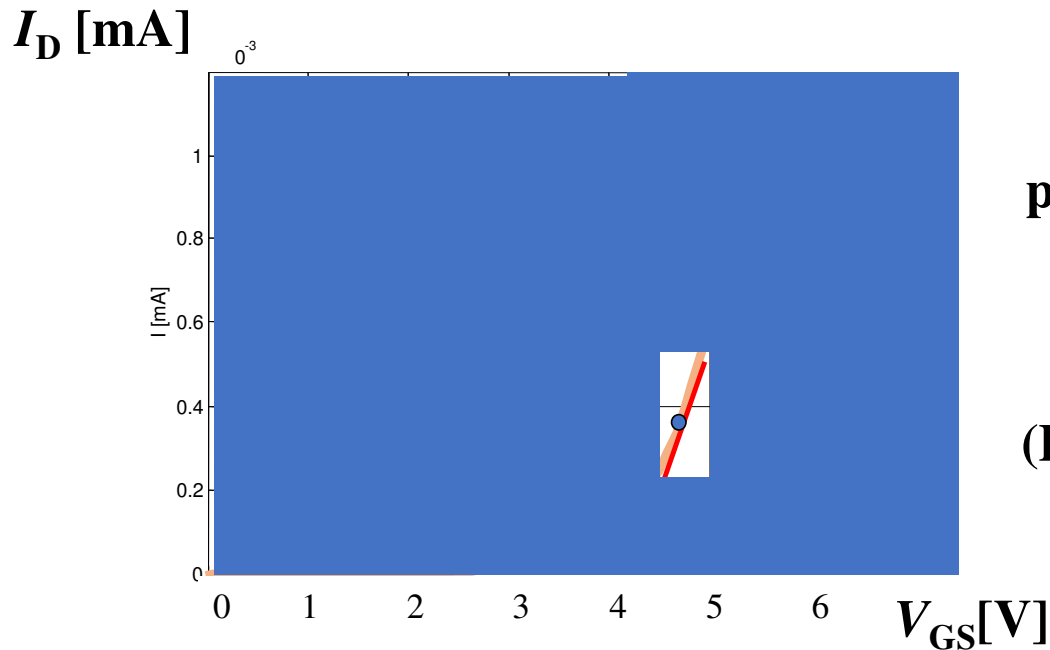
$g_m$  ZAVISI od položaja mirne (DC) radne tačke.  
Ista promena  $v_{gs}$  izazvaće različitu promenu struje  $i_d$

## Model MOS tranzistora

Radna tačka – značenje modela za male signale **u oblasti zasićenja**

$$V_{DS} > V_{GS} - V_t$$

$$I_D = A(V_{GS} - V_t)^2$$



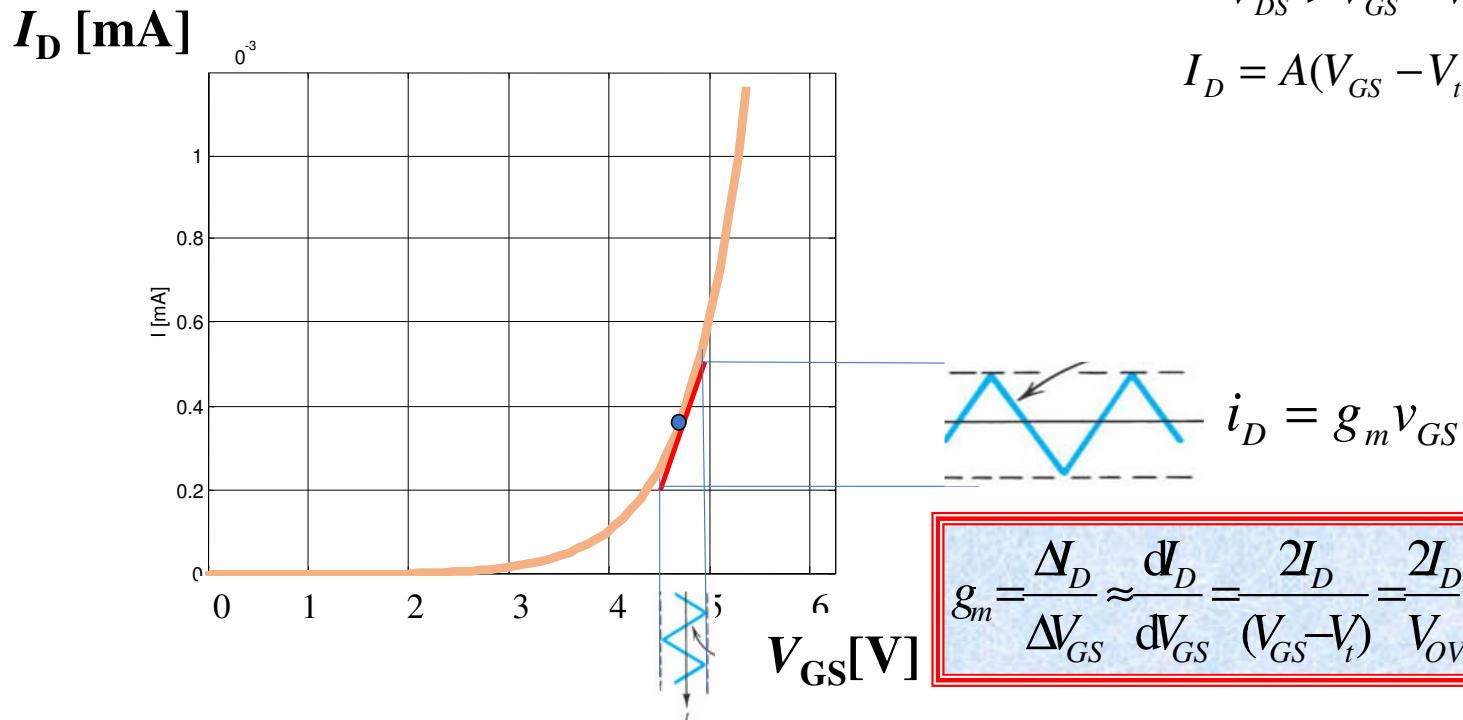
*Ista promena  $V_{GS}$  izazvaće različite promene struje  $i_D$  u zavisnosti od položaja radne tačke tranzistora (DC vrednost struje  $I_D$ )*

