

Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor - MOSFET

- **Struktura MOSFET-a**
- **Način rada MOSFET-a**
- **Modeli**
- **PMOS Tranzistor**
- **Poređenje bipolarnih i CMOS uređaja**

Pregled nastavne jedinice

Način rada MOSFET-a

- Struktura MOSFET-a
- Rad u triodnom režimu
- Rad u zasićenju
- IV karakteristike

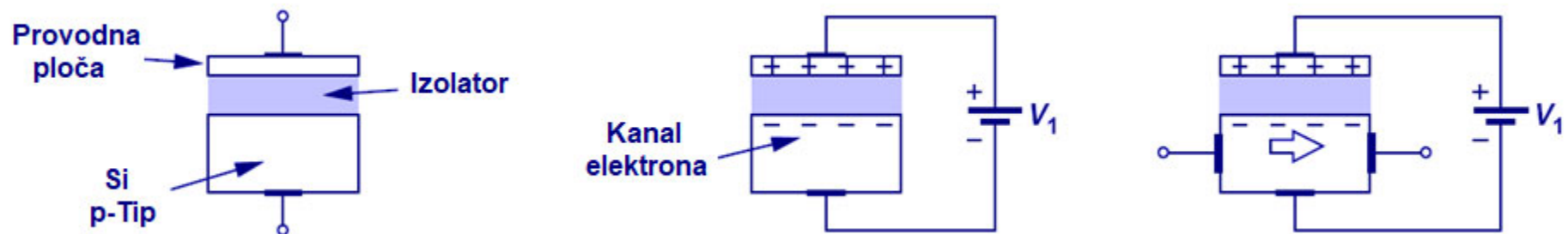
MOSFET modeli

- Model za velike signale
- Model za male signale

PMOS

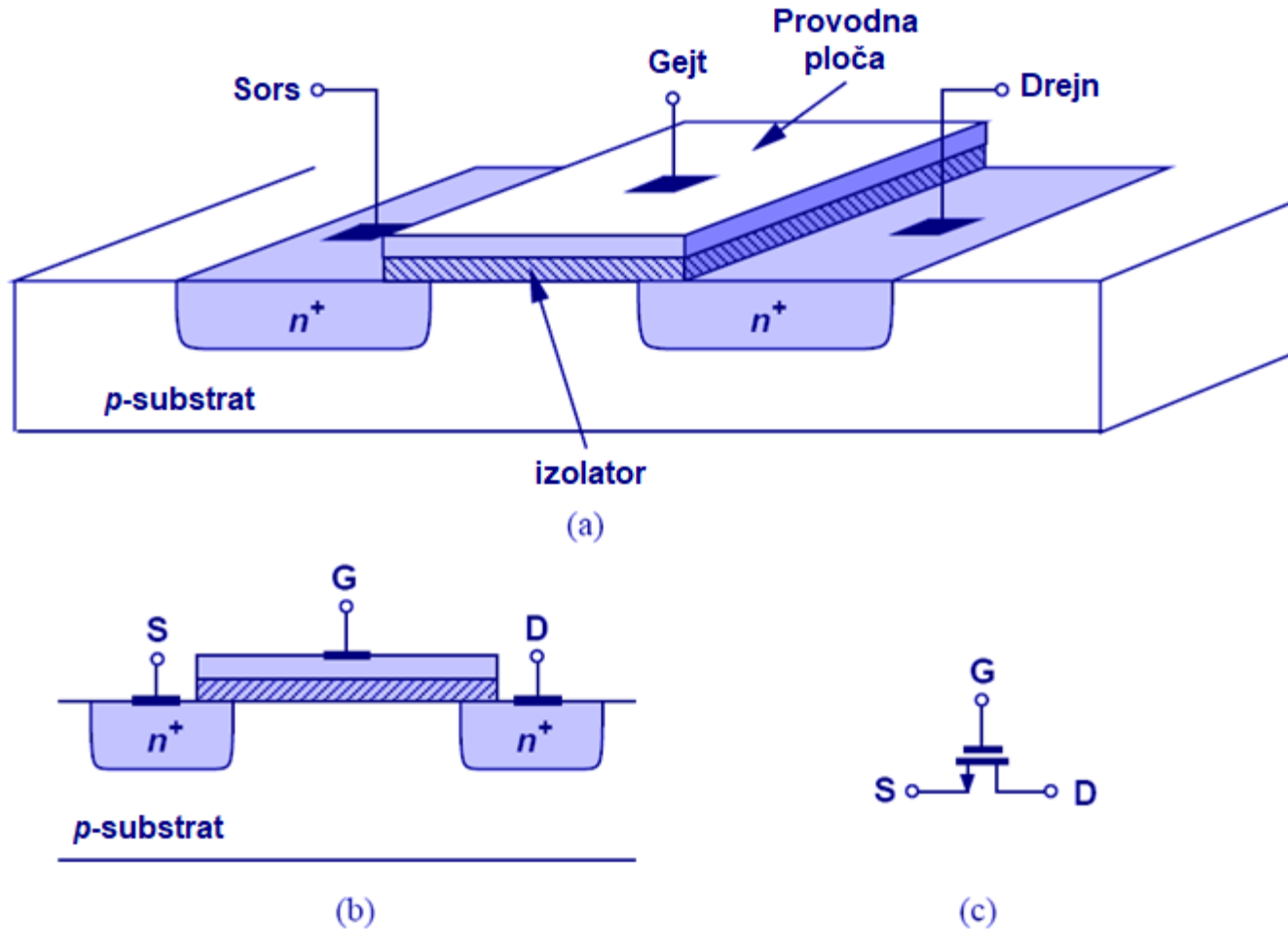
- Struktura
- Modeli

Metal-Oxide-Semiconductor (MOS) kondenzator



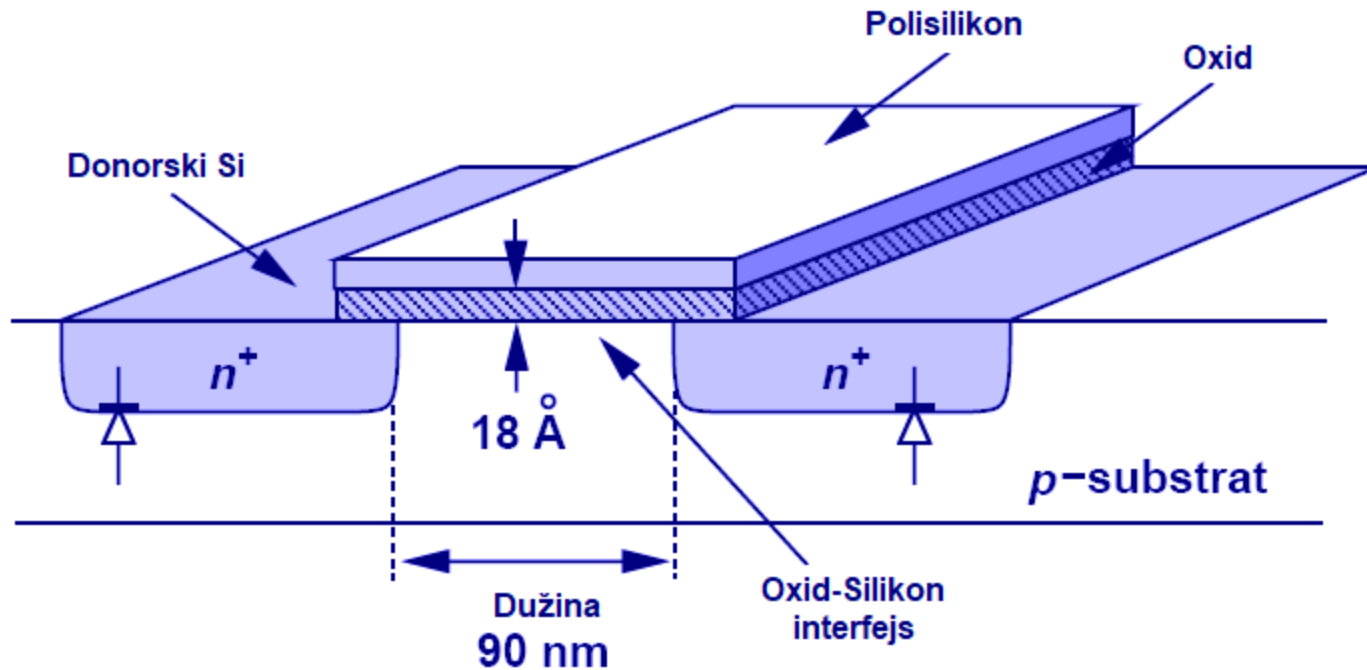
- MOS struktura može biti zamišljena kao paralelne ploče kondenzatora.
- Gornja ploča je provodna ploča, oxid je dielektrik, i Si substrat ploča. (Podrazumijevamo P-substrat.)

Structura i simbol MOSFET-a



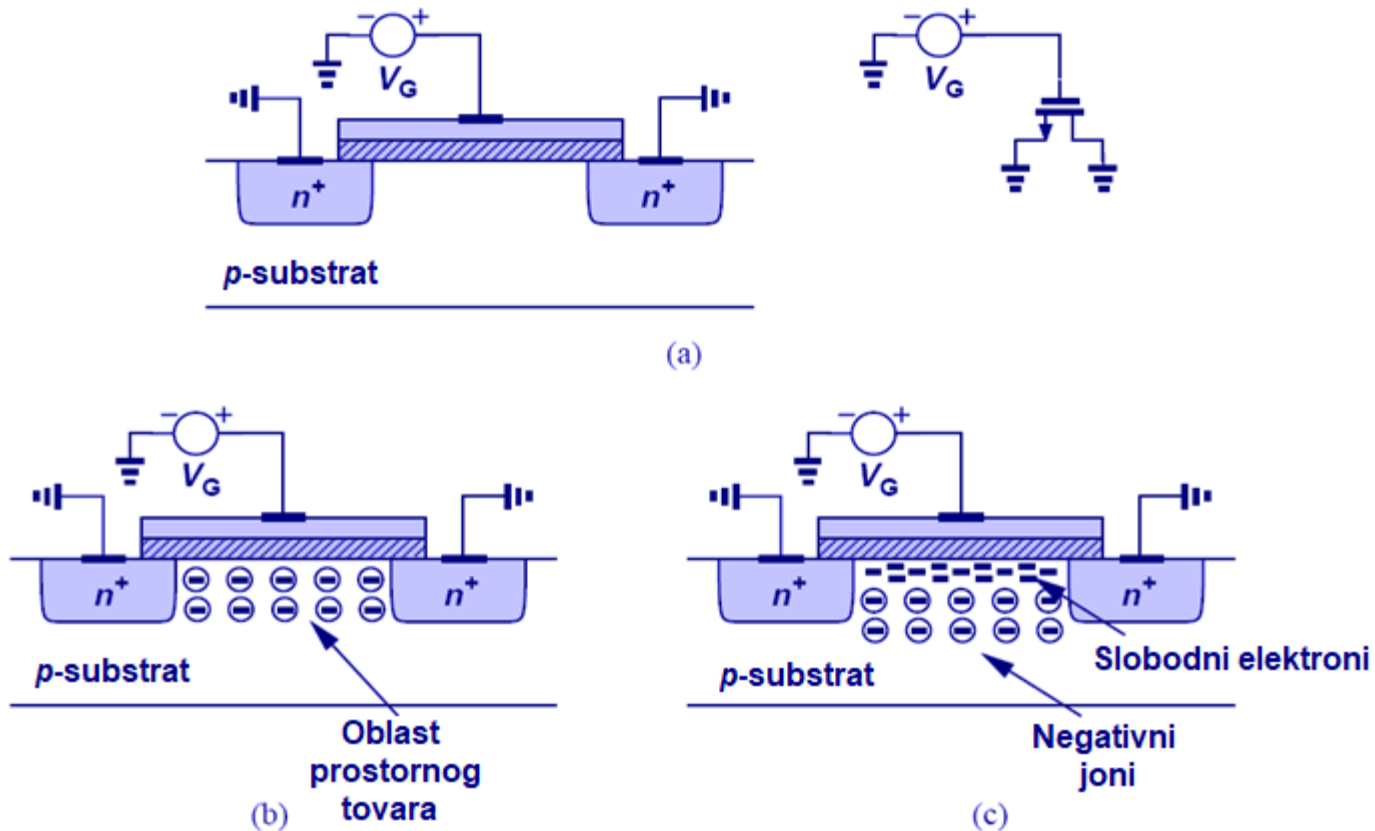
- **Struktura je simetrična, oba n^+ regiona mogu biti sors ili drejn.**

Tehnologija MOSFET strukture



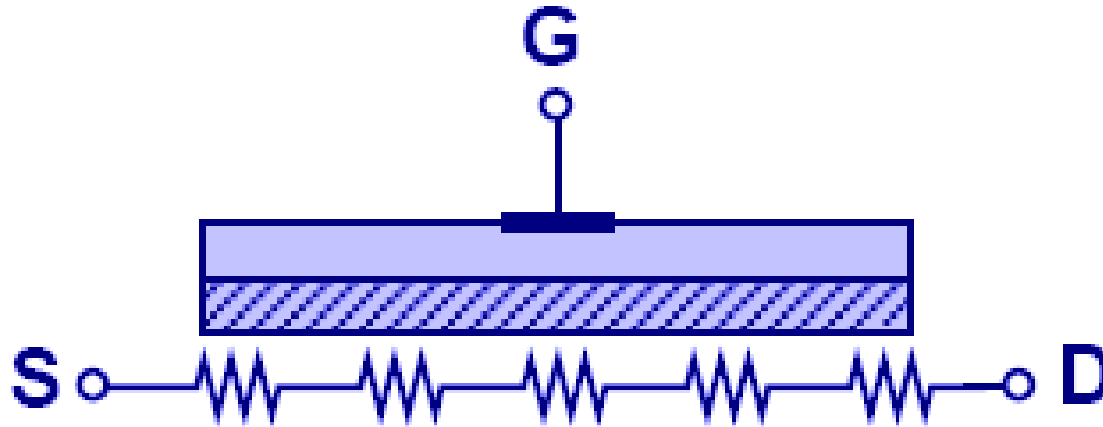
- Gejt je formiran od polisilikon-a
- Izolator je Silicon dioxide.

Formiranje kanala



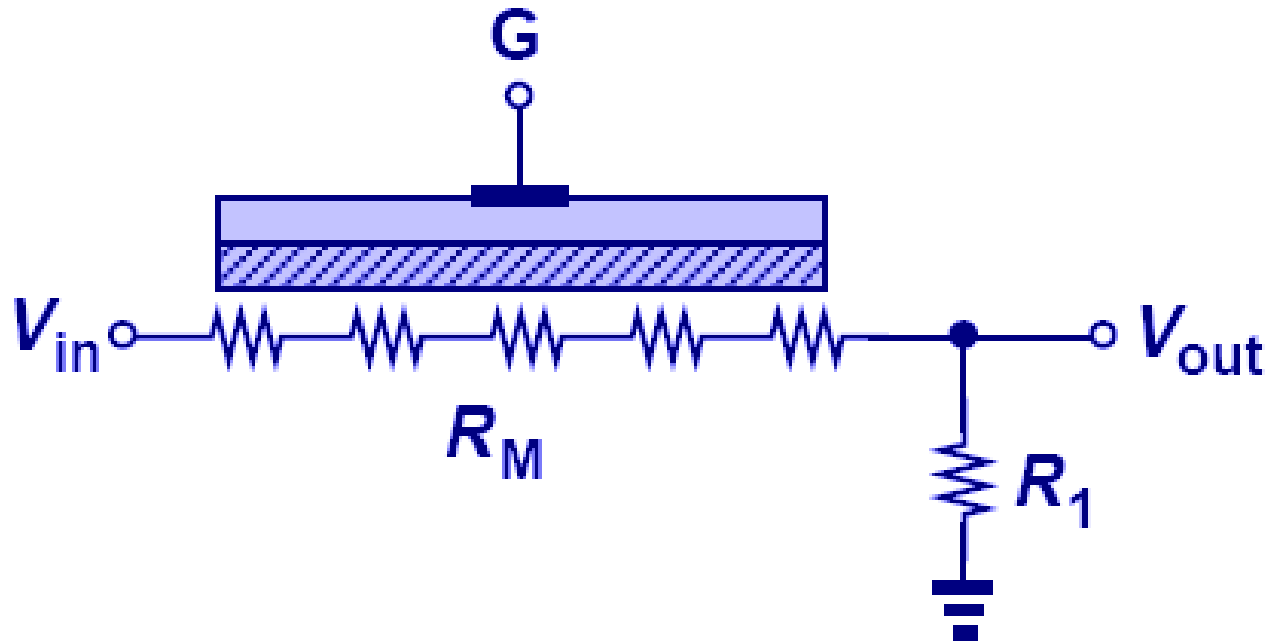
- Šupljine su odbijene pozitivnim naponom gejta, ostavljajući iza negativne jone i formirajući oblast prostornog tovara.
- Elektroni su privučeni ka izolacionom interfejsu, kreirajući kanal (“inverzijski sloj”).
- V_{th} – napon praga

Naponski zavistan otpornik



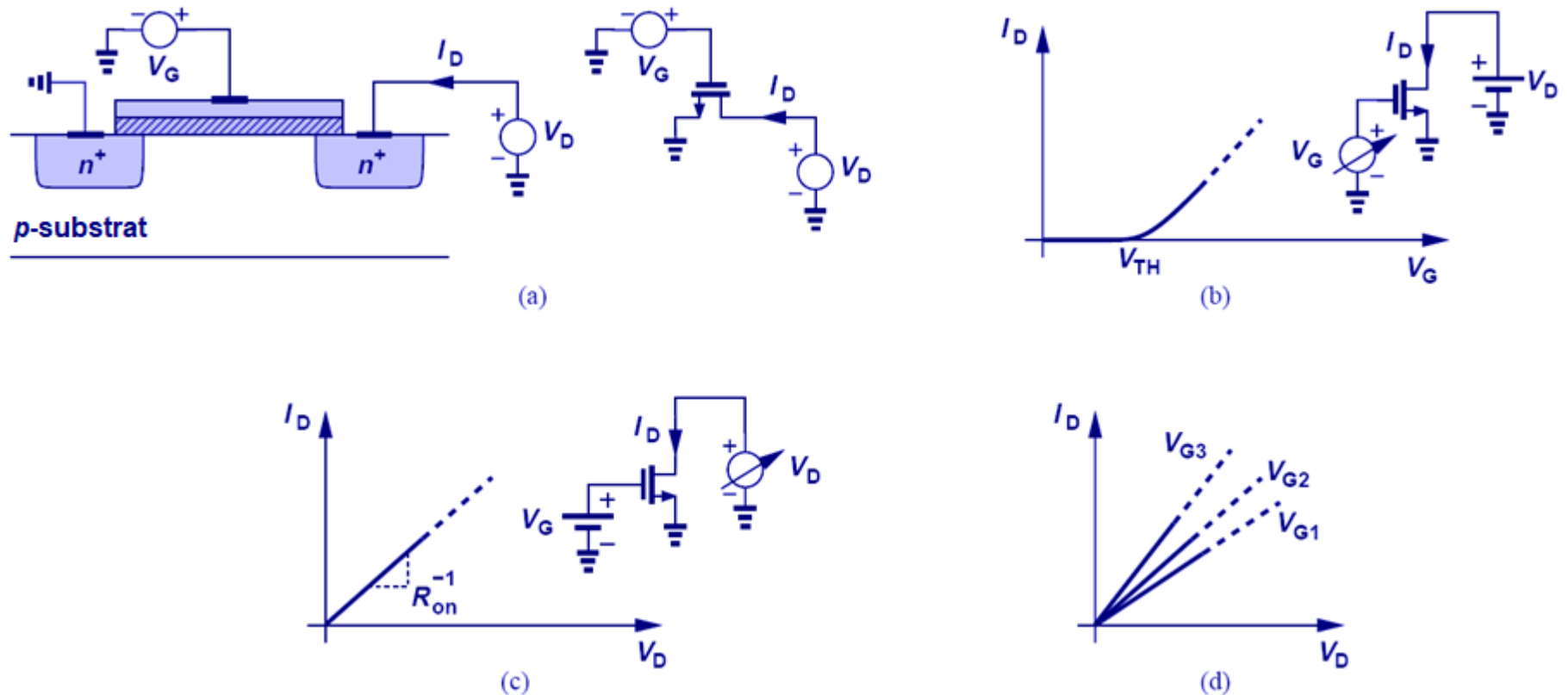
- Inverzijski kanal MOSFET-a se može posmatrati kao otpornik
- Kako gustina naelaktrisanja u kanalu zavisi od napona na gejtju, ova otpornost je naponski zavisna.

Naponski-kontrolisan razdjelnik (prigušivač)



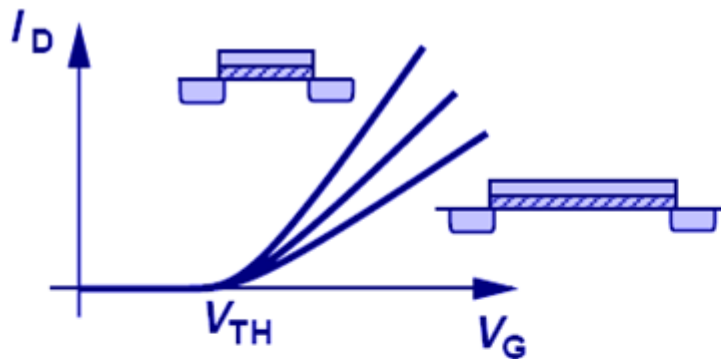
- Smanjivanjem napona na gejtju, izlazni napon opada jer otpornost kanala raste.

Karakteristike MOSFET-a

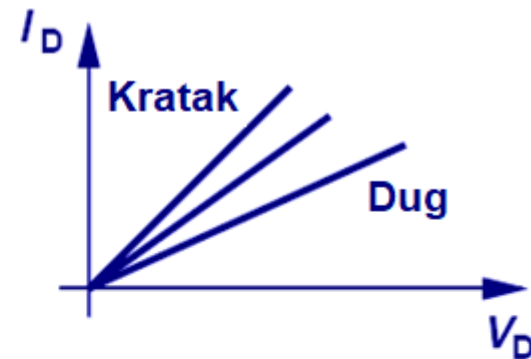


- Karakteristike MOSFET-a su mjerene mijenjajući V_G dok je V_D konstantno, kao i mijenjajući V_D dok je V_G konstantno.
- (d) pokazuje naponsku zavisnost otpornosti kanala.

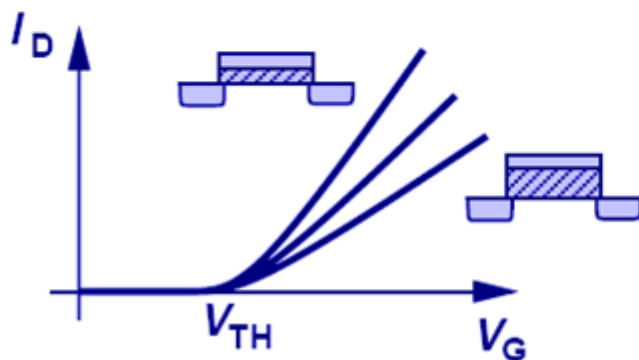
Zavisnost od dužine kalana (L) i širina sloja SiO_2 (w_{ox})



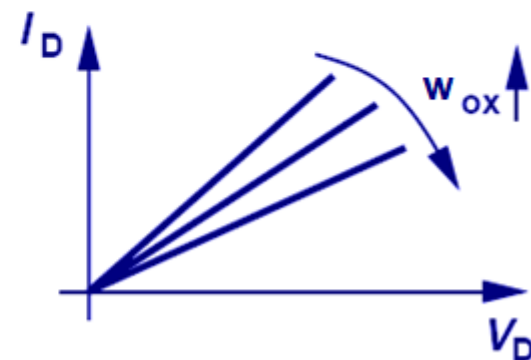
(a)



(b)



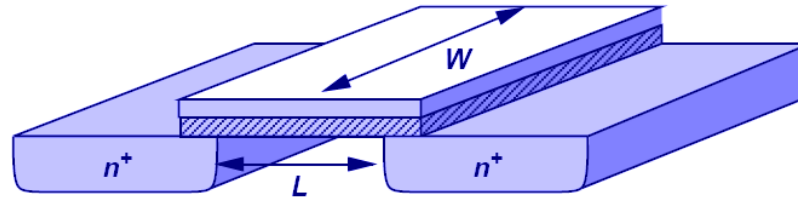
(c)



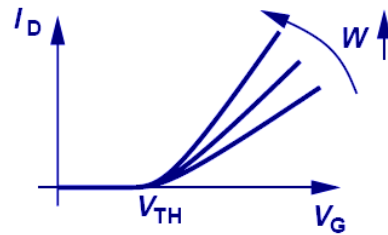
(d)

- Mala dužina gejta (kanala) i tanak sloj SiO_2 doprinose smanjenju otpornosti kanala, i time povećavaju struju drejna.

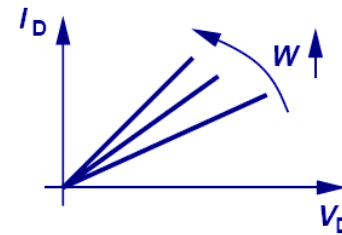
Efekat širine kanala (W)



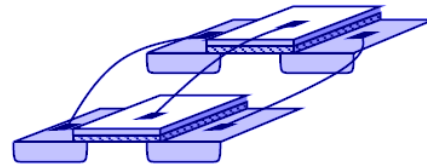
(a)



(b)



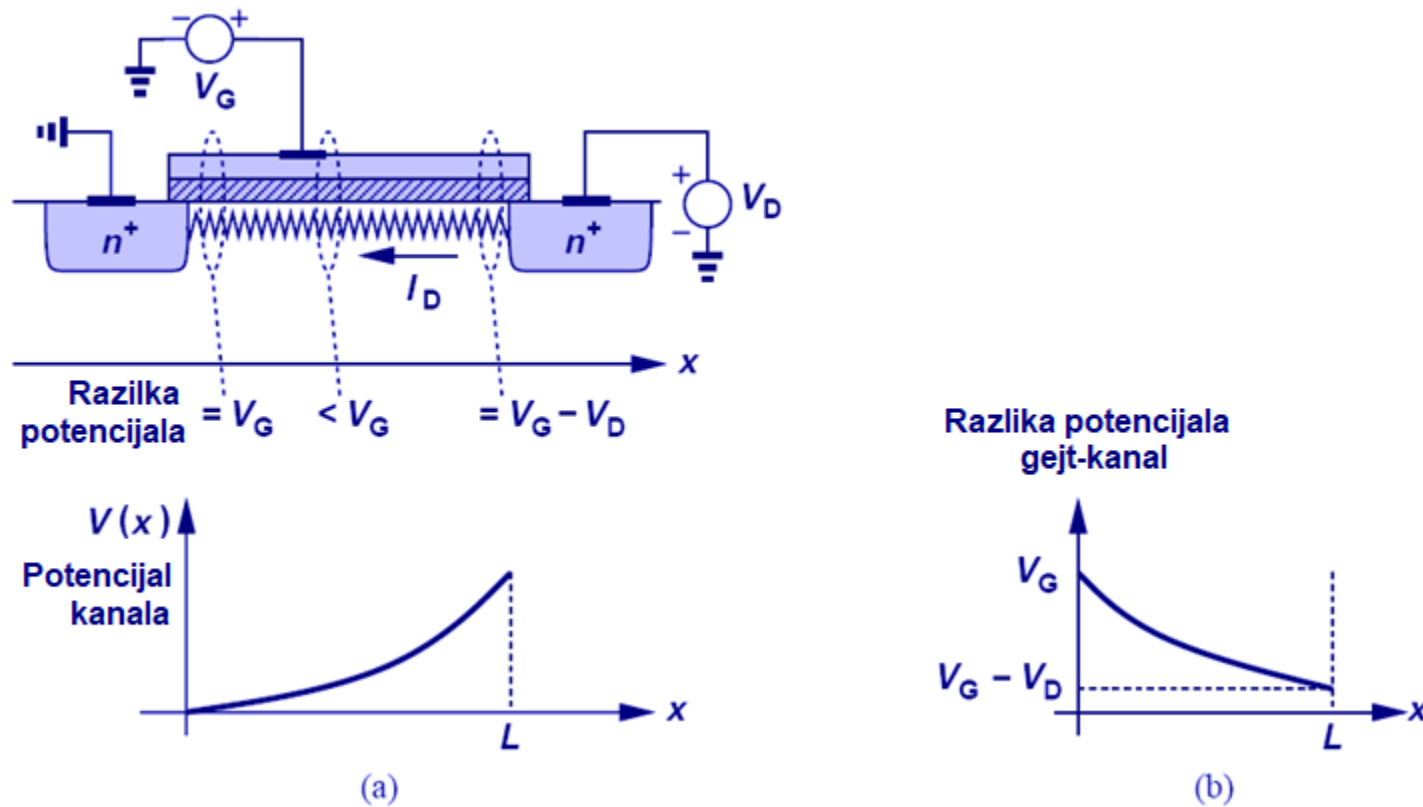
(c)



(d)

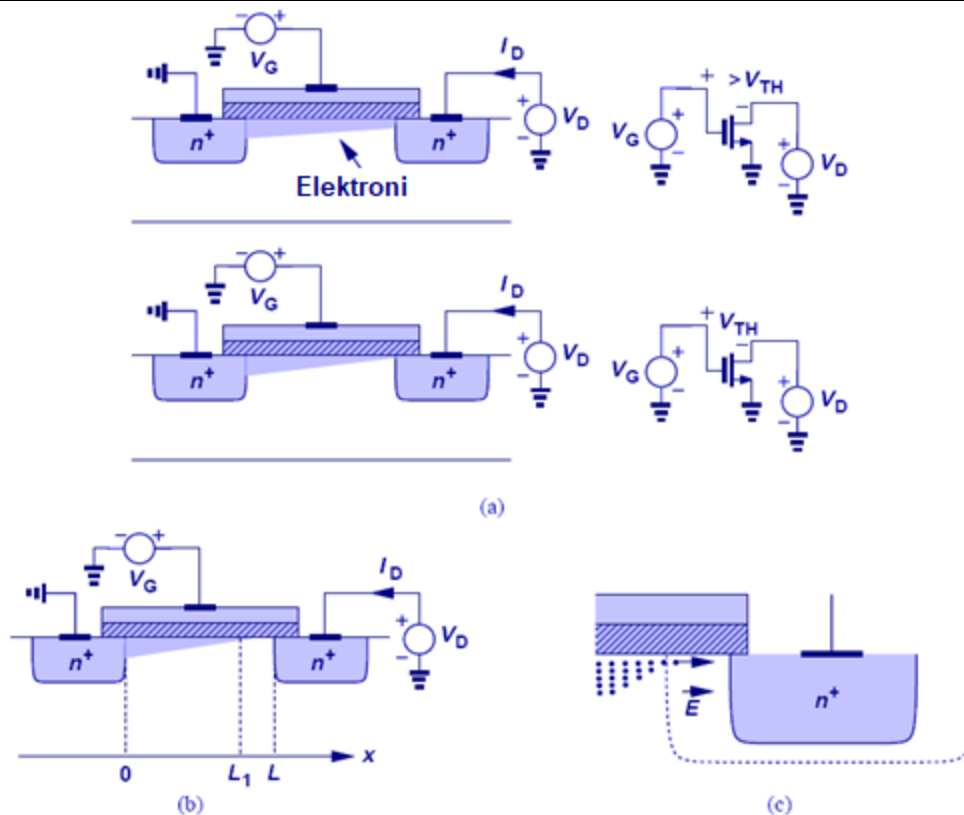
- Kako se širina gejta (kanala) povećava, usljed smanjenja otpornosti struja raste.
- Dupliranje širine gejta (kanala) može biti posmatrano kao dva MOSFET-a u paraleli.

Varijacije potencijala kanala



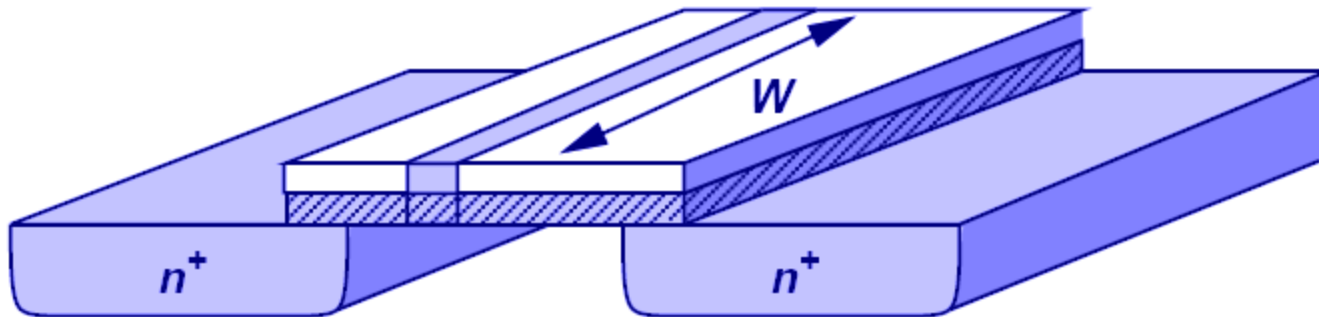
- Kako postoji otpornost kanala između drejna i gejta, i ako je drejn na većem potencijalu od sorsa, potencijal kanala raste od sorsa prema drejnu.
- Potencijal između gejta i kanala će opadati od sorsa ka drejnu.

Stiskanje kanala



- Kako potencijalna razlika između gejta i drjena postaje sve manja, kanal oko drejna počinje se stiskati.
- Kada postane $V_G - V_D = V_{th}$, kanal je potpuno stisnut.
- Daljim smanjivanjem razlike $V_G - V_D < V_{th}$, kanal počinje da se skraćuje.

Gustina naelektrisanja u kanalu

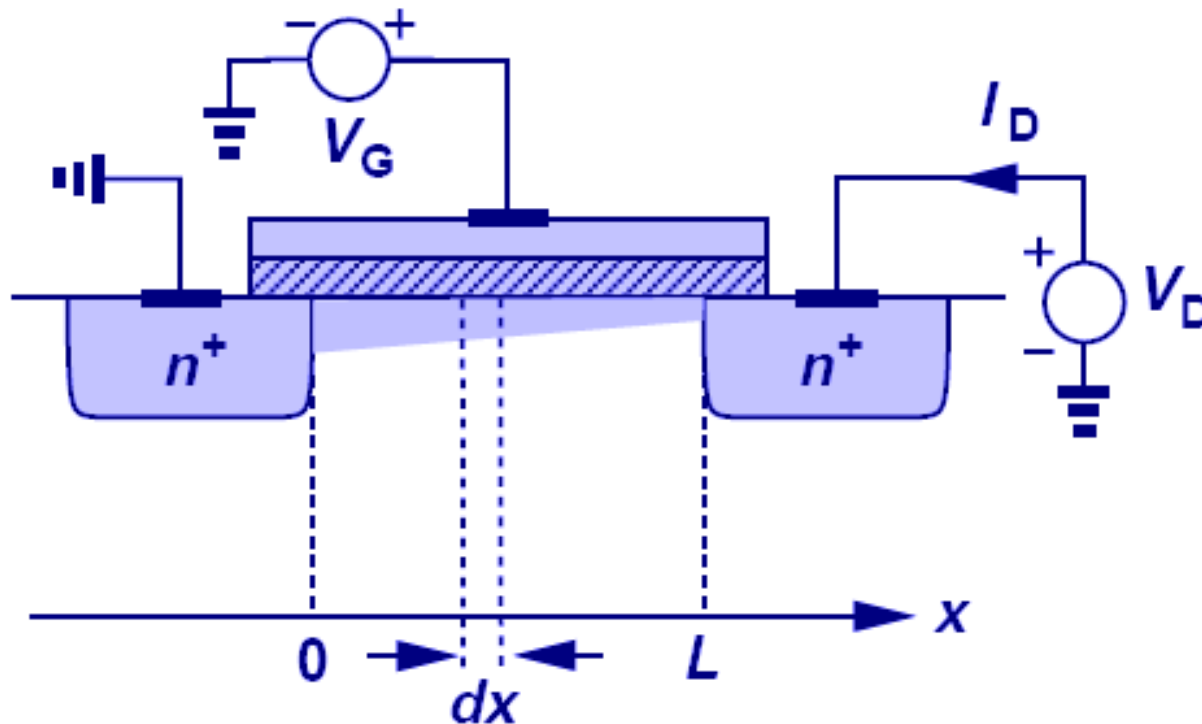


$$Q = WC_{ox}(V_{GS} - V_{TH})$$

➤ Naelektrisanje po jedinici dužine kanala

- W predstavlja širinu kanala
- C_{ox} oxide capacitance (kapacitivnost poloča kondenzatora po jedinici površine).

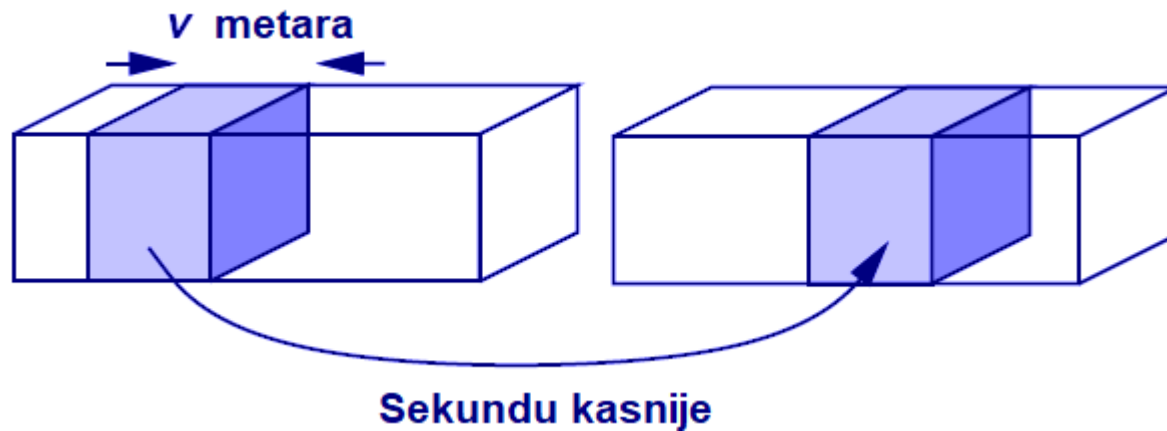
Gustina naelektrisanja u tački kanala u prisustvu V_{DS} napona



$$Q(x) = WC_{ox} [V_{GS} - V(x) - V_{TH}]$$

- Neka je x tačka duž kanala od sorsa ka drejnu, i $V(x)$ je njen potencijal.
- Izraz iznad daje gustinu naelektrisanja u tom presjeku.