## Model MOS tranzistora

Radna tačka – značenje modela za male signale **u oblasti zasićenja**

$$V_{DS} > V_{GS} - V_t$$

$$I_D = A(V_{GS} - V_t)^2$$



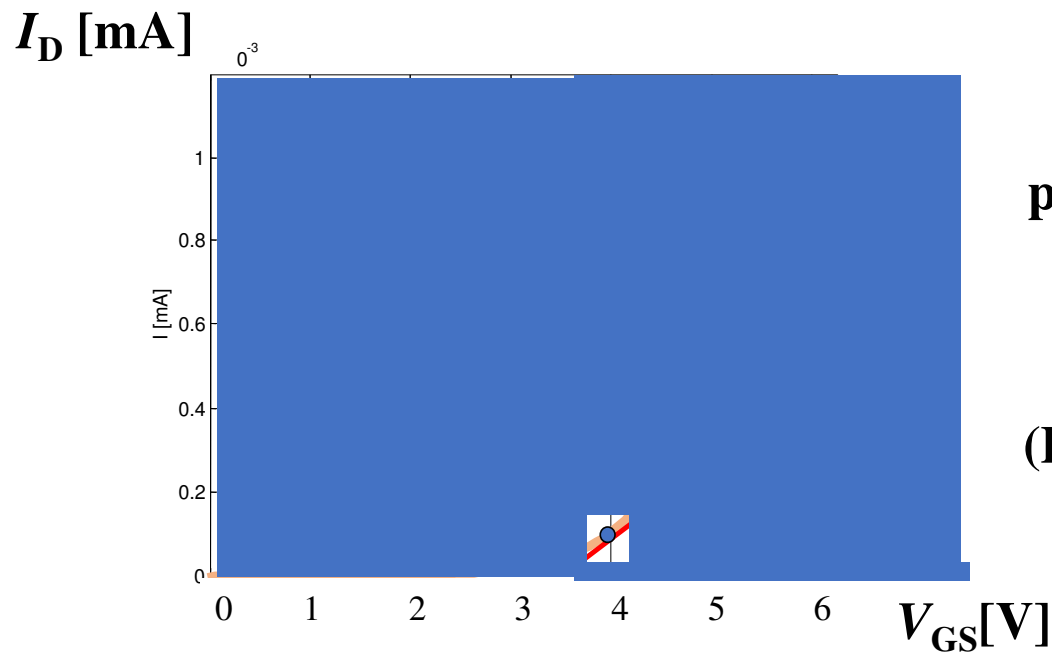
$g_m$  ZAVISI od položaja mirne (DC) radne tačke.  
Ista promena  $v_{gs}$  izazvaće različitu promenu struje  $i_d$

## Model MOS tranzistora

Radna tačka – značenje modela za male signale **u oblasti zasićenja**

$$V_{DS} > V_{GS} - V_t$$

$$I_D = A(V_{GS} - V_t)^2$$



*Ista promena  $V_{GS}$  izazvaće različite promene struje  $i_D$  u zavisnosti od položaja radne tačke tranzistora (DC vrednost struje  $I_D$ )*

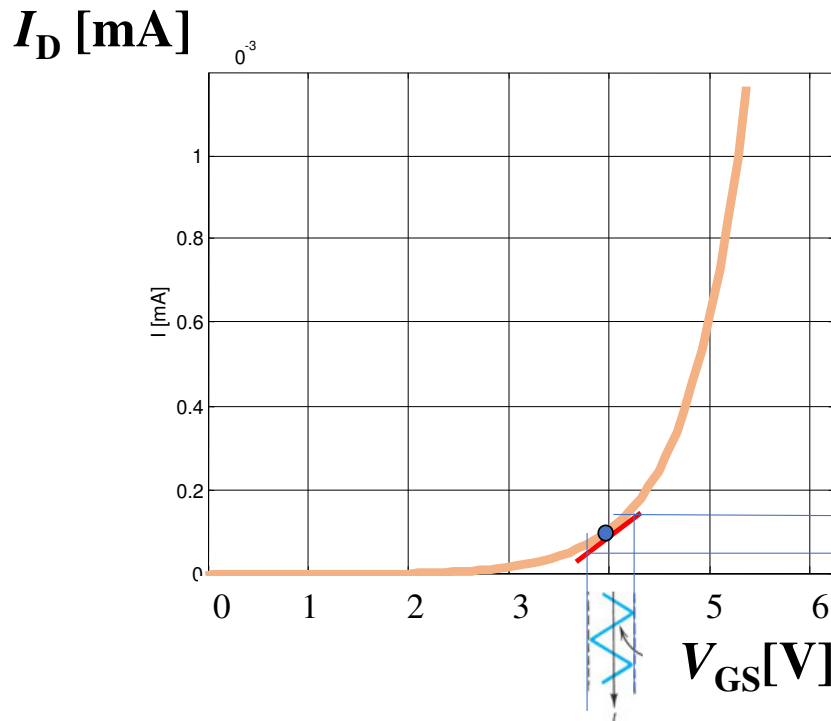


## Model MOS tranzistora

Radna tačka – značenje modela za male signale **u oblasti zasićenja**

$$V_{DS} > V_{GS} - V_t$$

$$I_D = A(V_{GS} - V_t)^2$$



$$i_D = g_m v_{GS}$$

$$g_m = \frac{\Delta I_D}{\Delta V_{GS}} \approx \frac{dI_D}{dV_{GS}} = \frac{2I_D}{(V_{GS} - V_t)} = \frac{2I_D}{V_{OV}}$$

$g_m$  ZAVISI od položaja mirne (DC) radne tačke.  
Ista promena  $v_{gs}$  izazvaće različitu promenu struje  $i_d$