Gustina naelektrisanja i stuja



$$I = Q \cdot v$$

- Struja elektrona koja teče od sorsa ka drejnu jednaka je proizvodu gustne naelektrisanja u kanalu i brzine kretanja naelektrisanja.

Struja drejna

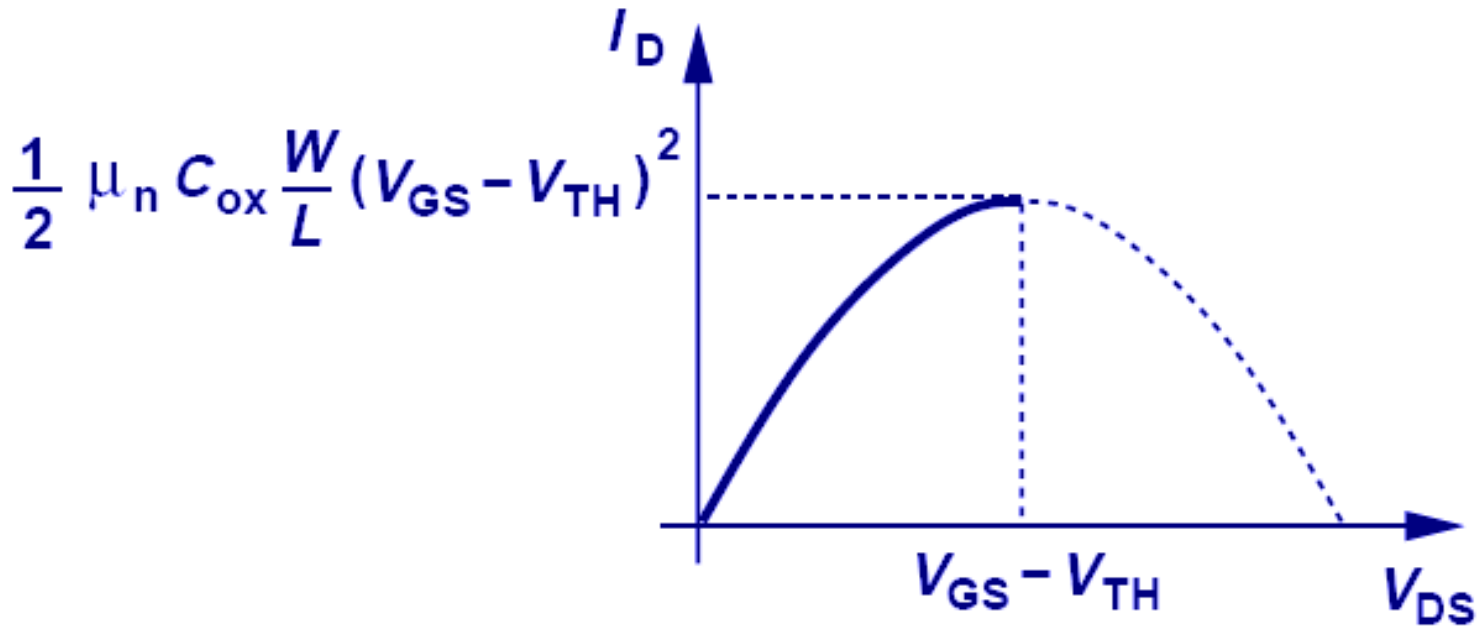
$$v = +\mu_n \frac{dV}{dx}$$

$$I_D = WC_{ox} [V_{GS} - V(x) - V_{TH}] \mu_n \frac{dV(x)}{dx}$$

$$I_D = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} [2(V_{GS} - V_{TH})V_{DS} - V_{DS}^2]$$

Parabolična I_D - V_{DS} zavisnost

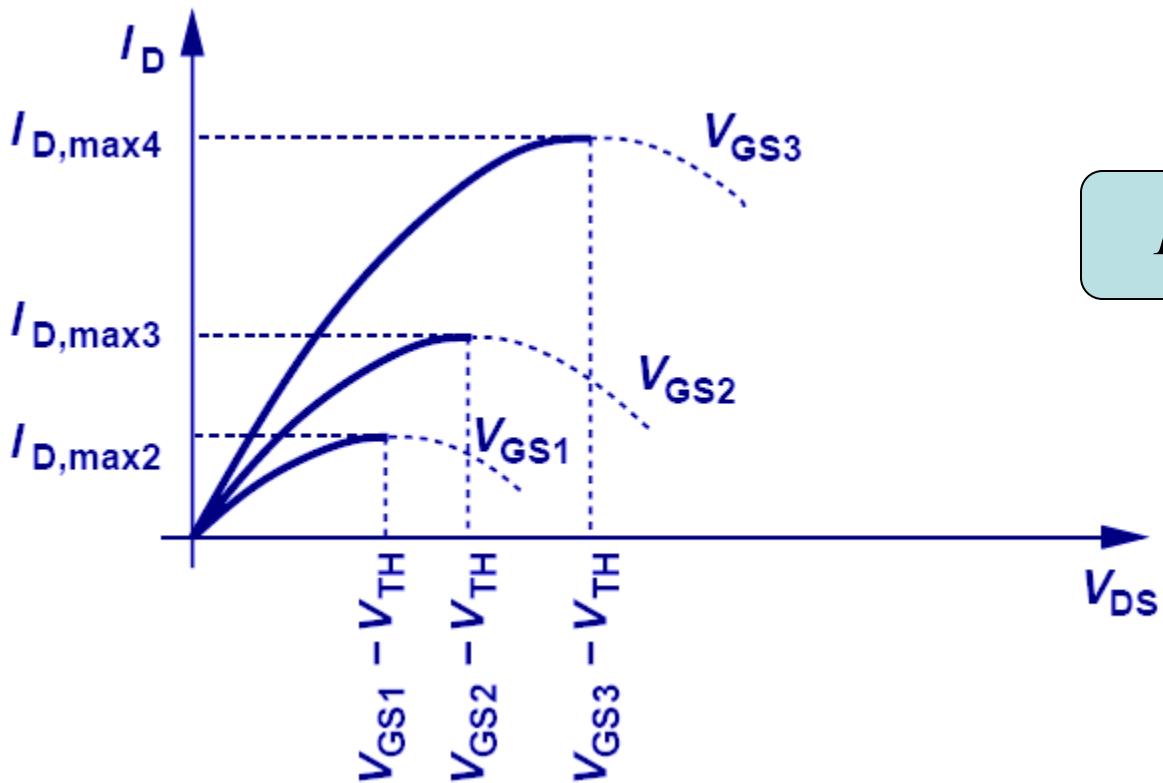
$$I_D = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} \left[2(V_{GS} - V_{TH})V_{DS} - V_{DS}^2 \right]$$



- Održavanjem V_G konstantnim i mijenjanjem V_{DS} , ima se parabolična zavisnost.
- Maksimalna struja dobija se kada je V_{DS} jednako $V_{GS} - V_{TH}$.

I_D - V_{DS} za različite vrijednosti V_{GS}

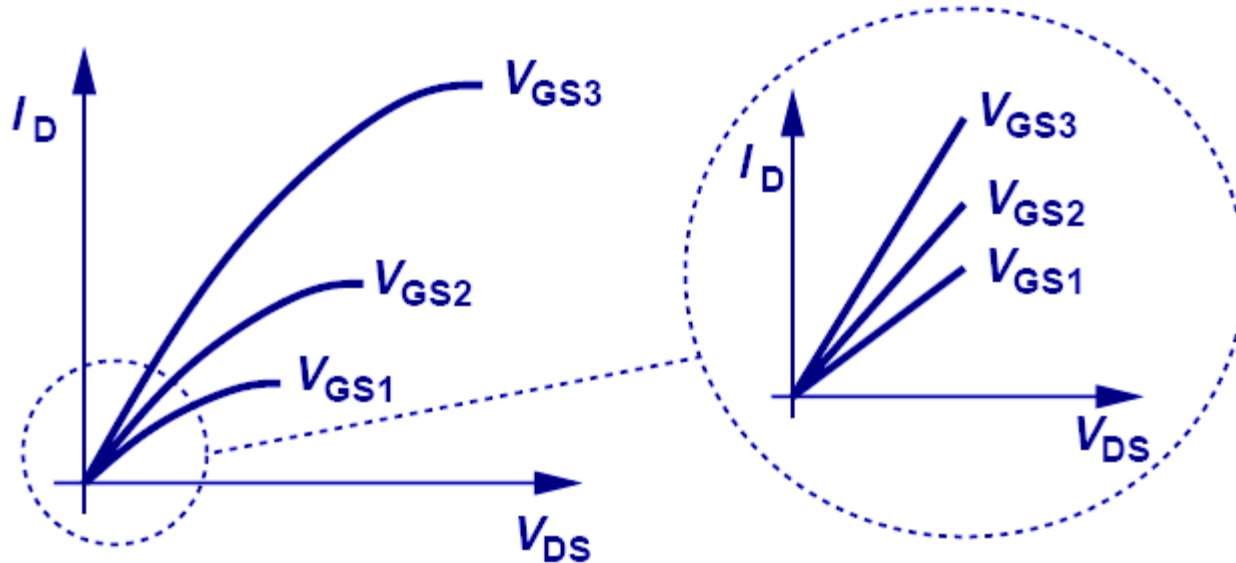
$$I_D = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} \left[2(V_{GS} - V_{TH})V_{DS} - V_{DS}^2 \right]$$



$$I_{D,max} \propto (V_{GS} - V_{TH})^2$$

Linearna zavisnost

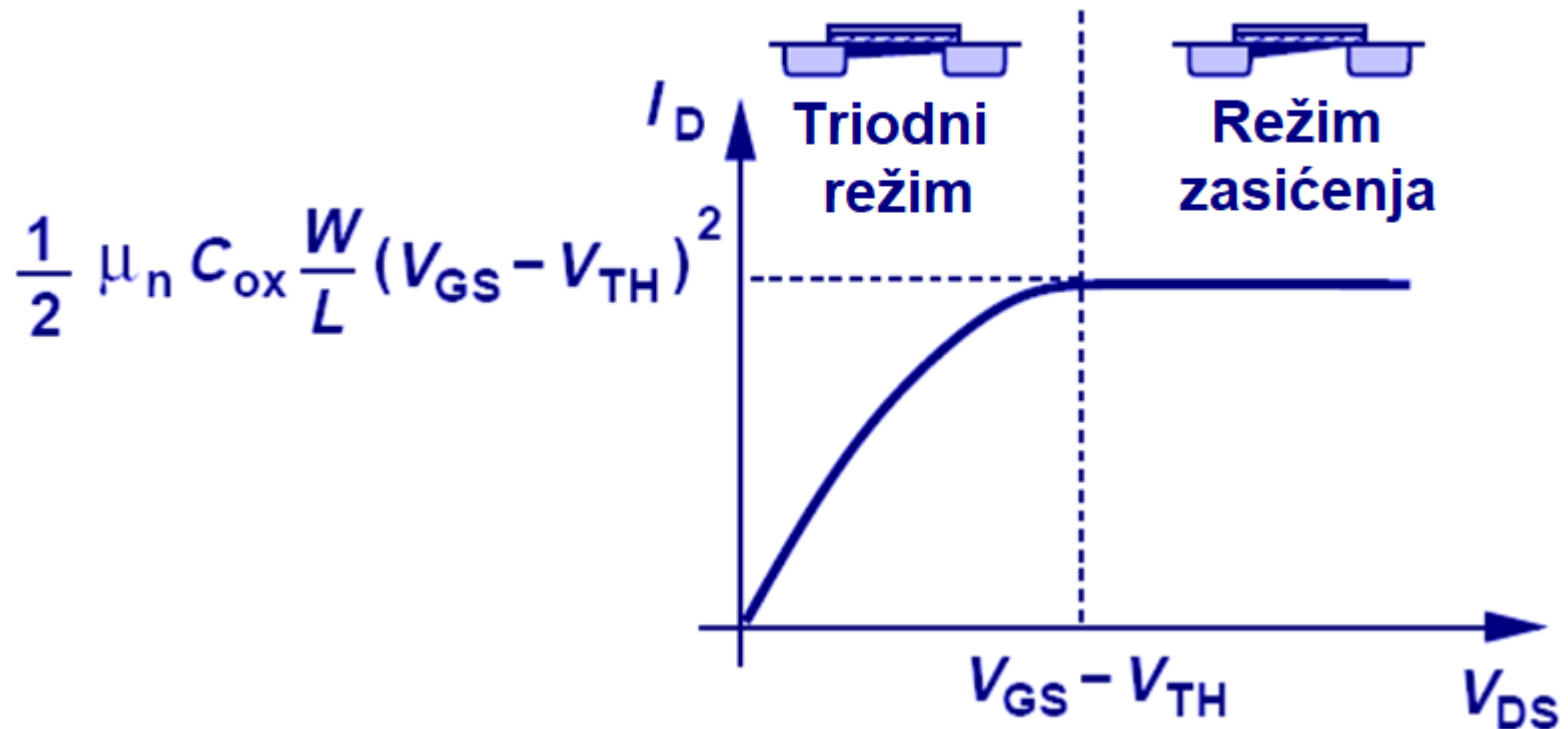
$$I_D = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} \left[2(V_{GS} - V_{TH})V_{DS} - V_{DS}^2 \right]$$



$$R_{on} = \frac{1}{\mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH})}$$

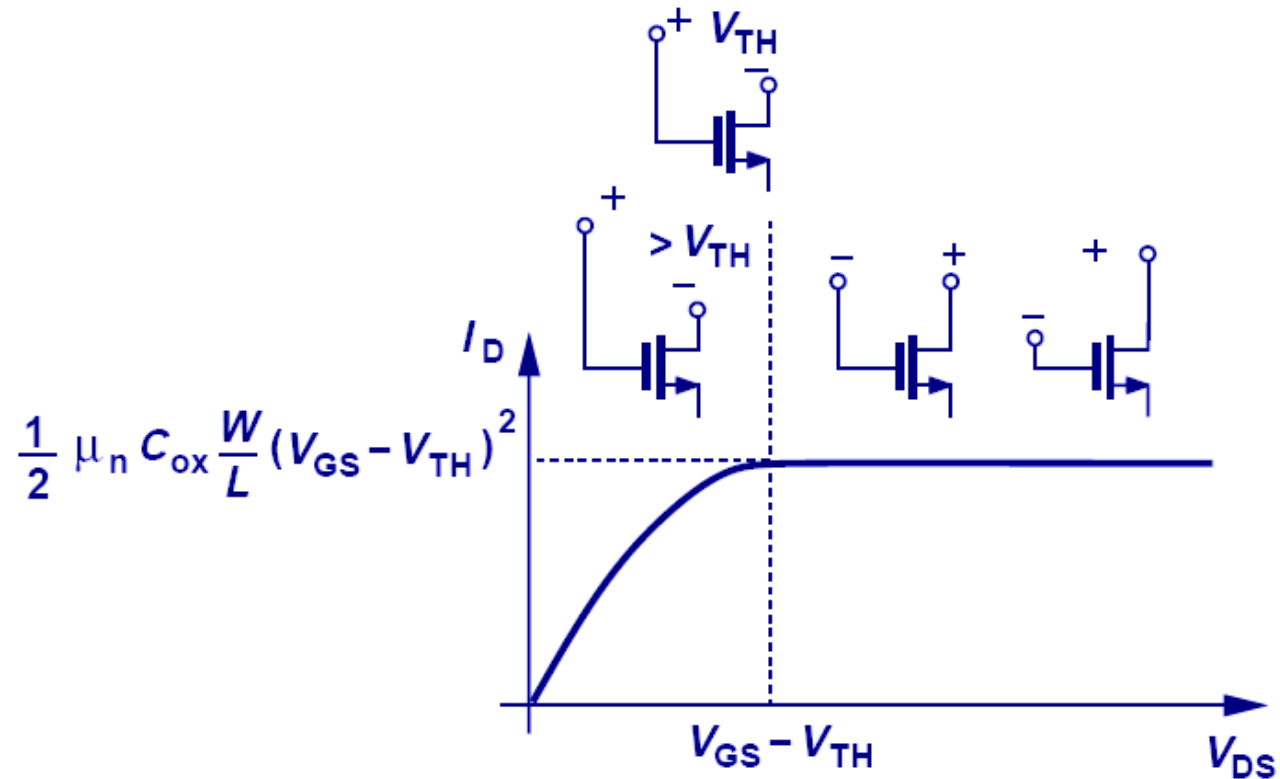
- Za male vrijednosti V_{DS} , transistor se može posmatrati kao otpornik, čija otpornost zavisi od napona na gejtju, odnosno napona V_{GS} .

Različiti režimi rada



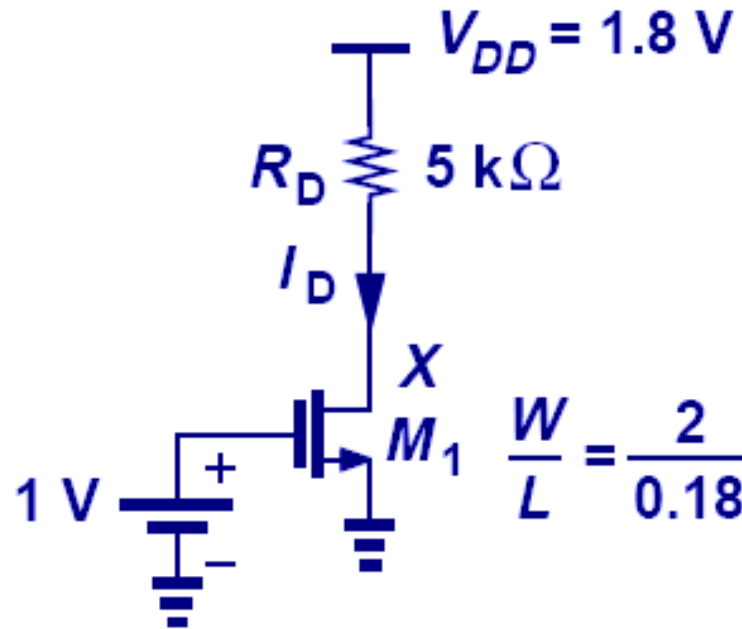
$$B = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L}$$

Kako odrediti režim rada



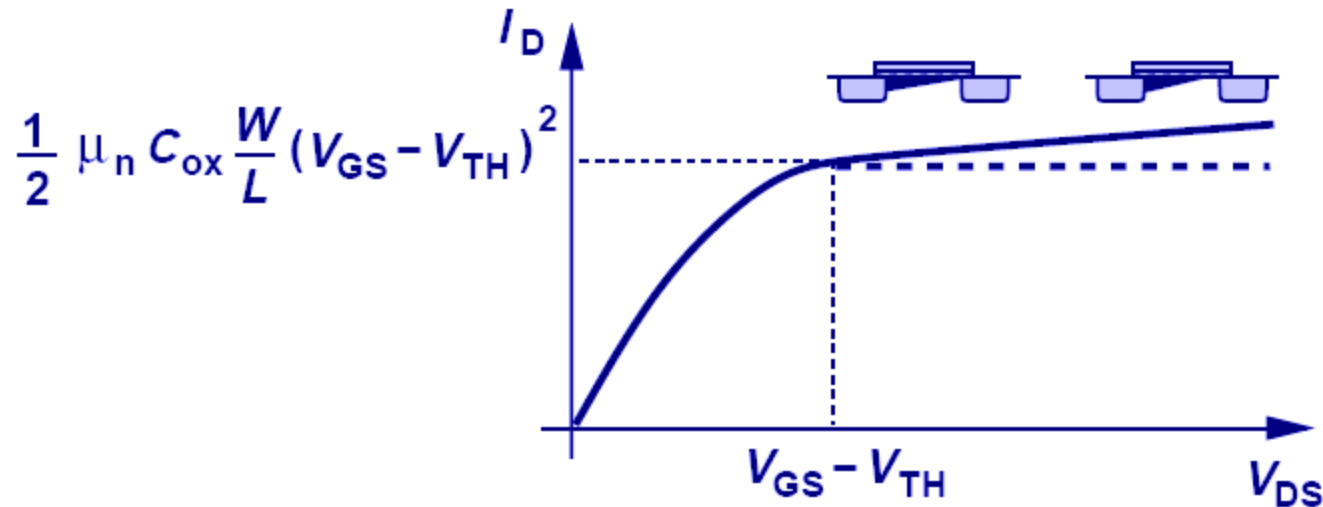
- Kada je potencijalna razlika između gejta i drejna veća od napona V_{TH} , MOSFET je u triodnom režimu.
- Kada potencijalna razlika između gejta i drejna postane jednaka ili manja od V_{TH} , MOSFET ulazi u region zasićenja.

Triodni režim ili zasićenje?



- Kada režim rada nije poznat, režim se pretpostavlja (inteligentna pretpostavka).
- Zatim se iz dobijenih rezultata provjerava pretpostavka.

Modulacija dužine kanala

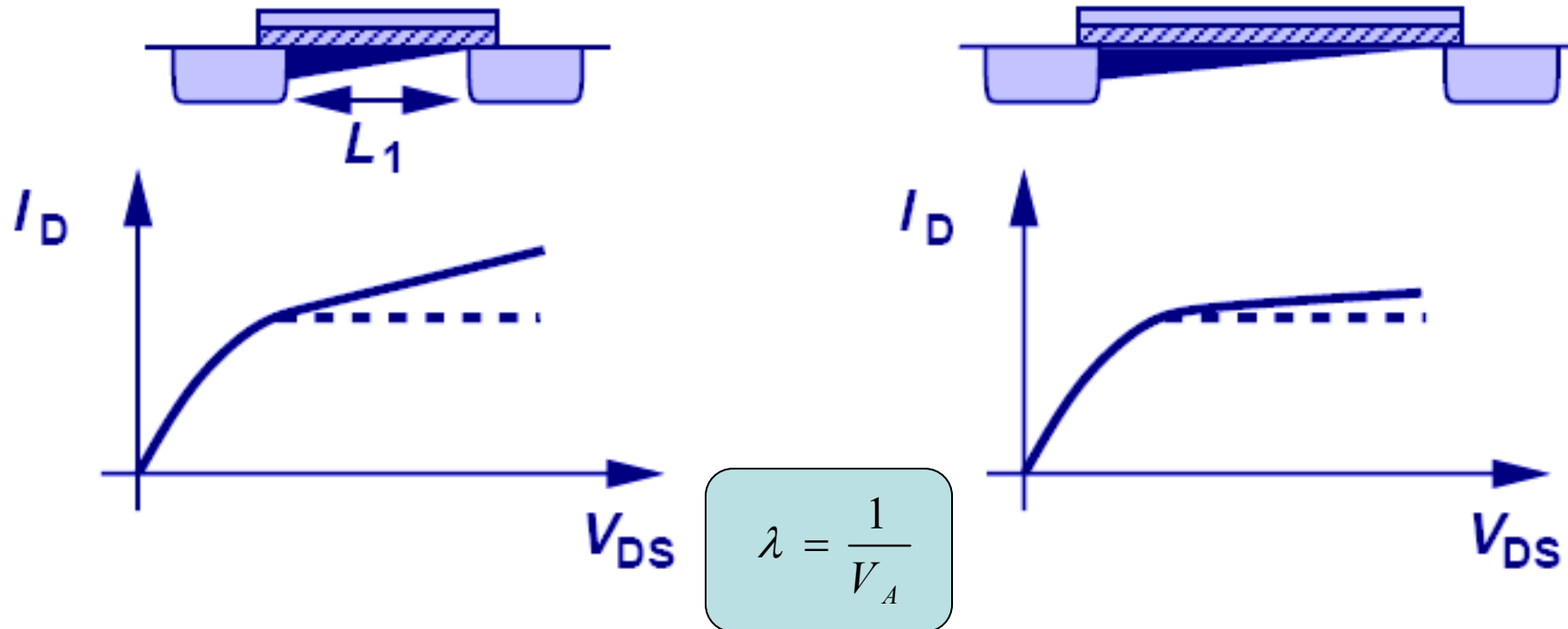


$$I_D = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH})^2 (1 + \lambda V_{DS})$$

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

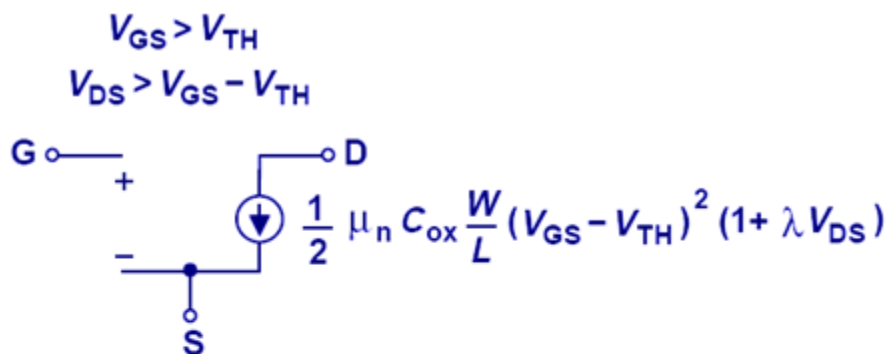
- Početno posmatranje da je u režimu zasićenja struja konstantna i nezavisna od napona V_D nije sasvim tačna.
- Tačka stiskanja kanala se pomjera ka sorsu kako V_D raste, i povećava se I_D .
- Dakle, struja drejna u zasićenju je slabo, ali ipak zavistna, od napona na drejnu, odnosno napona V_{DS} .

$$\lambda \propto L$$

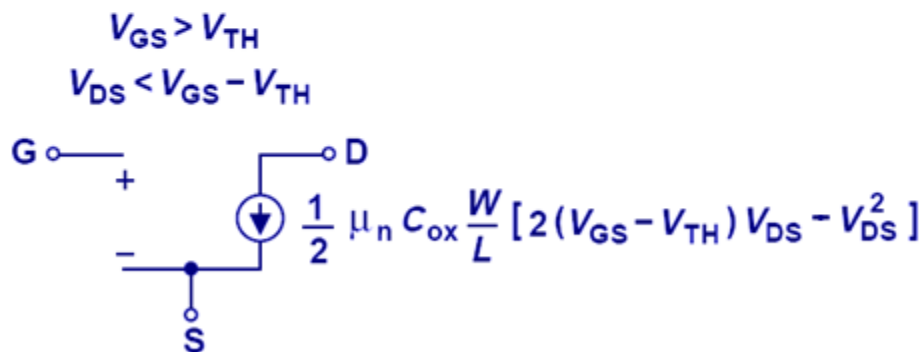


- Za razliku od Early-jevog efekta u BJT, uticaj faktora modulacije dužine kanala može biti kontrolisan od strane dizajnera kola.
- Za duže L , efekat modulacije dužine kanala je manji nego za kraće L .

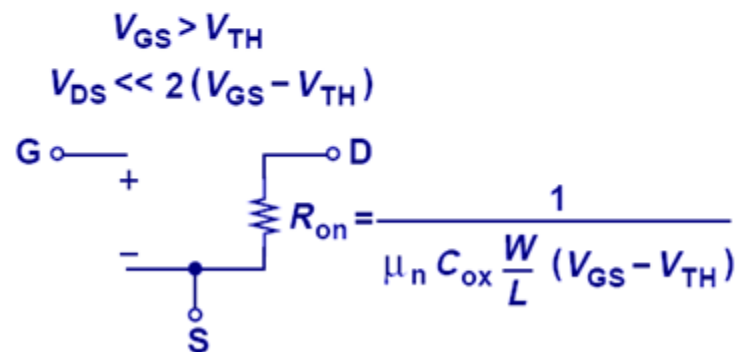
Model za velike signale



(a)



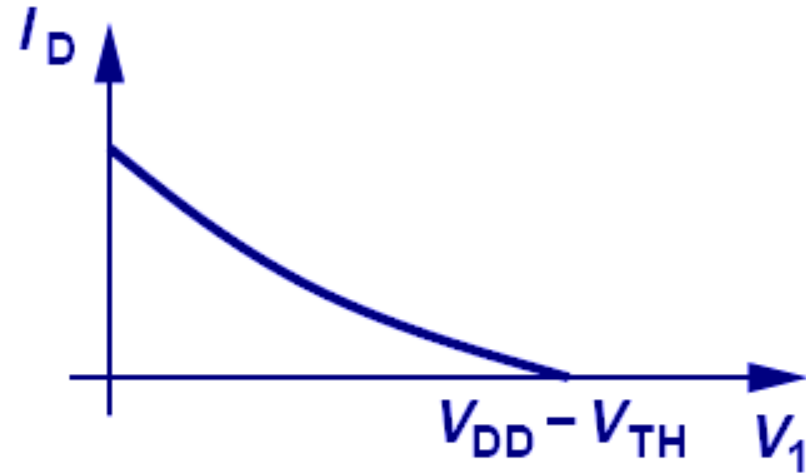
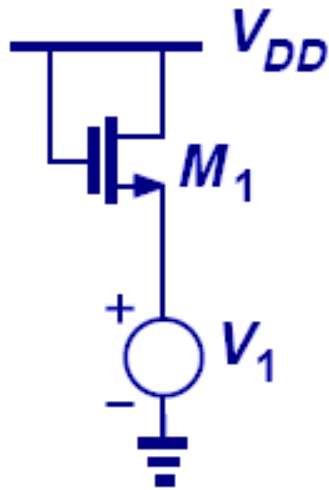
(b)



(c)

- U zavisnosti od vrijednosti V_{DS} napona, MOSFET se može predstaviti različitim modelima za velike signale.

Primjer: Ponašanje I_D u funkciji od V_1



$$I_D = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{DD} - V_1 - V_{TH})^2$$

- Kako je V_1 povezan na sors, njegovim rastom, struja drejna opada.

Transkonduktansa

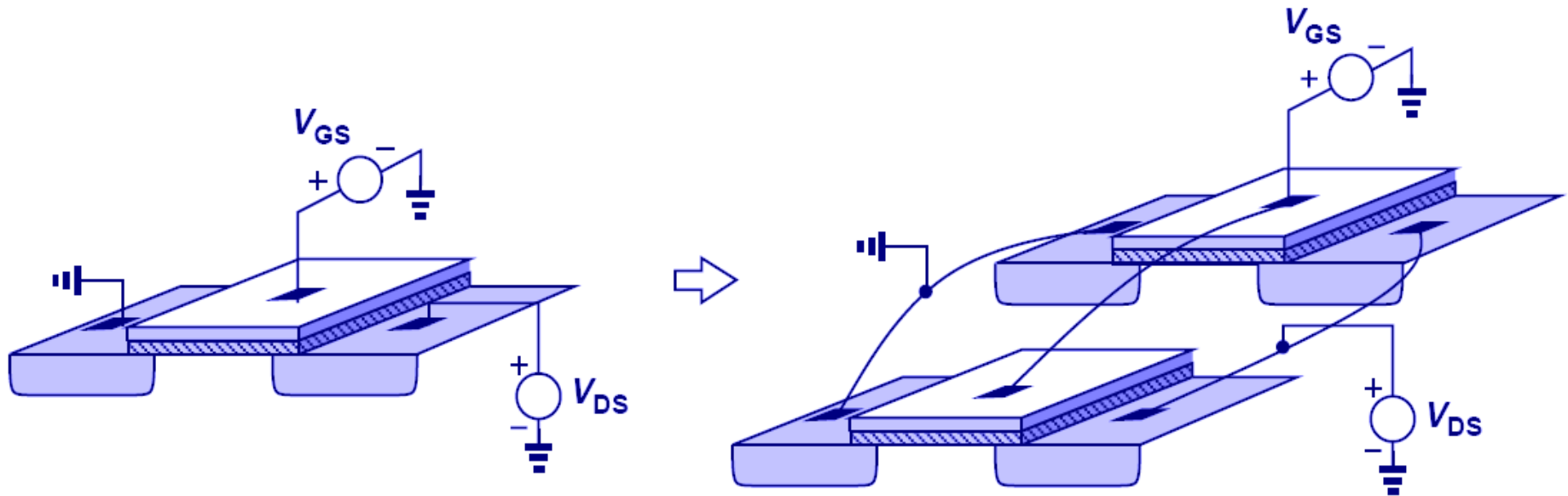
$$g_m = \frac{dI_D}{dV_{GS}} = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH})$$

$$g_m = \sqrt{2\mu_n C_{ox} \frac{W}{L} I_D}$$

$$g_m = \frac{2I_D}{V_{GS} - V_{TH}}$$

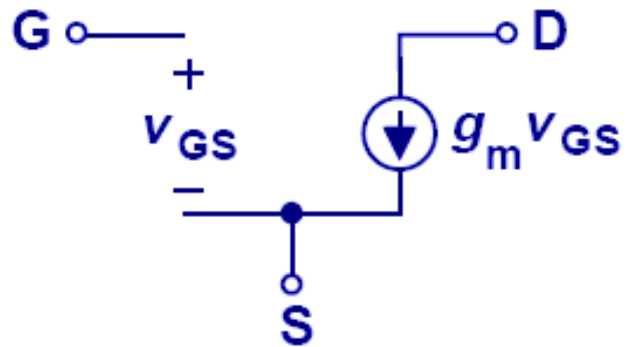
- Transkonduktansa je mjera koliko se struja drejna mijenja sa promjenom napona na gejt.
- Tri različita načina predstavljanja.

Dupliranje g_m usljed dupliranja W/L

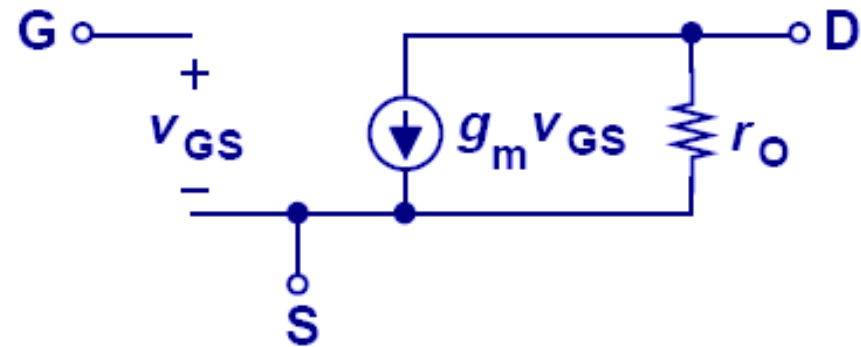


- Ako je W/L duplirano, to je zapravo ekvivalentno dodavanju tranzistora u paralelu, tako se duplira struja (ako je $V_{GS} - V_{TH}$ konstantno) i stoga i g_m .

Model za male signale



(a)

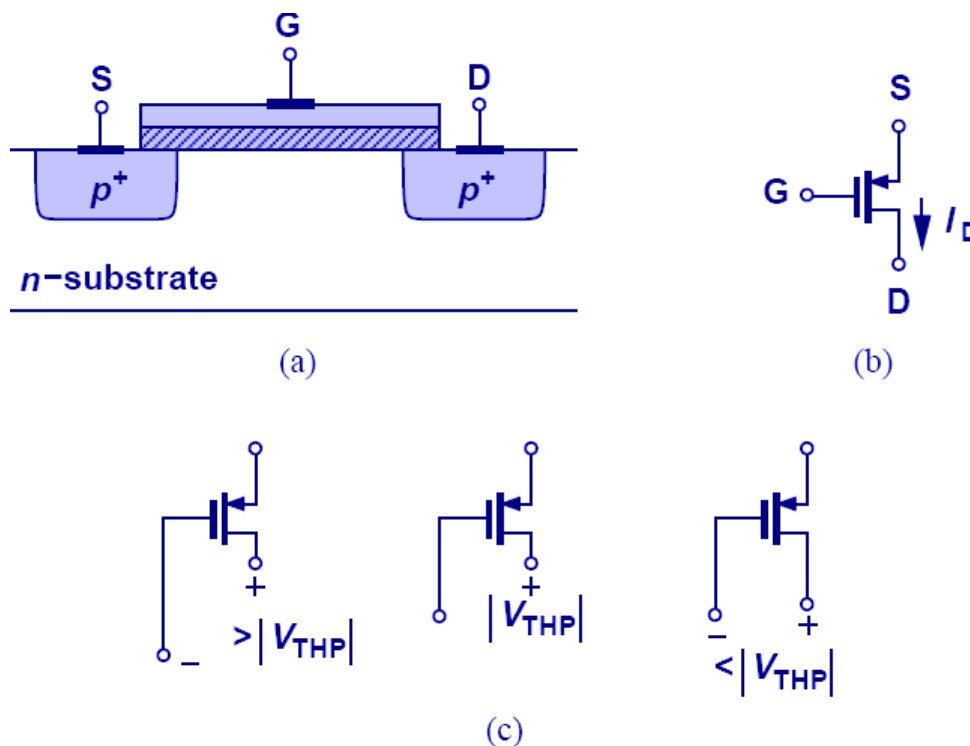


(b)

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

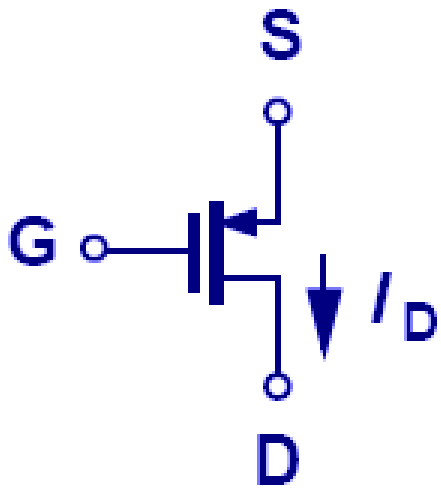
- Kada se radna tačka pomjera u granicama da tranzistor ostaje u režimu zasićenja, može se koristiti dati model za male signale.
- Izlazna otpornost predstavlja uticaj modulacije dužine kanala.