## Model MOS tranzistora

### Model za male signale (dinamički model) u oblasti zasićenja

Struja drena je funkcija dva napona, ulaznog i izlaznog:  $i_D = f(v_{GS}, v_{DS})$

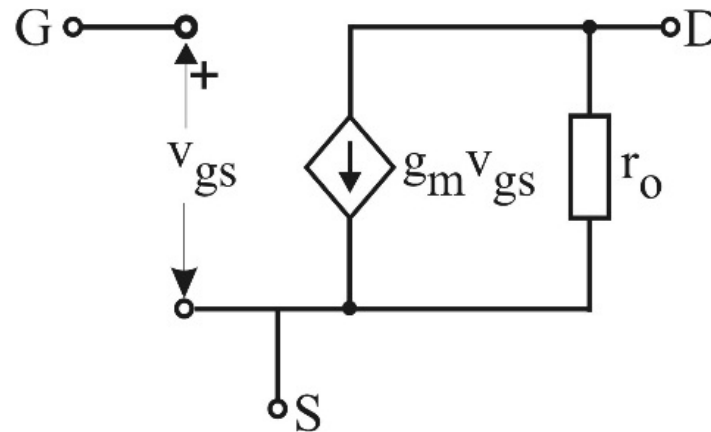
$$\Delta i_D = \frac{\partial i_D}{\partial v_{GS}} \cdot \Delta v_{GS} + \frac{\partial i_D}{\partial v_{DS}} \cdot \Delta v_{DS}$$

Parcijalni izvodi su dinamički parametri tranzistora:

$$g_m = \frac{\partial i_D}{\partial v_{GS}} \quad r_o = \frac{\partial v_{DS}}{\partial i_D}$$

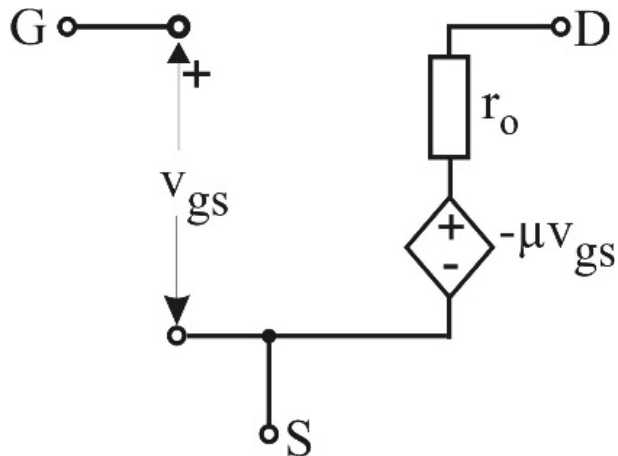
Priraštaji napona predstavljaju naizmjenične komponente:  $v_{gs} = \Delta v_{GS}$   $v_{ds} = \Delta v_{DS}$   $i_d = \Delta i_D$

$$i_d = g_m \cdot v_{gs} + \frac{1}{r_o} \cdot v_{ds}$$



## Model MOS tranzistora

### Model za male signale (dinamički model) u oblasti zasićenja



U naponskom modelu se umesto strujnog generatora kontrolisanog naponom koristi naponski generator kontrolisan naponom. Ovaj model je pogodan kada postoji mogućnost da se struja drejna odredi iz konturne jednačine.

$\mu$  je koeficijent naponskog pojačanja

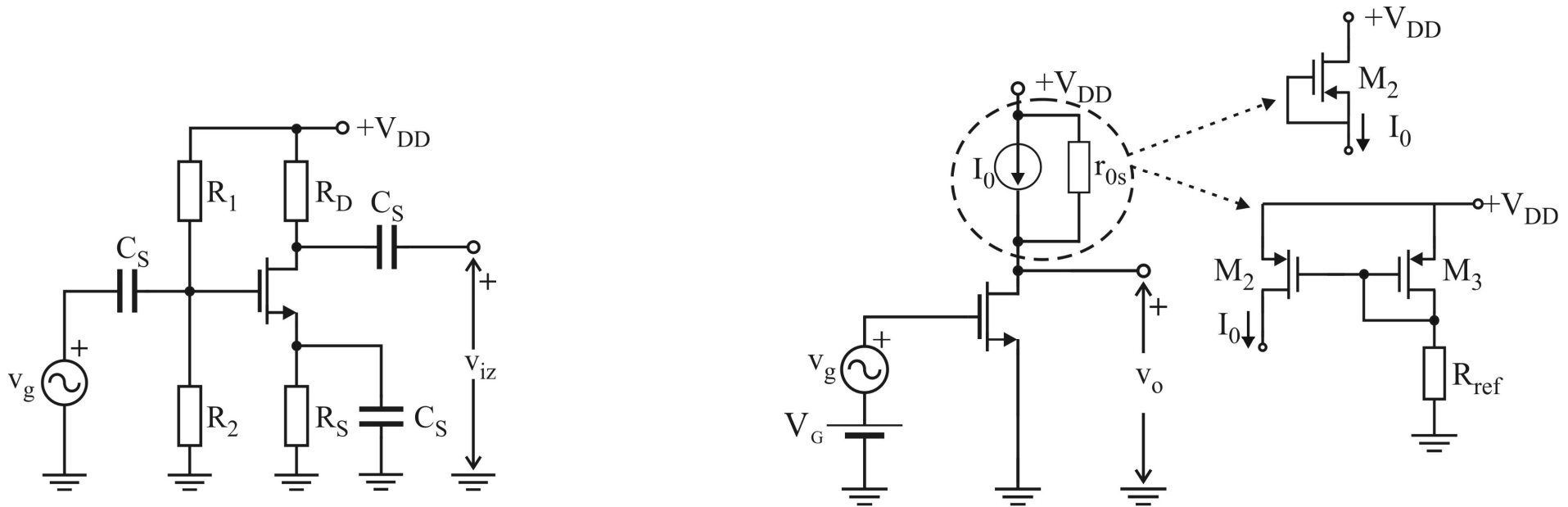
$\mu$  je jednak proizvodu strmine i izlazne otpornosti.