PMOS tranzistor



- Upravo kao PNP tranzistor u bipolarnoj tehnologiji, moguće je kreirati MOS tranzistor u kome su šupljine dominantni nosioci. Takav tranzistor se naziva PMOS.
- Ponaša se kao NMOS tranzistor, samo sa svim obrnutim polaritetima.

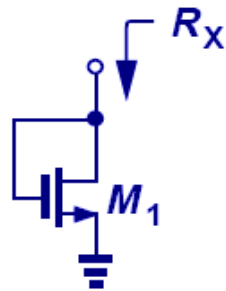
PMOS jednakosti



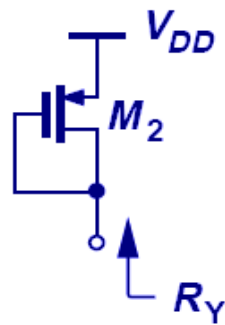
$$I_{D,sat} = \frac{1}{2} \mu_p C_{ox} \frac{W}{L} (V_{SG} - V_{TH})^2 (1 + \lambda V_{SD})$$

$$I_{D,tri} = \frac{1}{2} \mu_p C_{ox} \frac{W}{L} [2 (V_{SG} - V_{TH}) V_{SD} - V_{SD}^2]$$

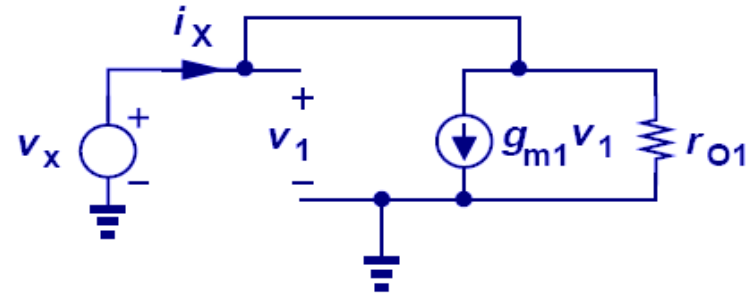
Model za male signale PMOS tranzistora



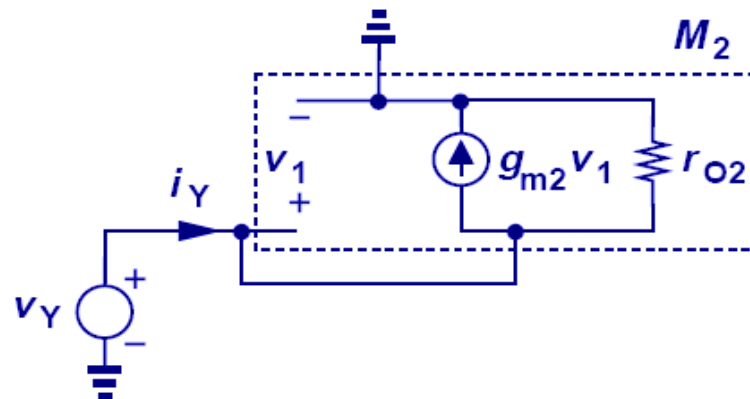
(a)



(a)



(b)



(c)

- Model za male signale PMOS tranzistora identičan je modelu za male signale NMOS tranzistora
- Nadalje, R_X je jednako R_Y i stoga jednako $(1/g_m) || r_o$.

Poređenje bipolarnih i MOS tranzistors

Bipolarni tranzistor	MOSFET
<p>Eksponencijalna karakteristika</p> <p>Aktivan: $V_{CB} > 0$</p> <p>Zasićen: $V_{CB} < 0$</p> <p>Mala struja baze</p> <p>Early-ev efekt</p> <p>Difuziona struja</p> <p>–</p>	<p>Kvadratna karakteristika</p> <p>Zasićen: $V_{DS} > V_{GS} - V_{TH}$</p> <p>Triodan: $V_{DS} < V_{GS} - V_{TH}$</p> <p>Nulta struja gejta</p> <p>Modulacija dužine kanala</p> <p>Kondukciona struja</p> <p>Naponski zavistan otpornik</p>

- Bipolarni transistor ima veće g_m nego MOSFET za datu struju kolektora, jer je njegova IV karakteristika eksponencijalna.

Pojačavačka kola sa MOSFET-om

- **Opšta razmatranja**
- **Stepen sa zajedničkim sorsom**
- **Stepen sa zajedničkim gejtom**
- **Stepen sa zajedničkim drejnom (Source Follower)**
- **Rezime i primjeri**

Pregled

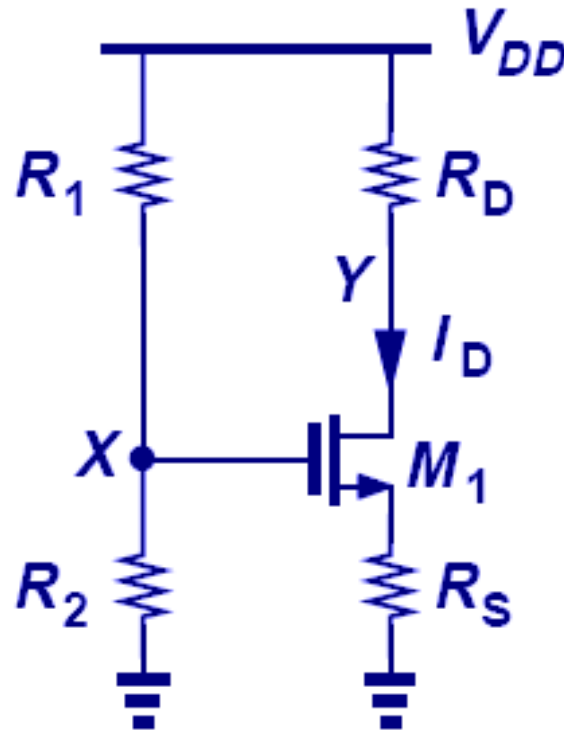
Opšti koncepti

- Polarizacija MOS stepena
- Realizacija strujnog izvora

MOS pojačavači

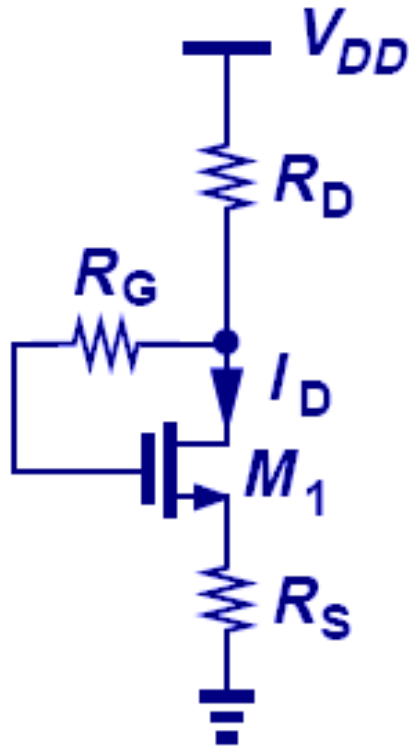
- Stepen sa zajedničkim sorsom
- Stepen sa zajedničkim gejtom
- Stepen sa zajedničkim drejnom (Source Follower)

MOS polarizacija



- Napon u tački X je određen sa V_{DD} , R_1 , i R_2 .
- V_{GS} se može naći, predpostavljajući režim rada i upotrebom relacije za I_D
- Potrebna provjera pretpostavke

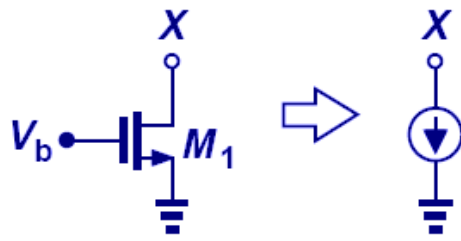
Samo-polarizacija MOS stepena



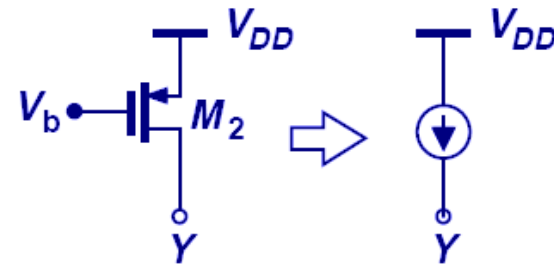
$$I_D R_D + V_{GS} + R_S I_D = V_{DD}$$

- Kolo se analizira uzimajući da je M_1 u zasićenju, bez pada napona na R_G .

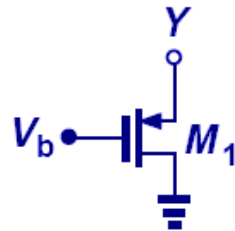
Strujni izvor



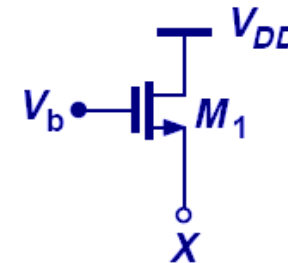
(a)



(b)



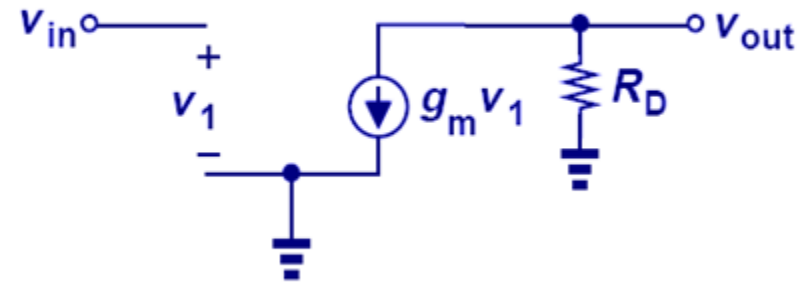
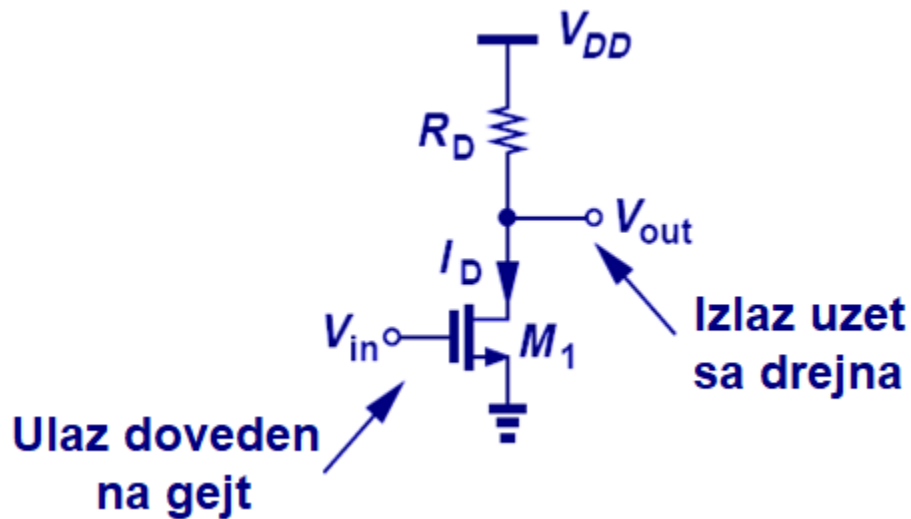
(c)



(d)

- Kada je MOSFET u zasićenju, ponaša se kao strujni izvor.
- NMOS provodi struju od tačke ka masi (strujni uvir), dok PMOS provodi struju od V_{DD} ka tački (strujni izvor).

Stepen sa zajedničkim sorsom (ZS)

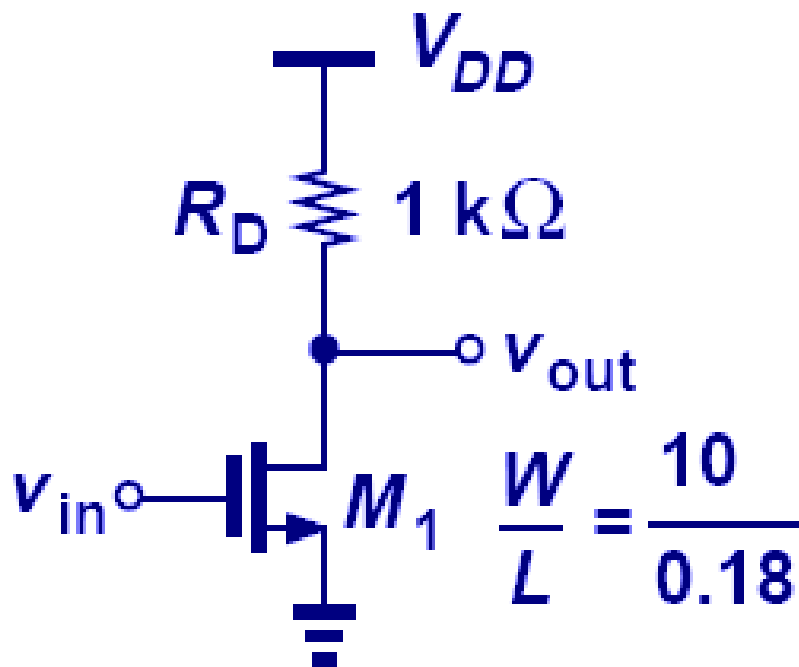


$$\lambda = 0 \quad (V_A \rightarrow \infty)$$

$$A_v = -g_m R_D$$

$$A_v = -\sqrt{2\mu_n C_{ox} \frac{W}{L} I_D} R_D$$

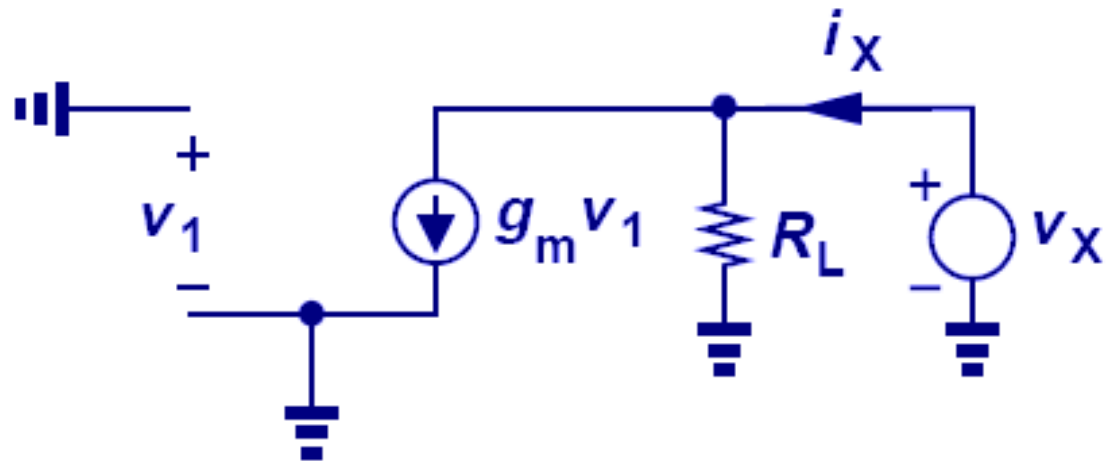
Rad u zasićenju



$$R_D I_D < V_{DD} - (V_{GS} - V_{TH})$$

- Da bi transistor radio u zasićenju, V_{out} ne smije pasti ispod V_{in} za više od napona praga.

ZS stepen sa $\lambda=0$ ($V_A \rightarrow \infty$)

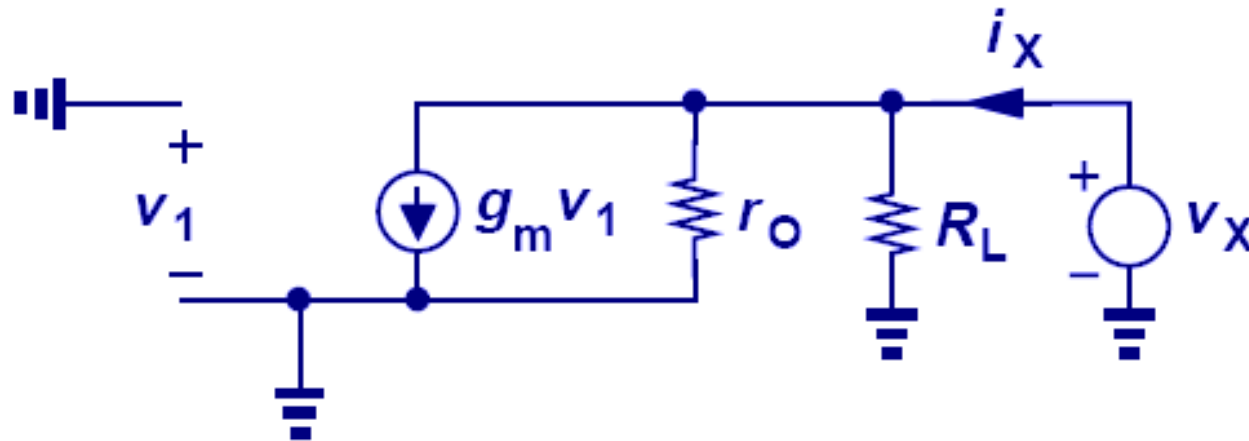


$$A_v = -g_m R_L$$

$$R_{in} = \infty$$

$$R_{out} = R_L$$

ZS stepem sa $\lambda \neq 0$



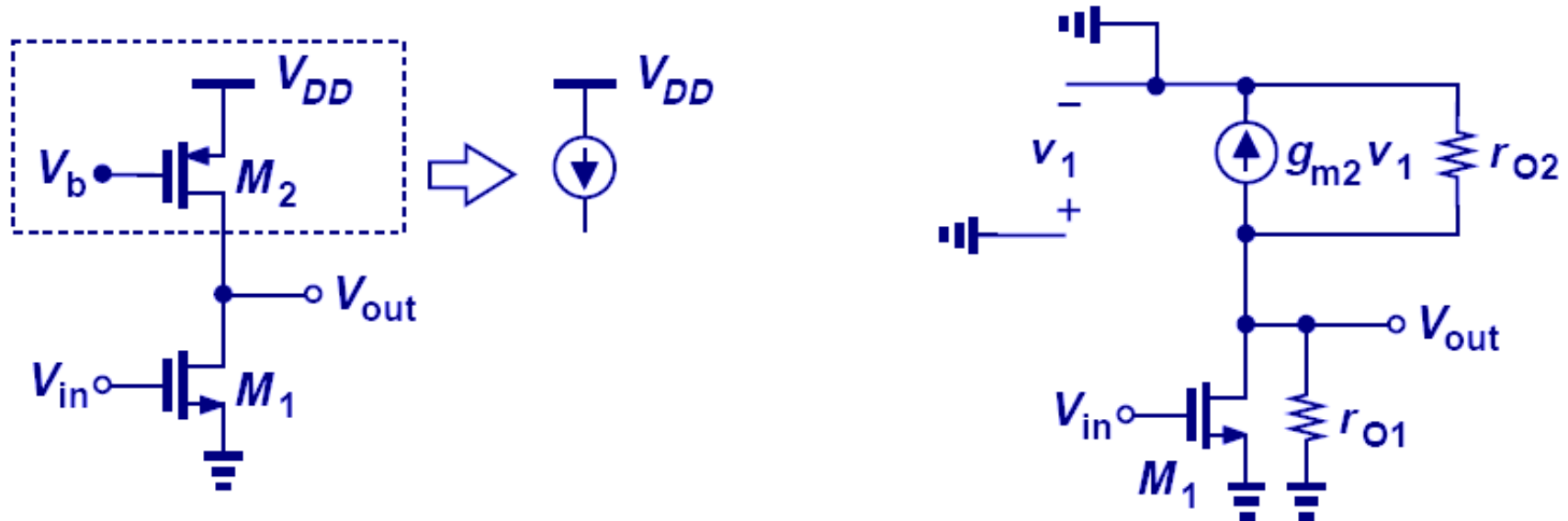
$$A_v = -g_m (R_L \parallel r_o)$$

$$R_{in} = \infty$$

$$R_{out} = R_L \parallel r_o$$

- Early-efekt ZE stepena i efekt modulacije dužine kanala ZS modulišu se na sličan način.