$$\mu = g_m r_o$$

$$\mu = \frac{\partial V_{DS}}{\partial V_{GS}}$$

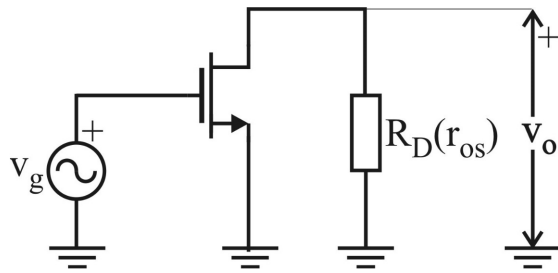
$$\mu = \frac{2V_A}{(V_{GS} - V_t)}$$

## Pojačavač sa zajedničkim sorsom



Ovo je najčešći način povezivanja MOSFET-a kao pojačavača. Ulazna elektroda je gejtz, izlazna drejn a zajednička elektroda je sors. Kada se koristi kapacitivna sprega tranzistor se polariše otpornicima (levo). U integrisanim kolima koristi se direktno spregnuti pojačavači kod kojih se za polarizaciju koriste aktivne komponente, odnosno drugi tranzistori (desno).

## Pojačavač sa zajedničkim sorsom



$$R_D \ll r_o$$

$$v_{gs} = v_g$$

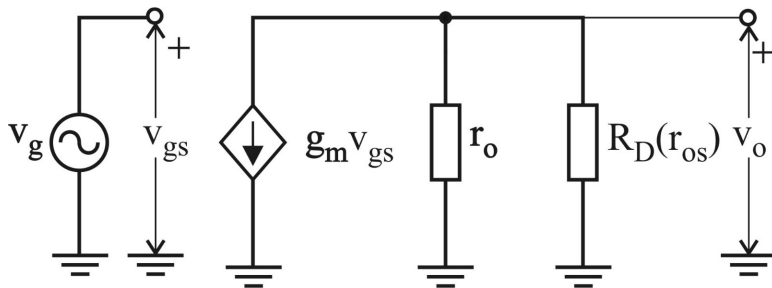
$$v_o = -g_m \cdot v_{gs} \cdot (r_o || R_D)$$

Naponsko pojačanje neopterećenog pojačavača,  $A_o$ :

$$A_o = \frac{v_o}{v_{gs}}$$

Naponsko pojačanje pojačavača sa kapacitivnom spregom:

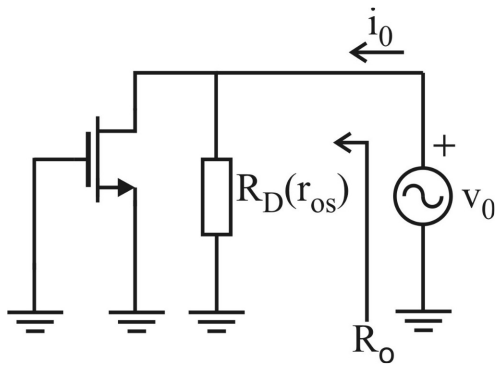
$$A_o \approx -g_m \cdot R_D$$



Naponsko pojačanje direktno spregnutog pojačavača:

$$A_o = -g_m \cdot (r_o || r_{os})$$

## Pojačavač sa zajedničkim sorsom



$$v_{gs} = 0$$

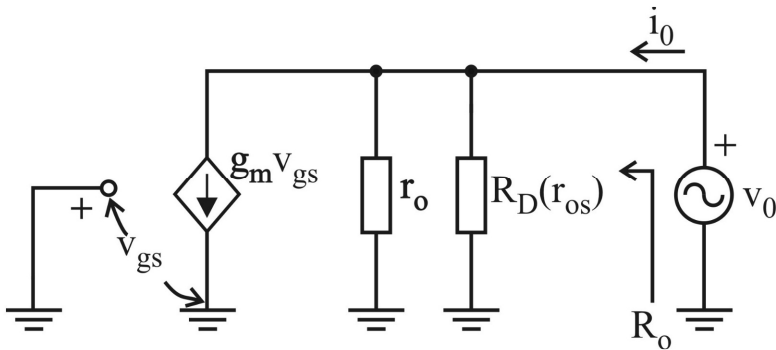
Izlazna otpornost za pojačavač sa kapacitivnom spregom:

$$R_D \ll r_o$$

$$R_o = r_o \parallel R_D \approx R_D$$

Izlazna otpornost za direktno spregnuti pojačavač, odnosno pojačavač koji koristi aktivno opterećenje:

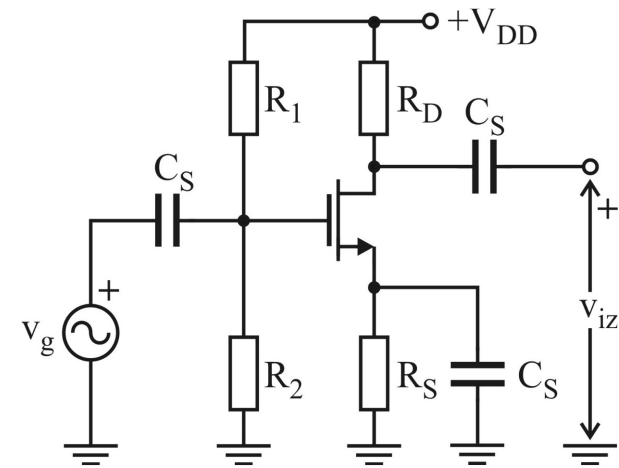
$$R_o = r_o \parallel r_{os}$$



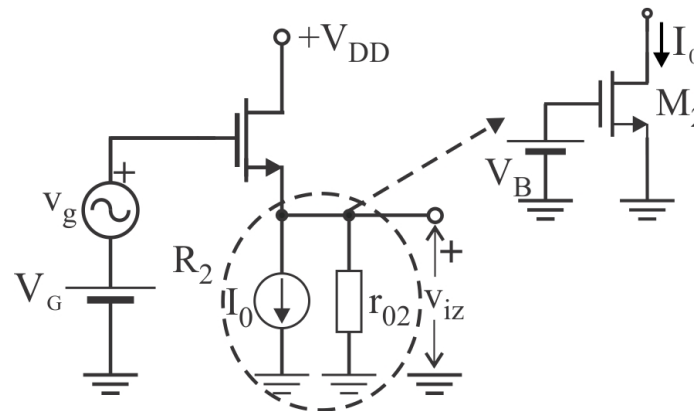
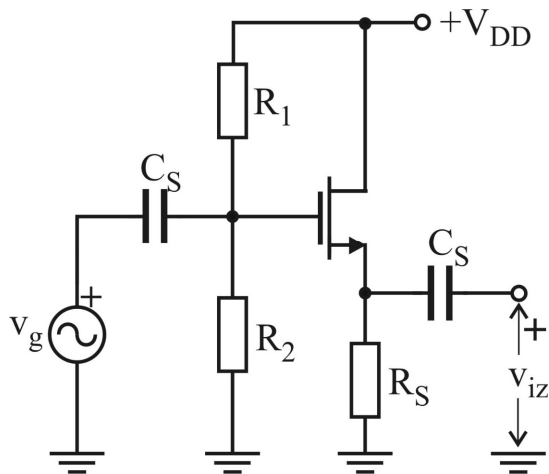
## Pojačavač sa zajedničkim sorsom

---

- Ova sprega daje negativno pojačanje (obrće fazu).
- Naponsko pojačanje je srazmerno otpornosti potrošača. Da bi se realizovala velika otpornost potrošača neophodno je koristiti izvor konstatne struje.
- U pojačavaču sa kapacitvnom spregom ulazna otpornost zavisi od otpornika za polarizaciju koji su povezani sa gejtom. Otpornost ovih otpornika treba da bude što veća da bi se umanjio njihov uticaj na ulaznu otpornost.
- U pojačavaču sa kapacitvnom spregom izlazna otpornost je približno jednaka otporniku za polarizaciju u kolu drejna  $R_D$ . Ukoliko se kolo ne polariše izvorom konstantne struje izlaza otpornost je mnogo veća.



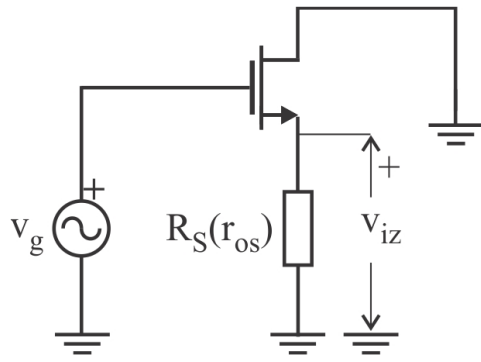
## Pojačavač sa zajedničkim drejnom



Ulazna elektroda je gejtz, izlazna sors a zajednička elektroda je drejnz. Kada se koristi kapacitivna sprega tranzistor se polariše otpornicima (levo). U integrisanim kolima koristi se direktno spregnuti pojačavači kod kojih se za polarizaciju koriste aktivne komponente, odnosno drugi tranzistori (desno).



## Pojačavač sa zajedničkim drejnom



$$v_{gs} = v_g - v_o$$

$$v_o = g_m \cdot v_{gs} \cdot r_o \parallel R_S$$

$$A_o = \frac{v_o}{v_g} = \frac{g_m \cdot r_o \parallel R_S}{1 + g_m \cdot r_o \parallel R_S}$$

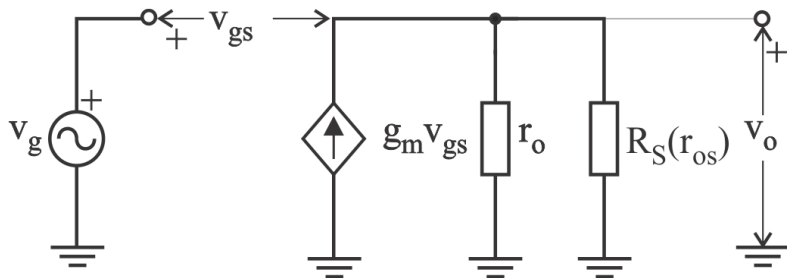
Naponsko pojačanje pojačavača sa kapacitivnom spregom:

$$R_S \ll r_o$$

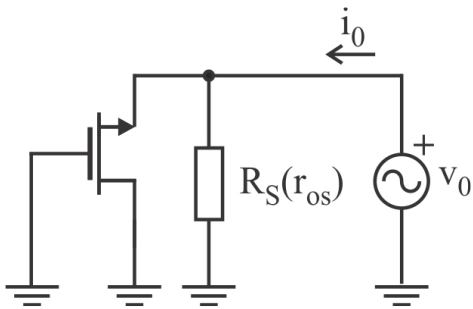
$$A_o \approx \frac{g_m \cdot R_S}{1 + g_m \cdot R_S}$$

Naponsko pojačanje direktno spregnutog pojačavača:

$$A_o \approx \frac{g_m \cdot r_o \parallel r_{os}}{1 + g_m \cdot r_o \parallel r_{os}}$$



## Pojačavač sa zajedničkim drejnom



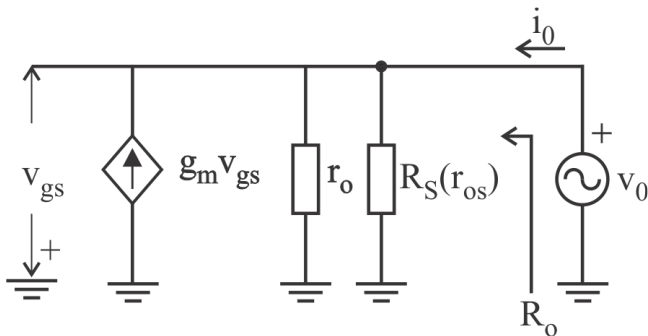
$$v_{gs} = -v_0$$

$$i_o = -g_m \cdot v_{gs} + \frac{v_o}{r_o} + \frac{v_o}{R_S}$$

$$R_o = \frac{v_o}{i_o} = \frac{1}{\frac{1}{g_m} + \frac{1}{r_o} + \frac{1}{R_S}}$$