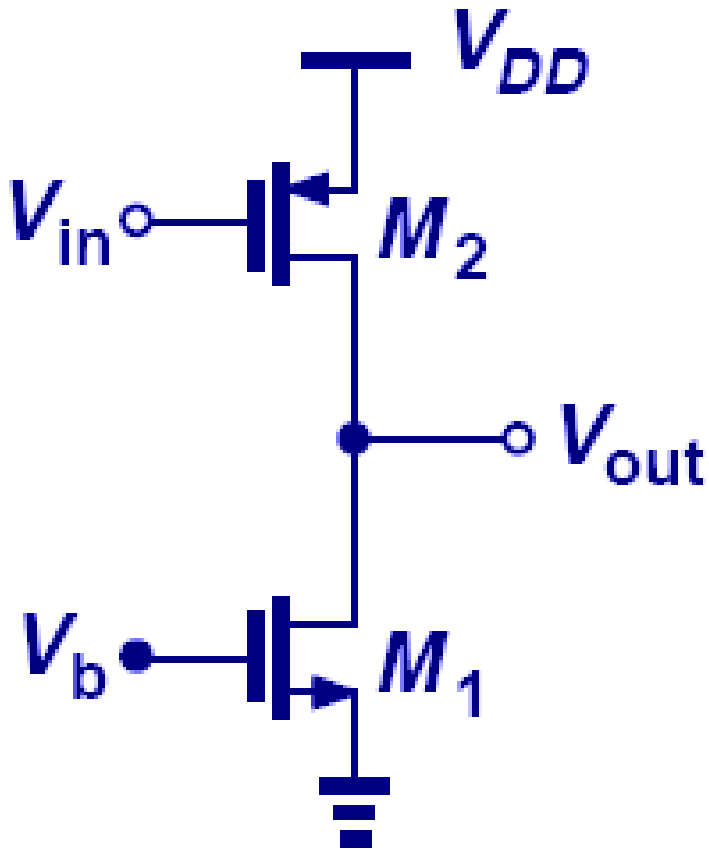
ZS stepen sa strujnim izvorom kao opterećenjem



$$A_v = -g_{m1} (r_{O1} \parallel r_{O2})$$

$$R_{out} = r_{O1} \parallel r_{O2}$$

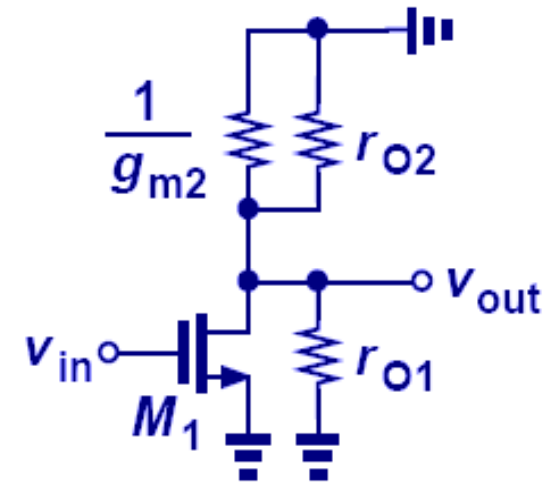
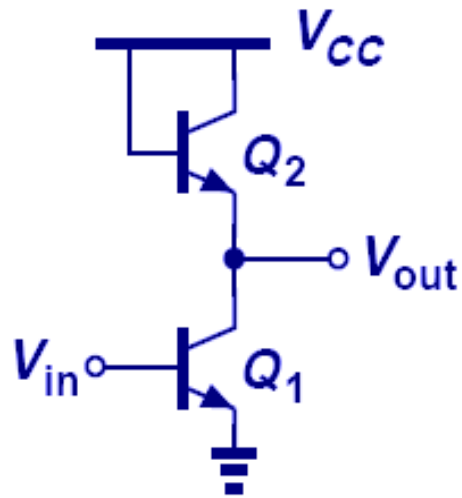
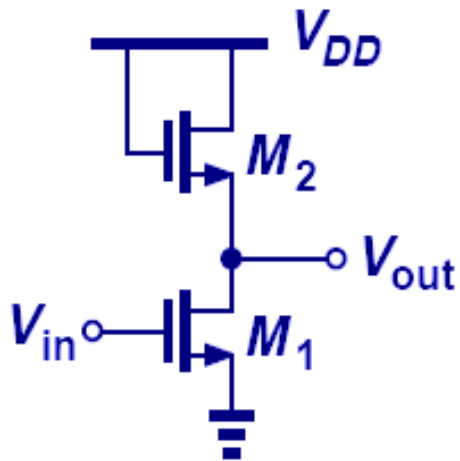
PMOS ZS stepen sa NMOS kao opterećenjem



$$A_v = -g_{m2}(r_{o1} \parallel r_{o2})$$

- Slično, sa PMOS kao ulaznim stepenom i NMOS kao opterećenjem, naponsko pojačanje je isto kao i kod kola na predhodnom slajdu.

ZS stepen sa diodnim opterećenjem

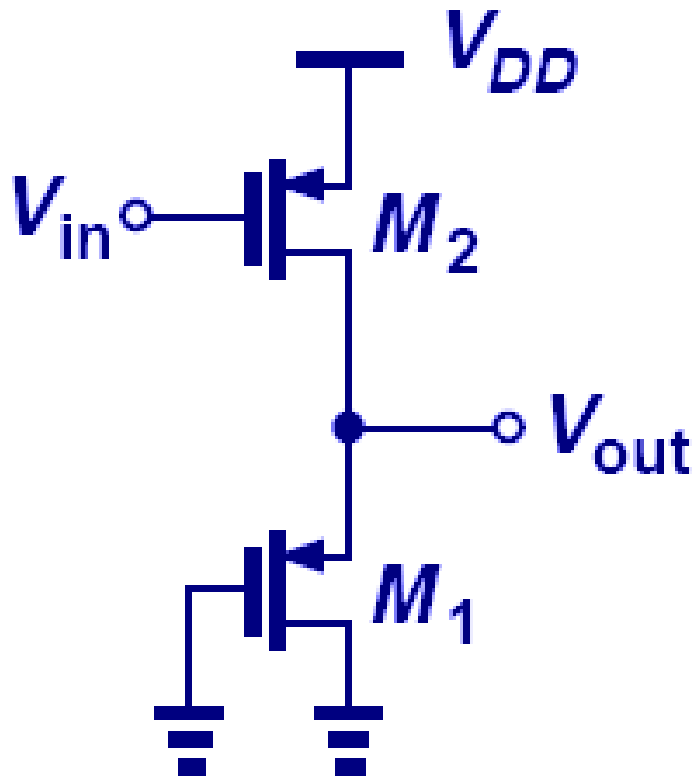


$$A_v = -g_{m1} \cdot \frac{1}{g_{m2}} = -\sqrt{\frac{(W/L)_1}{(W/L)_2}}$$

$$A_v = -g_{m1} \left(\frac{1}{g_{m2}} \parallel r_{O2} \parallel r_{O1} \right)$$

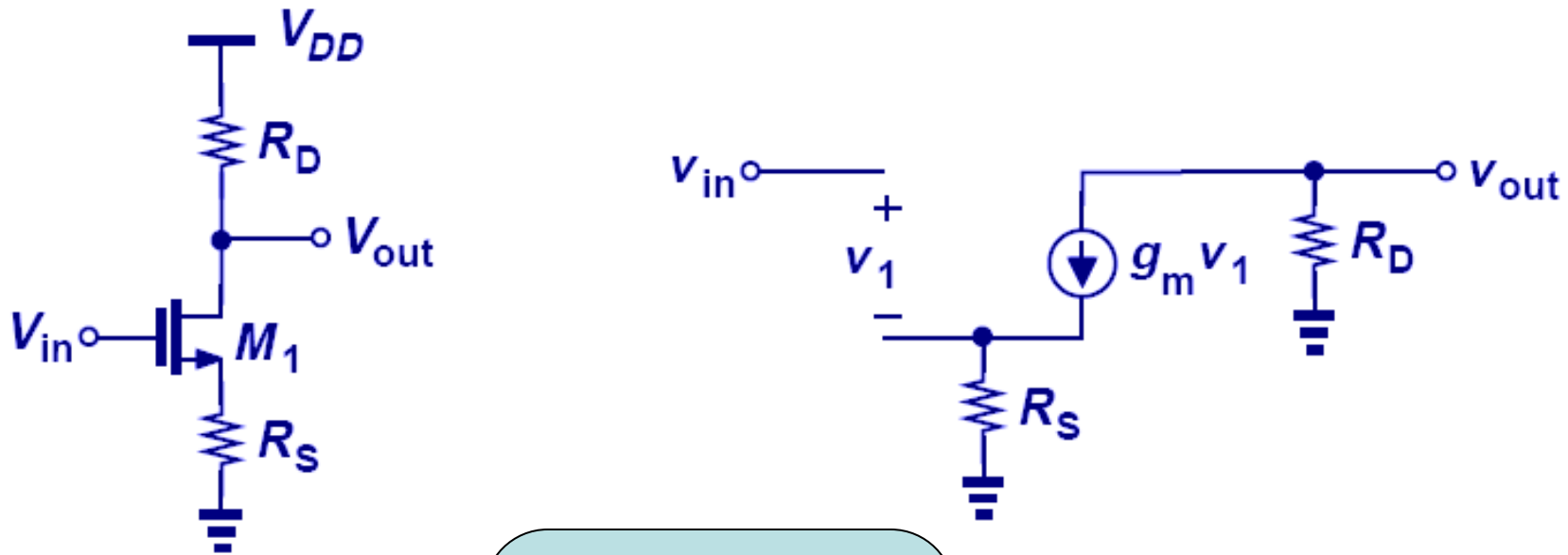
- Niže pojačanje, ali manje zavisno od procesnih parametara.

PMOS CS stepen sa diodnim opterećenjem



$$A_v = -g_{m2} \left(\frac{1}{g_{m1}} \parallel r_{o1} \parallel r_{o2} \right)$$

ZS stepen sa otpornikom u sorsu

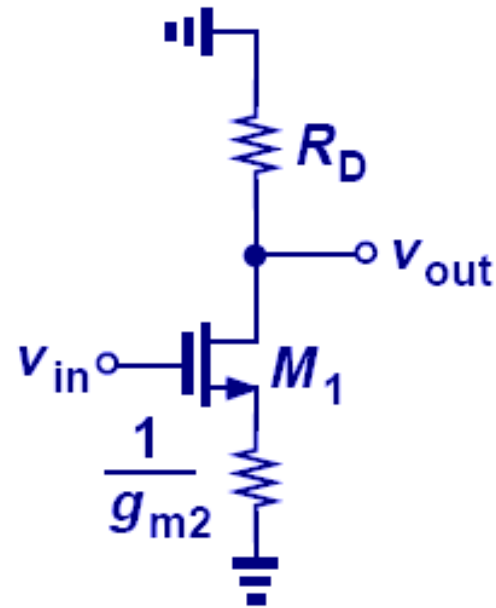
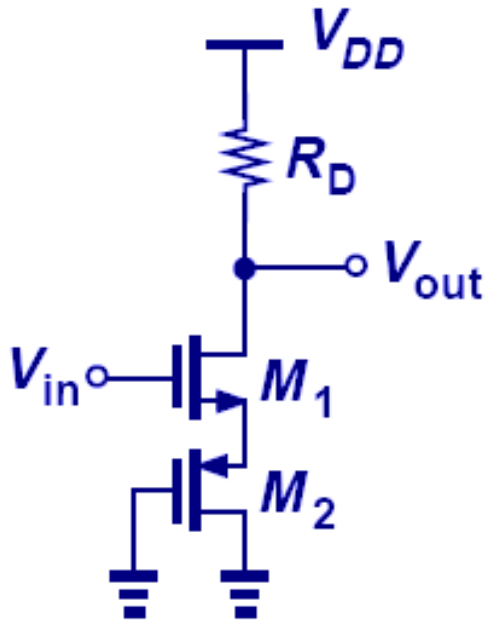


$$A_v = -\frac{R_D}{\frac{1}{g_m} + R_S}$$

$$\lambda = 0$$

- Slično kao kod bipolarnog ZE pandana, kada se ima otpornik u emitoru.

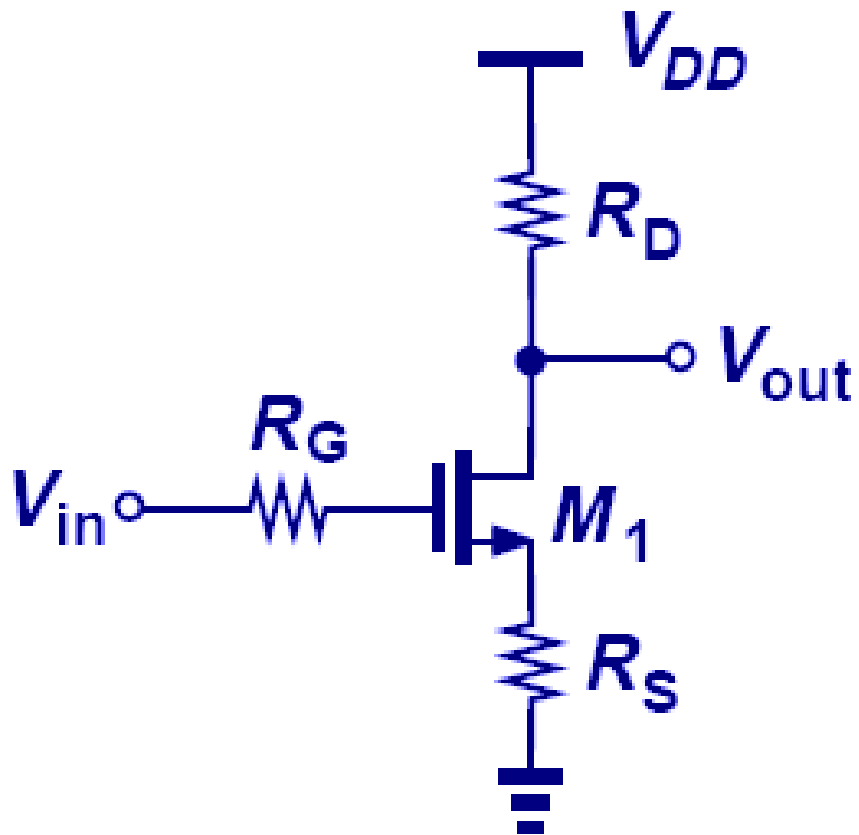
Primjer ZS stepena sa otpornikom u sorsu



$$A_v = - \frac{R_D}{\frac{1}{g_{m1}} + \frac{1}{g_{m2}}}$$

- Diodno kolo predstavlja otpornik u sorsu ZS stepena.

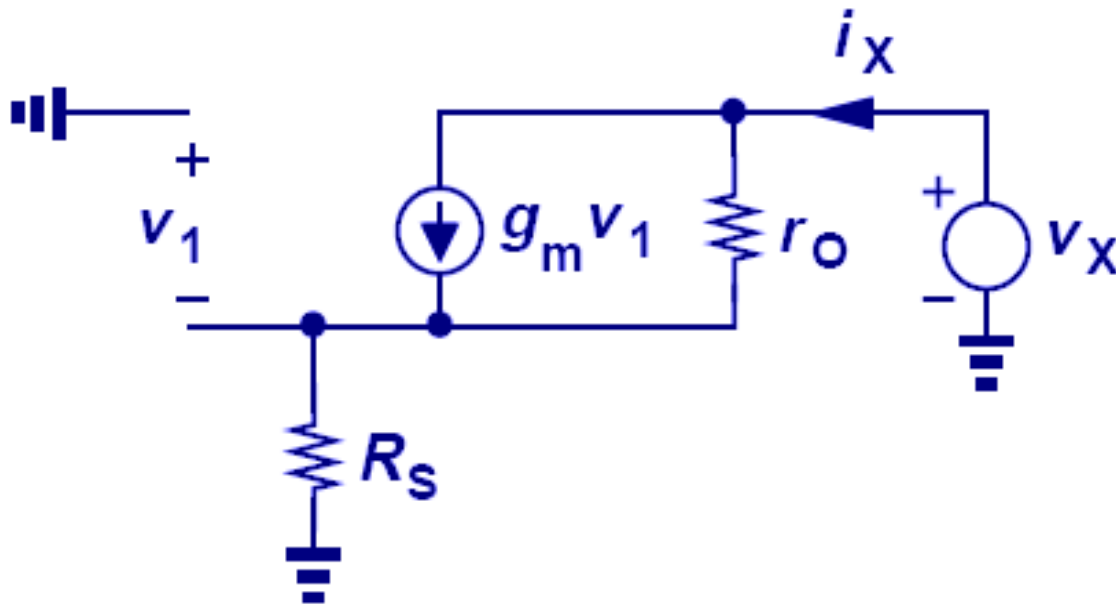
ZS stepen sa otpornikom u gejtju



$$V_{R_G} = 0$$

- Kako na nižim frekvencijama gejt ne provodi struju, otpornost u gejtju nema efekta na pojačanje i I/O impedanse.

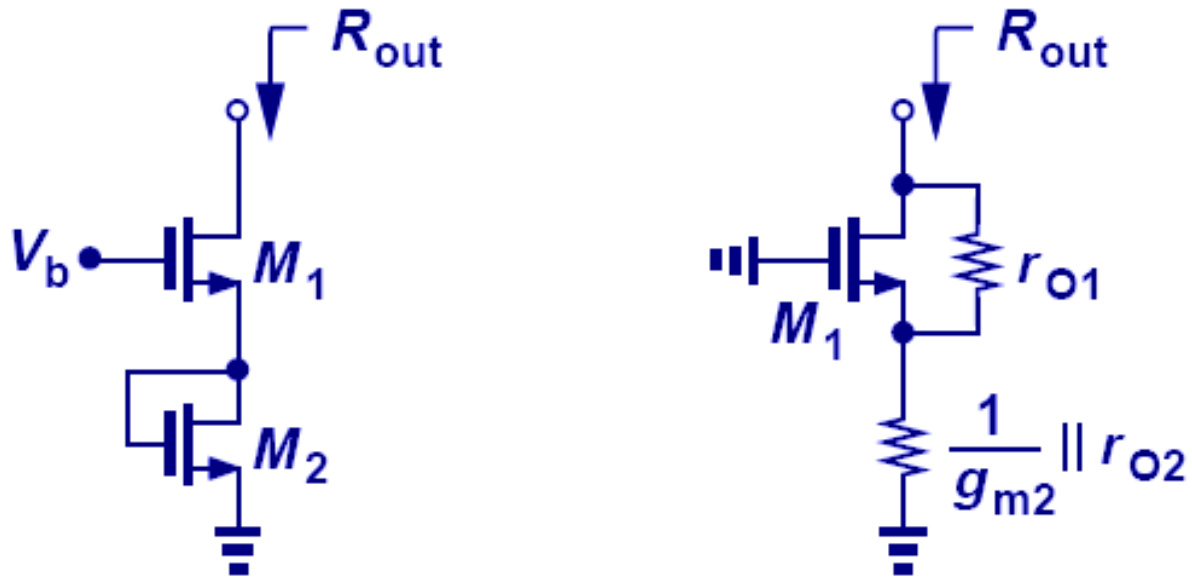
Izlazna impedansa ZS stepena sa otpornikom u sorsu



$$r_{out} \approx g_m r_o R_S + r_o$$

- Slično sa bipolarnim pandanom, otpornik u sorsu povećava izlaznu impedansu.