$$R_o = \frac{v_o}{i_o} = \frac{1}{g_m} || r_o || R_S$$

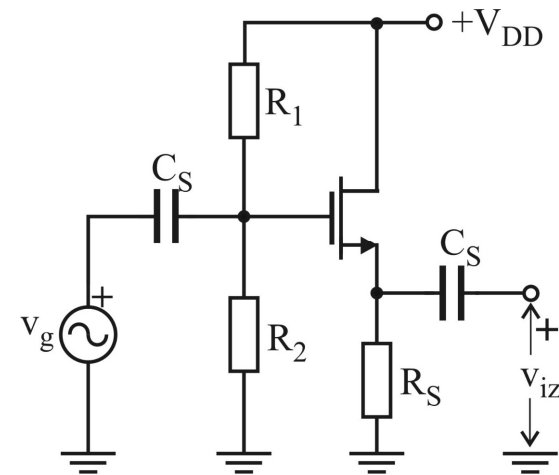
$$R_o \approx \frac{1}{g_m}$$



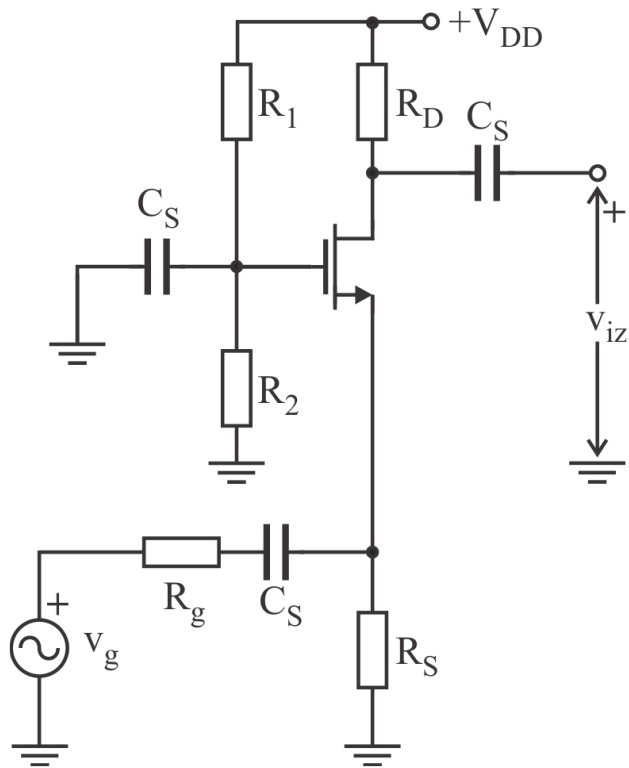
## Pojačavač sa zajedničkim drejnom

---

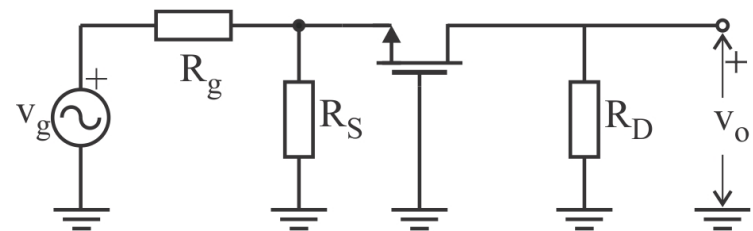
- Pojačavač sa zajedničkim drejnom ne pojačava napon. Naponsko pojačanje je manje od 1 i veoma blizu jediničnog.
- Ova sprega daje pozitivno pojačanje (ne obrće fazu).
- Izlazna otpornost je vrlo mala i približno jednaka recipročnoj vrednosti strmine.
- Kao i kod pojačavača sa zajedničkim sorsom ulazna otpornost je određena otpornicima za polarizaciju u kolu gejta.
- Najčešće se primenjuje kao poslednji pojačavački stepene za prilagođenje po impedansi i to u slučaju kada je otpornost potrošača veoma mala. Može se koristiti za razdvajanje dva susedna pojačavačka stepena.



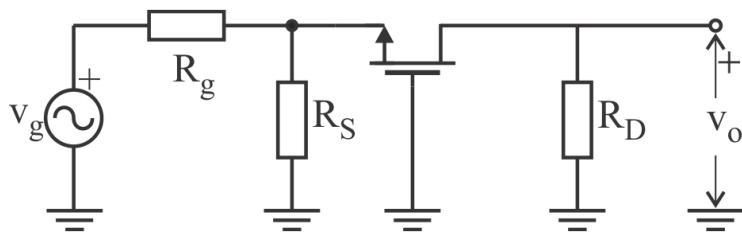
## Pojačavač sa zajedničkim gejtom



Ulazna elektroda je sors, izlazna drejn a zajednička elektroda je gej. Dole je prikazana šema za naizmeničnu struju.



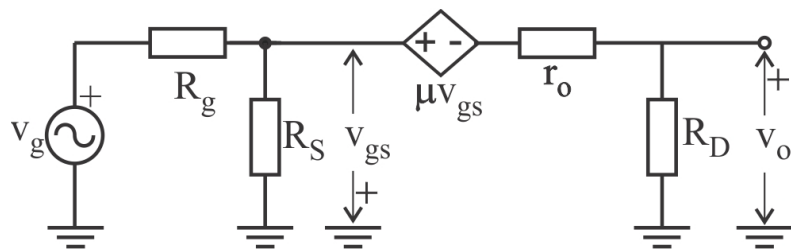
## Pojačavač sa zajedničkim gejtom



$$v_{gs} + \mu \cdot v_{gs} - (r_o + R_D) \cdot i_d = 0$$

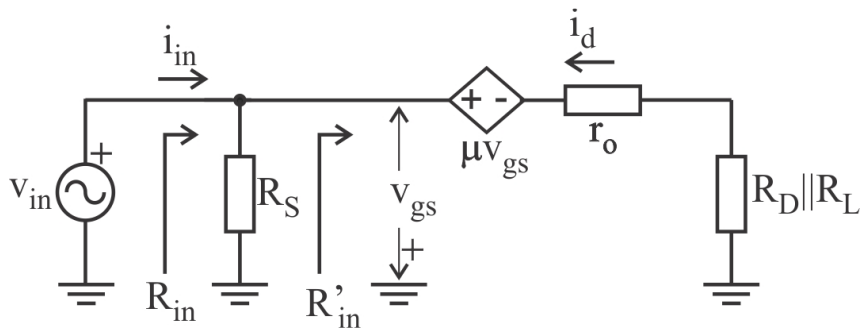
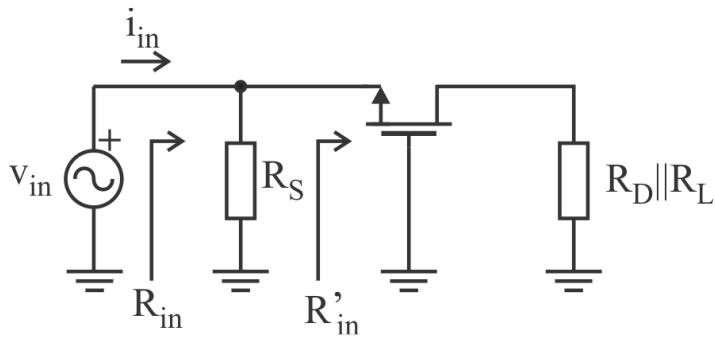
$$i_d = \frac{(1 + \mu) \cdot v_{gs}}{r_o + R_D}$$

$$v_o = -R_D \cdot i_d$$



$$A_o = -\frac{v_o}{v_{gs}} = \frac{R_D \cdot (1 + \mu)}{r_o + R_D}$$

## Pojačavač sa zajedničkim gejtom



$$v_{gs} + \mu \cdot v_{gs} - (r_o + R_L || R_D) \cdot i_d = 0$$

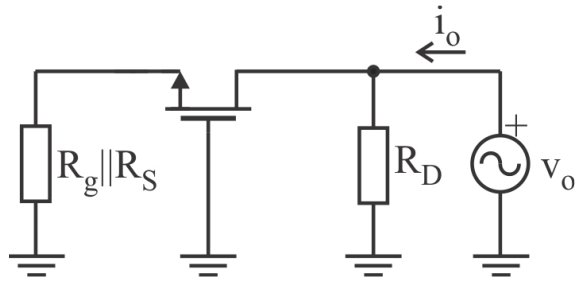
$$i_d = \frac{(1 + \mu) \cdot v_{gs}}{r_o + R_L || R_D}$$

$$R'_{in} = \frac{v_{gs}}{i_d} = \frac{r_o + R_L || R_D}{(1 + \mu)}$$

$$R_{in} = R'_{in} || R_S \approx R'_{in}$$

$$R_{in} = \frac{r_o + R_L || R_D}{(1 + \mu)}$$

## Pojačavač sa zajedničkim gejtom



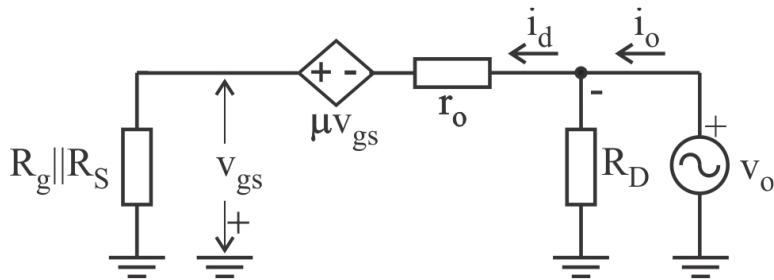
$$-v_{gs} - \mu \cdot v_{gs} + r_o \cdot i_d = v_o$$

$$v_{gs} = -i_d \cdot R_g || R_S$$

$$i_d = \frac{v_o}{r_o + (1 + \mu) \cdot R_g || R_S}$$

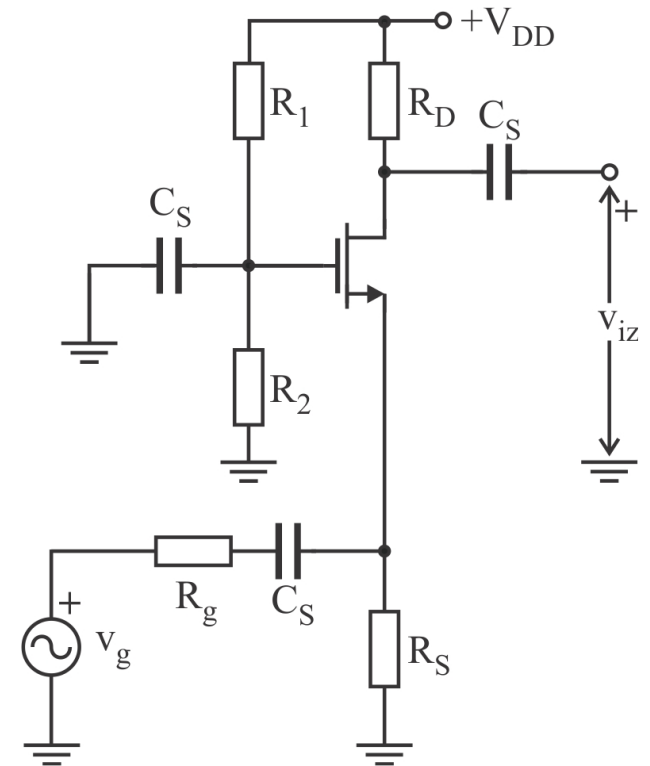
$$R'_o = \frac{v_o}{i_d} = r_o + (1 + \mu) \cdot R_g || R_S$$

$$R_o = R'_o || R_D$$



## Pojačavač sa zajedničkim gejtom

- Naponsko pojačanje zavisi od otpornosti pobudnog genertora. Što je otpornost pobudnog generatora manja pojačanje je veće.
- Ova sprega daje pozitivno pojačanje (ne obrće fazu).
- Ulazna otpornost je mala, približno jednaka recipročnoj vredosti strmine. Izlazna otpornost vrlo velika.
- Koristi se za prilagođenje po impedansi, ukoliko je otpronost potrošača veoma velika ili ukoliko je unutrašnja otpornost pobudnog generatora veoma mala. Može se koristiti i kao izvor konstantne struje zahvaljujući velikoj izlaznoj otpornosti.
- Ova sprega ima dobre karakteristike pri visokim frekvencijama, jer ima širok propusni opseg.