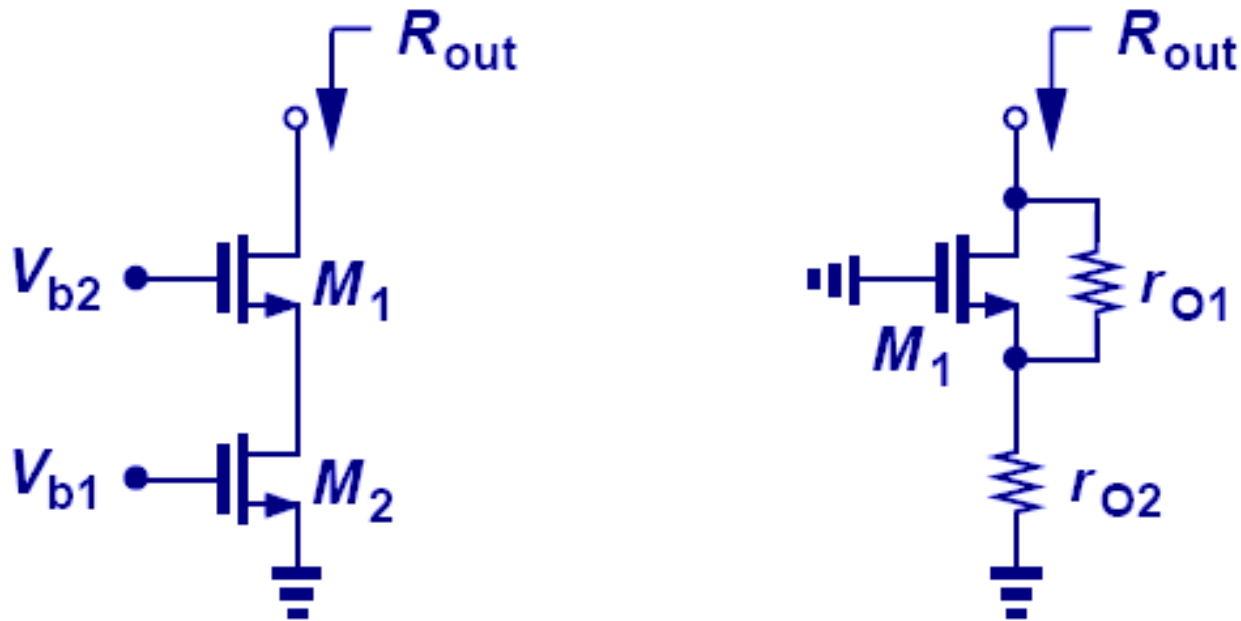
Izlazna impedansa: Primjer 1



$$R_{out} = r_{O1} \left(1 + g_{m1} \frac{1}{g_{m2}} \right) + \frac{1}{g_{m2}}$$

- Kada je $1/g_m$ u paraleli sa r_{O2} , često uzimamo samo $1/g_m$.

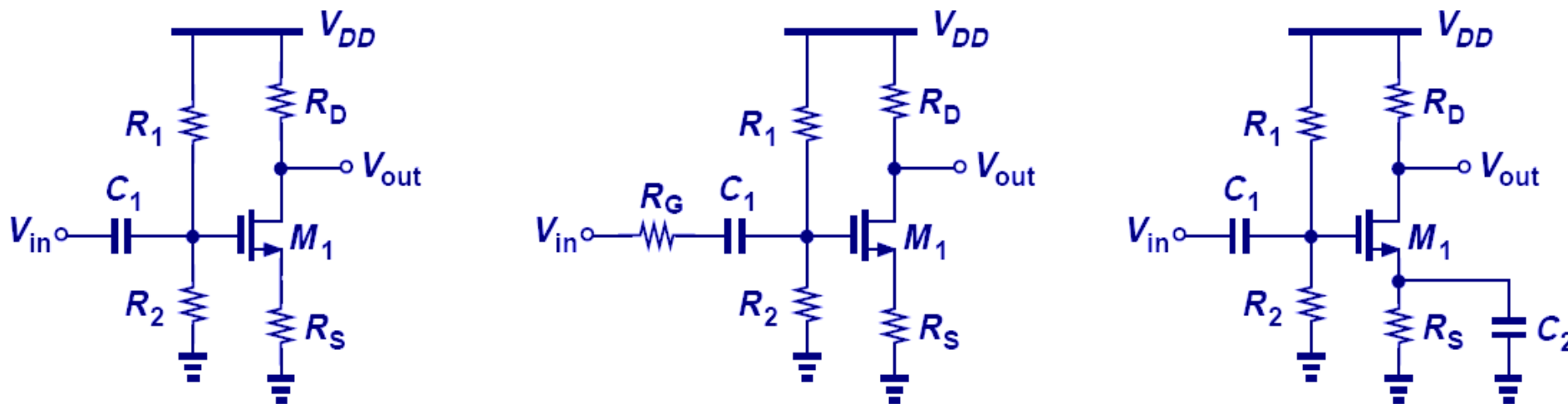
Izlazna impedansa: Primjer 2



$$R_{out} \approx g_{m1} r_{O1} r_{O2} + r_{O1}$$

- U ovom primjeru, impedansa u grani sorsa je r_o , umjesto $1/g_m$ kao u predhodnom slučaju.

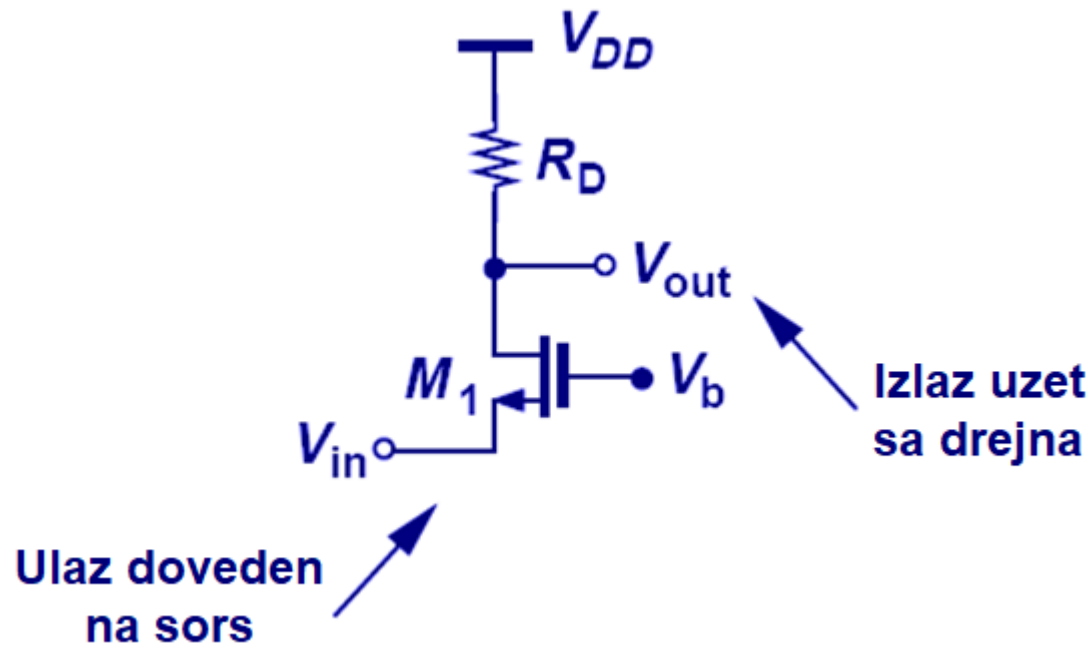
Polarizacija ZS



$$A_v = \frac{R_1 \parallel R_2}{R_G + R_1 \parallel R_2} \cdot \frac{-R_D}{\frac{1}{g_m} + R_S}, A_v = -\frac{R_1 \parallel R_2}{R_G + R_1 \parallel R_2} g_m R_D$$

- Impedansa u sorsu koristi se da stabilizuje radnu tačku, i kondenzator C_2 se može upotrijebiti za dobijanje većeg pojačanja na frekvenciji od interesa.

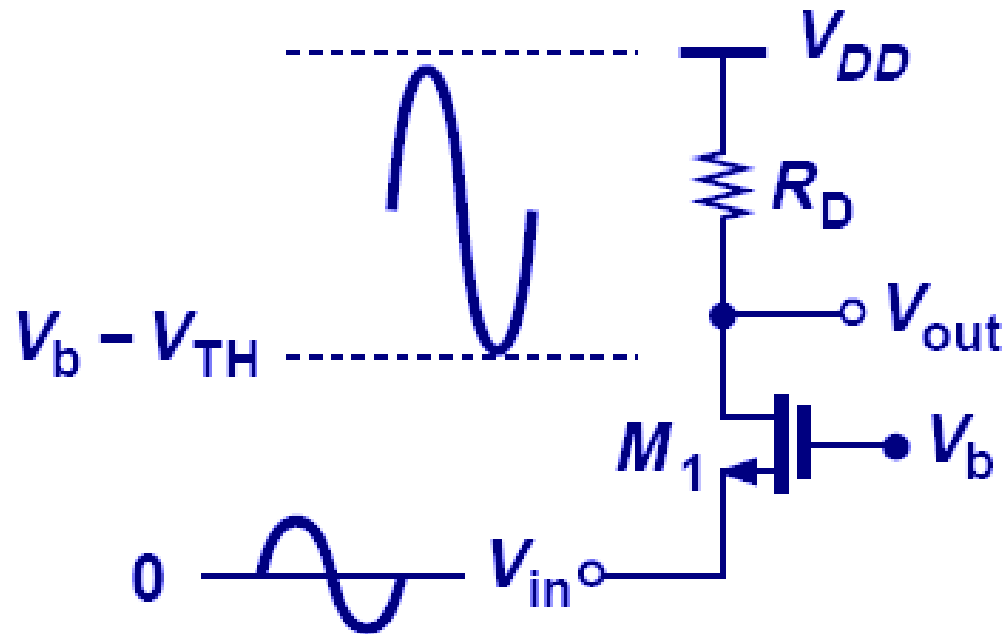
Stepen sa zajedničkim gejtom (ZG)



$$A_v = g_m R_D$$

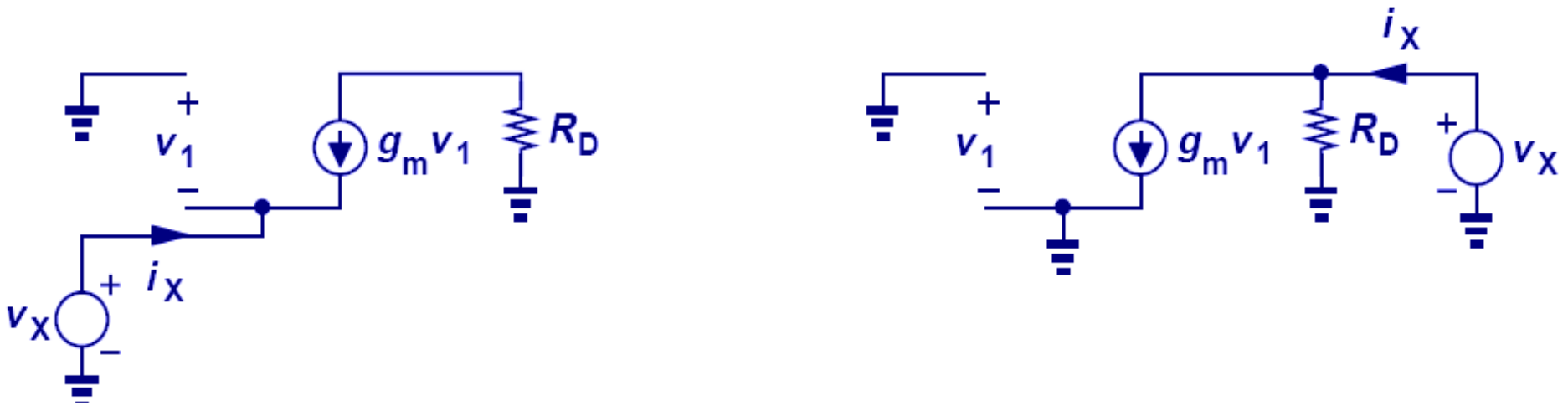
- ZG stepen je sličan ZB stepenu: rast na ulazu uzaziva rast na izlazu. Stoga je pojačanje pozitivno (ulazni i izlazni signal u fazi).

Nivoi signala u ZG stepenu



- Da bi se M_1 održao u zasićenju, izlazni napon (V_{out}) ne smije pasti ispod $V_b - V_{TH}$.

I/O impedanse ZG stepena



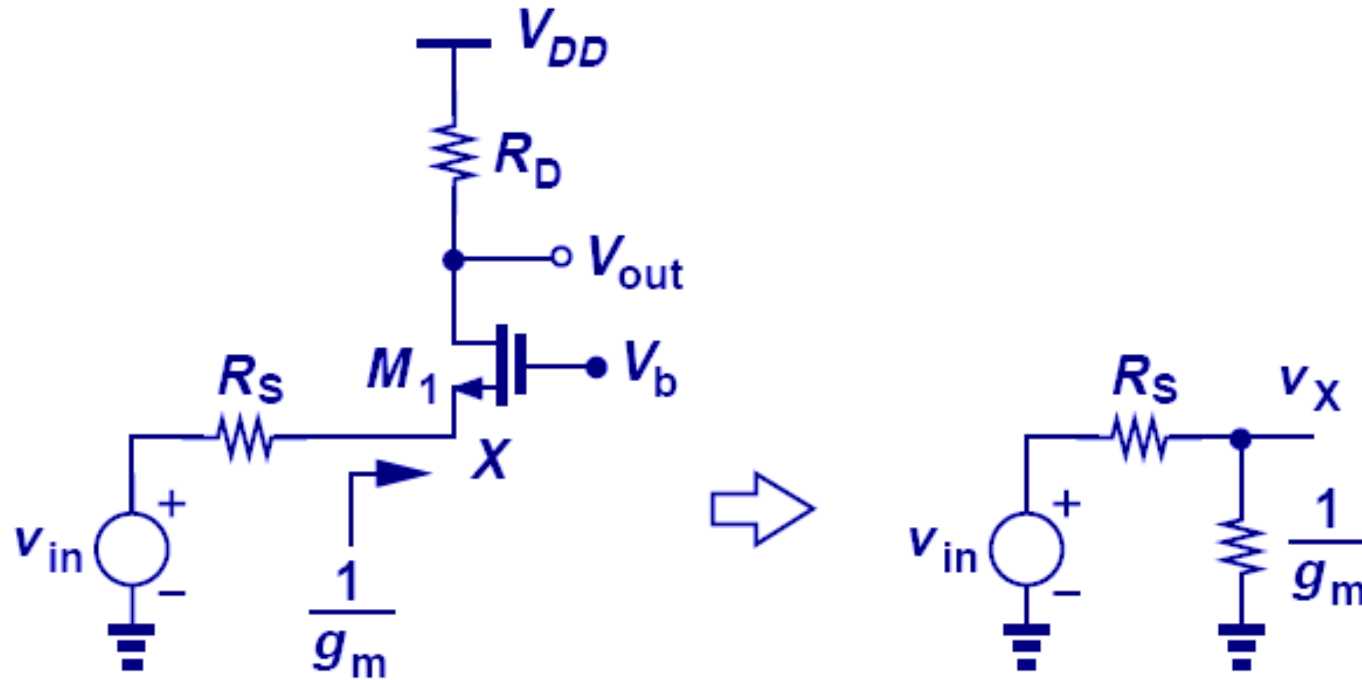
$$R_{in} = \frac{1}{g_m}$$

$$\lambda = 0$$

$$R_{out} = R_D$$

- Izlazna impedansa ZG stepena je slična onoj kod ZS stepena.

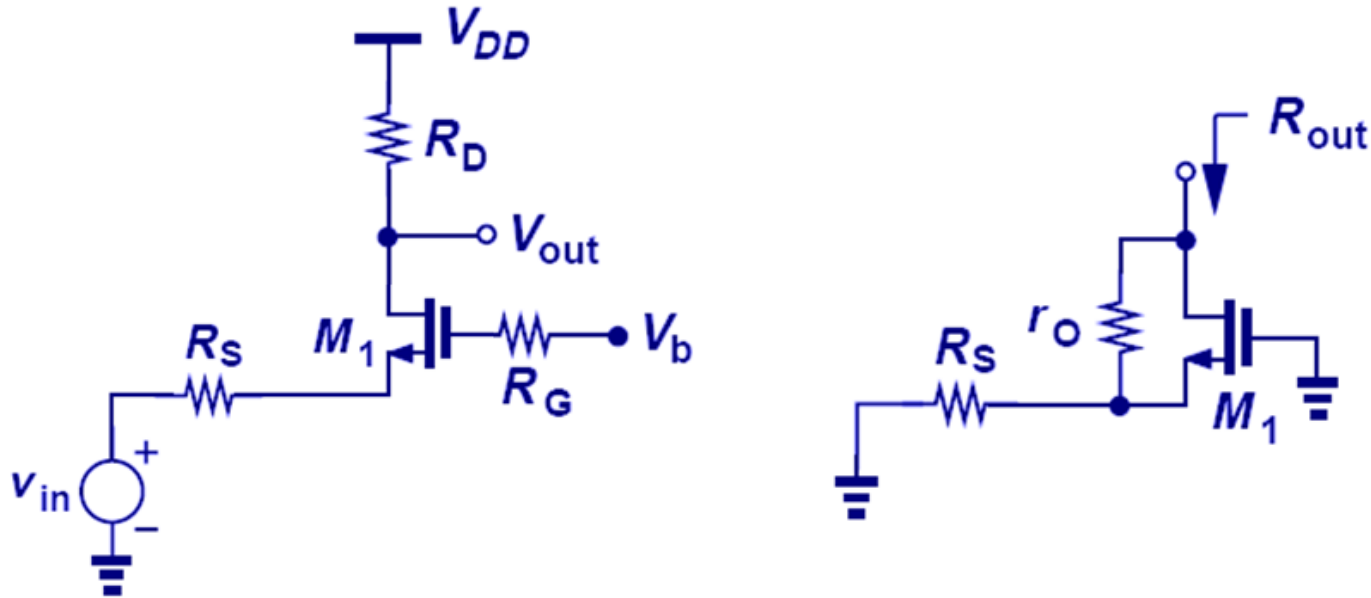
ZG stepan sa otpornikom u sorsu



$$A_v = \frac{R_D}{\frac{1}{g_m} + R_S}$$

- Kada je prisutan otpornik u sorsu, naponsko pojačanje je jednako onome u ZS stepenu sa otpornikom u sorsu, samo pozitivno.