## Poređenje jednostepenih MOSFET pojačavača

---

| Vrsta pojačavača                         | Fazni pomeraj | Naponsko pojačanje           | Ulazna otpornost                     | Izlazna otpornost                  |
|--|---------------|------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|
| Zajednički sors                          | $180^\circ$   | $-g_m \cdot R_D$             | $R_G$                                | $R_D$                              |
| Zajednički sors sa aktivnim opterećenjem | $180^\circ$   | $-g_m \cdot (r_o    r_{os})$ | $\infty$                             | $r_o    r_{os}$                    |
| Zajednički drejn                         | $0^\circ$     | $\approx 1$                  | $R_G$                                | $\frac{1}{g_m}$                    |
| Zajednički gejt                          | $0^\circ$     | $g_m \cdot (R_C    R_p)$     | $\frac{r_o + R_L    R_D}{(1 + \mu)}$ | $r_o + (1 + \mu) \cdot R_g    R_S$ |

## **Poređenje MOSFET i bipolarnih pojačavača**

---

- Pojačavači sa bipolarnim tranzistorima imaju veću vrednost strimine u odnosu na MOSFET tranzistore. Shodno tome i naponsko pojačanje bipolarnih pojačavača je veće od naponskog pojačanja MOSFET tranzistora.
- Ulazna otpornost MOSFET pojačavača je daleko veća od ulazne otpornosti bipolarnih tranzistora.
- MOSFET pojačavači pokazuju bolje karakteristike na visokim frekvencijama zbog manjih vrednosti paraiztinih kapacitivnosti.
- MOSFET tranzistori se ređe koriste kao diskretne komponente jer su osetljivi na rukovanje. Veoma lako dolazi do proboja gejta usled elektrostatickog pražnjenja.

## Poređenje MOSFET i bipolarnih pojačavača

**Bipolar:**  $g_m$  increases linear with current

$$I_C = I_S \cdot e^{\frac{V_{BE}}{V_T}}$$

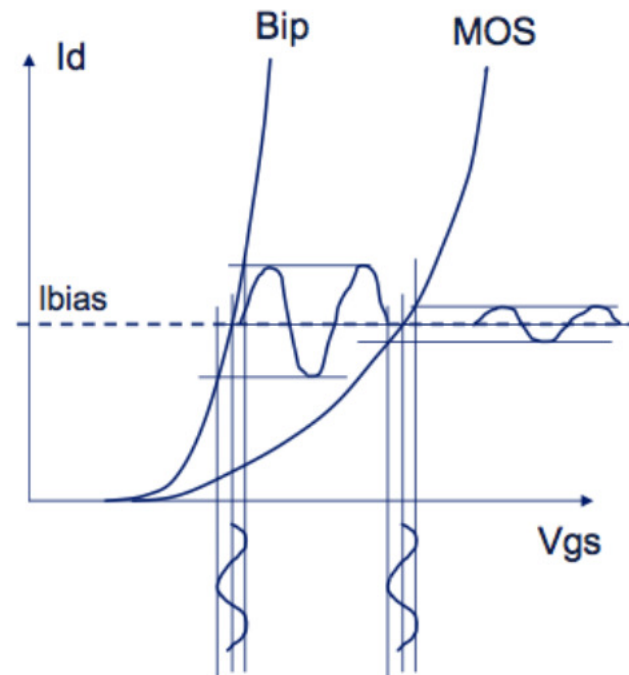
$$g_m = \frac{d I_C}{d V_{be}} = \frac{I_C}{V_T}$$

**MOS:**  $g_m$  increases with squareroot of current

$$I_d = k \cdot \frac{w}{l} \cdot (V_{gs} - V_{th})^2$$

$$g_m = \frac{d I_d}{d V_{be}} = k \cdot \frac{w}{l} \cdot 2 \cdot (V_{gs} - V_{th})$$

$$g_m = 2 \cdot \sqrt{k \cdot \frac{w}{l} \cdot I_d}$$



bipolar transistor will achieve more  $g_m$

## Uticaj temperature na rad MOSFET-a

---

I napon praga  $V_t$  i transkonduktanski parametar  $k'$  su temperaturno zavisni. Apsolutna vrijednost napona praga opada oko 2 mV pri povećanju temperature za 1°. Opadanjem napona praga dolazi do povećanja struje drejna.

Transkonduktanski parametar  $k'$  opada sa temperaturom usled smanjenja pokretljivosti nosilaca naelektrisanja. Smanjenje  $k'$  ima dominantan uticaj tako da struja drejna opada sa porastom temperature. Ovo umanjenje struje drejna doprinosi stabilnosti pojačavača.

## Elementarna pitanja

1. Režimi rada MOSFET-a.
2. Model MOSFET-a za velike signale u režimu zasićenja.
3. Model MOSFET-a za male signale; Definicija transkonduktanse i izlazne otpornosti.

## Ostala ispitna pitanja

4. Izlazna i prenosna karakteristika MOSFET-a.
5. Polarizacija MOSFET-a otpornicima.
6. Polarizacija MOSFET-a aktivnim opterećenjima.
7. Pojačavač sa zajedničkim sorsom (izlazna otpornost, naponsko pojačanje, osobine).
8. Pojačavač sa zajedničkim drejnom (izlazna otpornost, naponsko pojačanje, osobine)
9. Pojačavač sa zajedničkom gejtom (ulazna otpornost, izlazna otpornost, naponsko pojačanje, osobine)
10. Poređenje MOSFET-a i bipolarnog tranzistora.