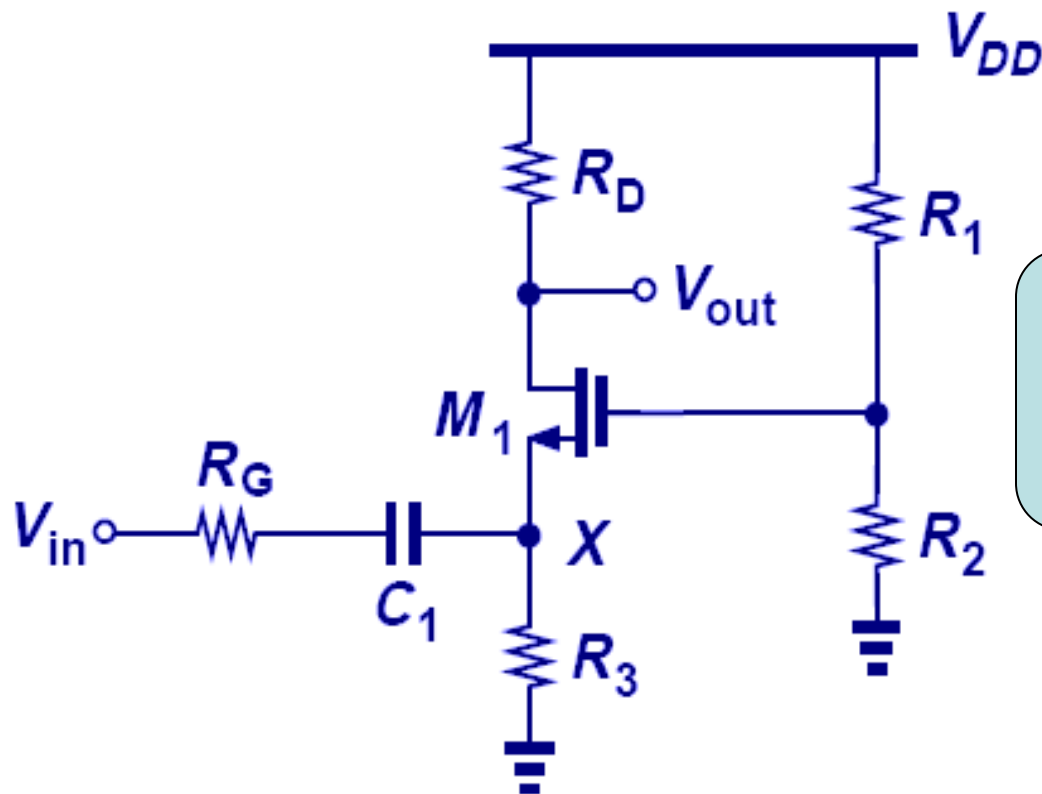
Izlazna otpornost



$$R_{out} = (1 + g_m r_o) R_S + r_o$$

- Kada je prisutna otpornost u gejtju, ona nema efekta na pojačanje i I/O impedance, jer nema struje kroz otpornik u gejtju, odnosno nema naponskog signala na njemu (na nižim frekvencijama).
- Izlazna impedansa ZG stepena sa otpornikom u sorsu je identična izlaznoj impedansi ZS stepena sa otpornikom u sorsu.

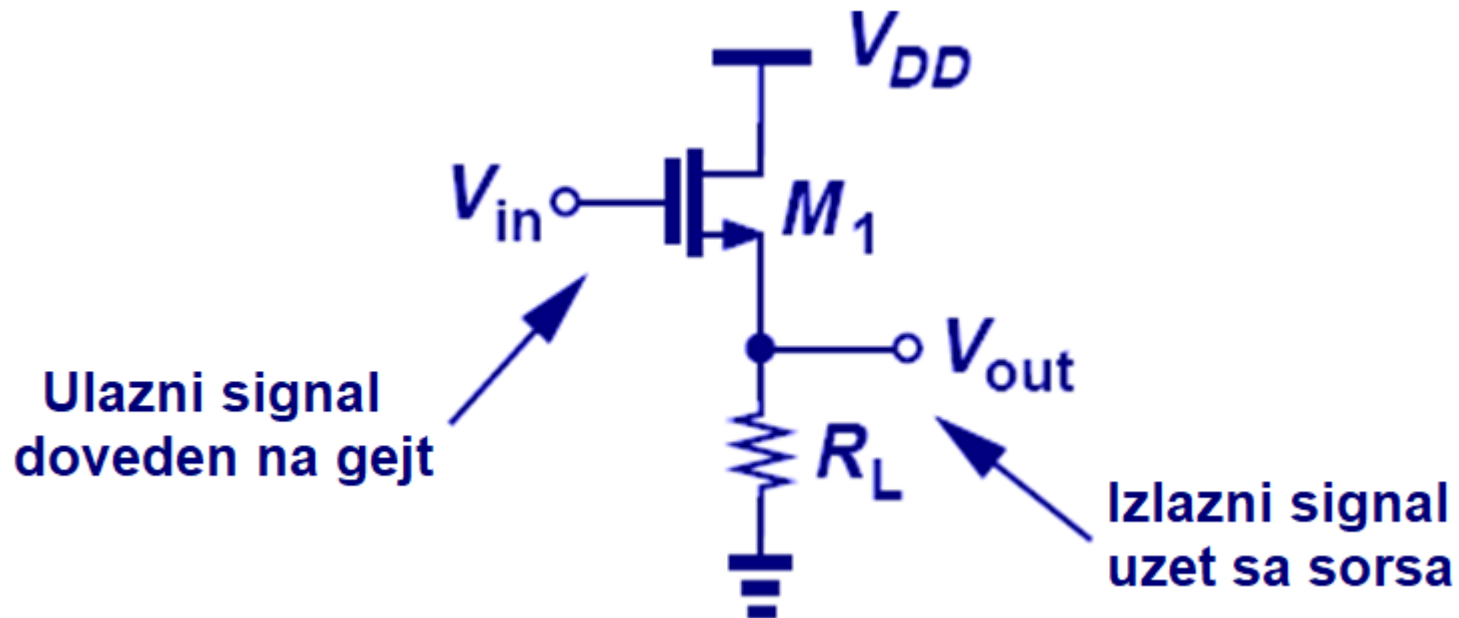
Polarizacije ZG stepena



$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{R_3 \parallel (1/g_m)}{R_3 \parallel (1/g_m) + R_G} \cdot g_m R_D$$

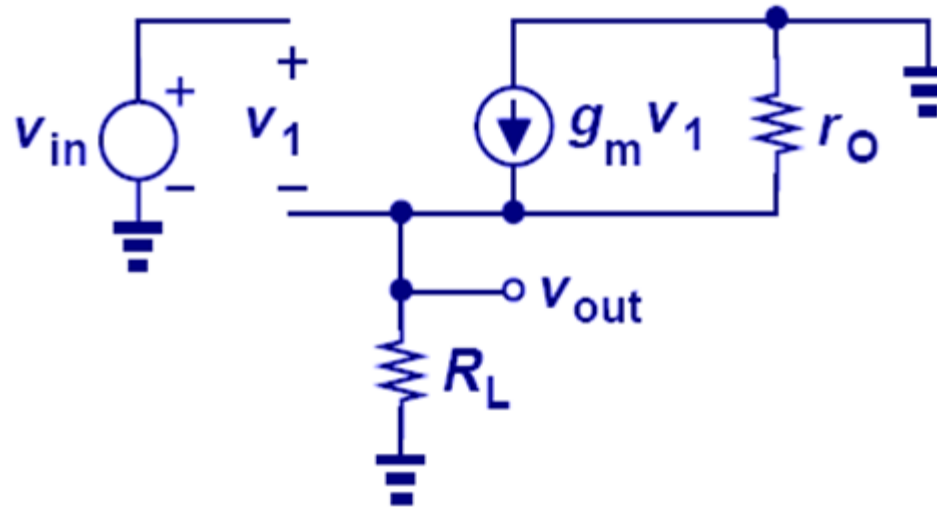
- R_1 i R_2 obezbjeđuju polarizacioni napon na gejt.
- R_3 obezbjeđuje put za DC struju polarizacije M_1 .

Stepen sa zajedničkim drejnom (ZD) - Source Follower stepen (SF)



$$A_v < 1$$

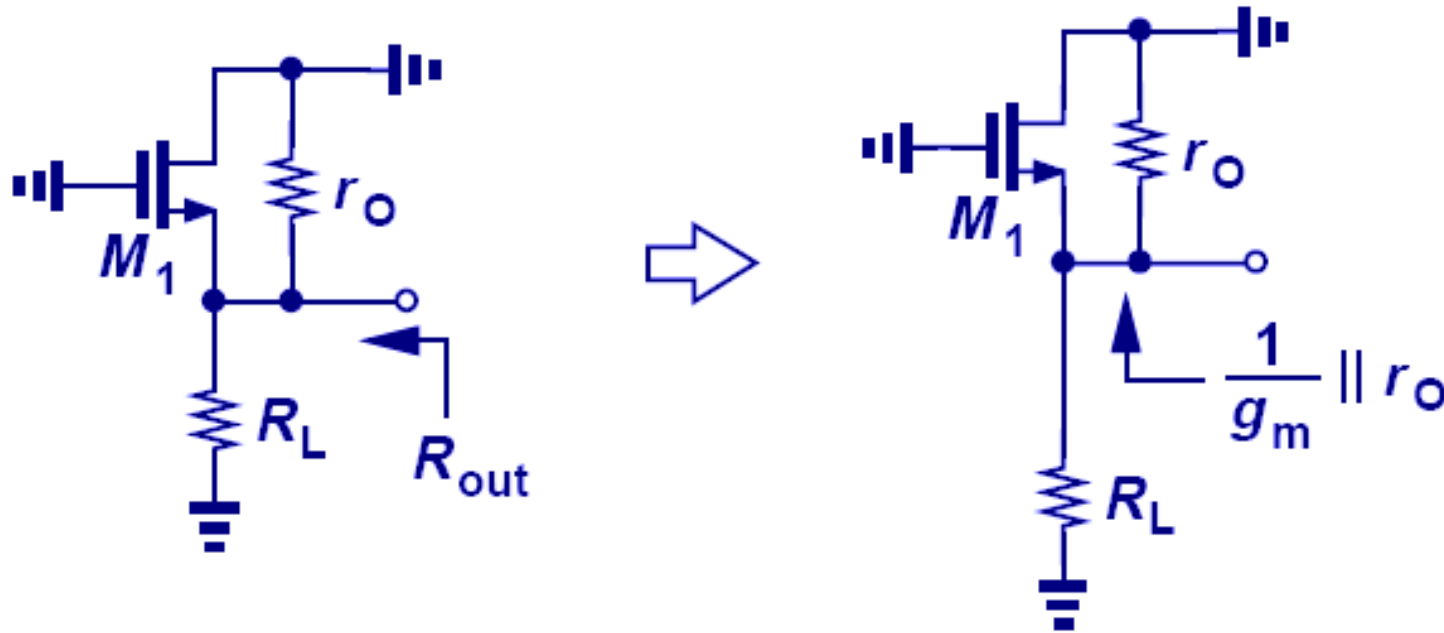
Pjačanje ZD stepena



$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{r_o \parallel R_L}{\frac{1}{g_m} + r_o \parallel R_L}$$

➤ Slično kao kod ZC stepena.

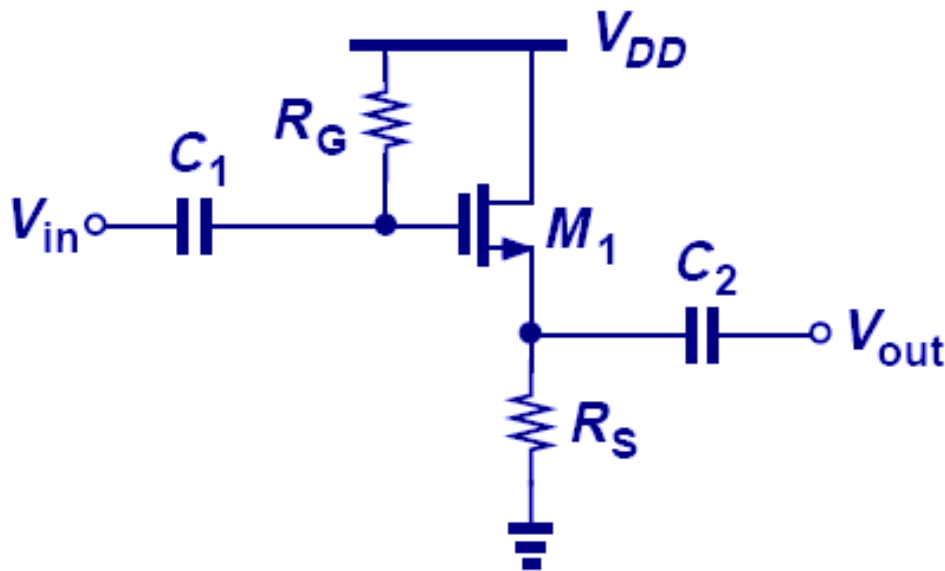
Izlazna impedansa ZD stepena



$$R_{out} = \frac{1}{g_m} \parallel r_o \parallel R_L \approx \frac{1}{g_m} \parallel R_L$$

- Izlazna impedansa ZC stepena je relativno niska, dok je ulazna otpornost beskonačna (na nižim frekvencijama); stoga je dobar kandidat za bafer.

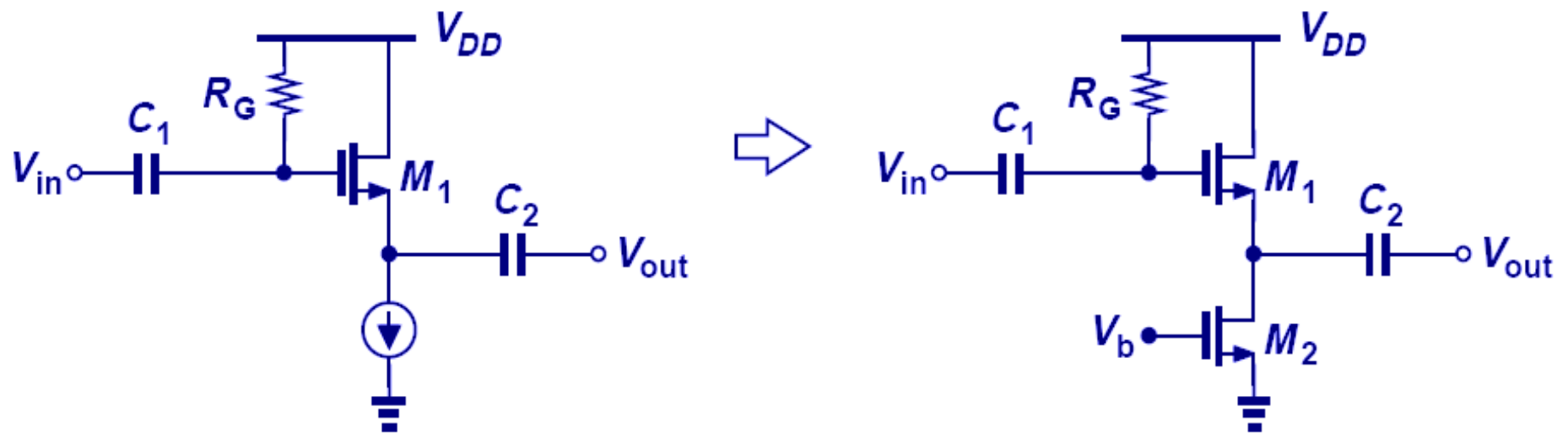
Polarizacija ZD stepena



$$I_D = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{DD} - I_D R_S - V_{TH})^2$$

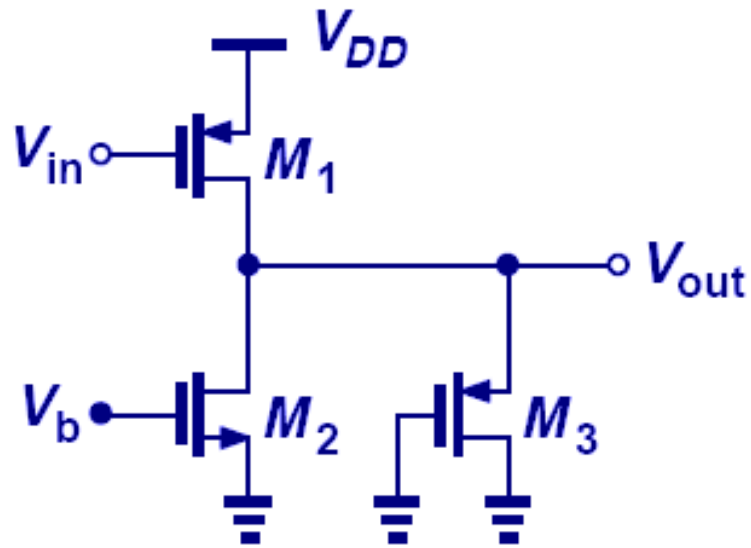
- R_G postavlja napon gejta na V_{DD} , dok R_S postavlja struju drejna.
- Prikazana kvadratna jednačina se može riješiti po I_D .

Polarizacija nezavisna od napajanja

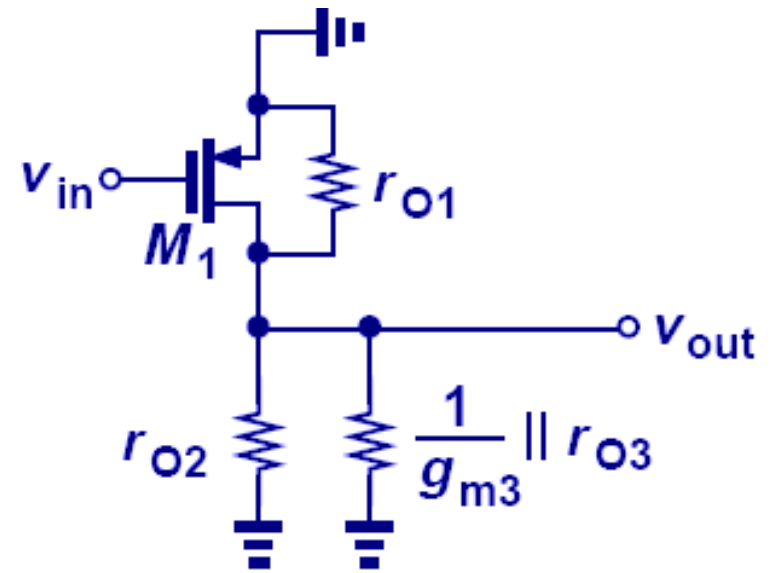


- Ako se R_s zamijeni strujnim izvorom, struja drejna I_D postaje nezavisna od napona napajanja.

Za vježbu: Primjer 1



(a)



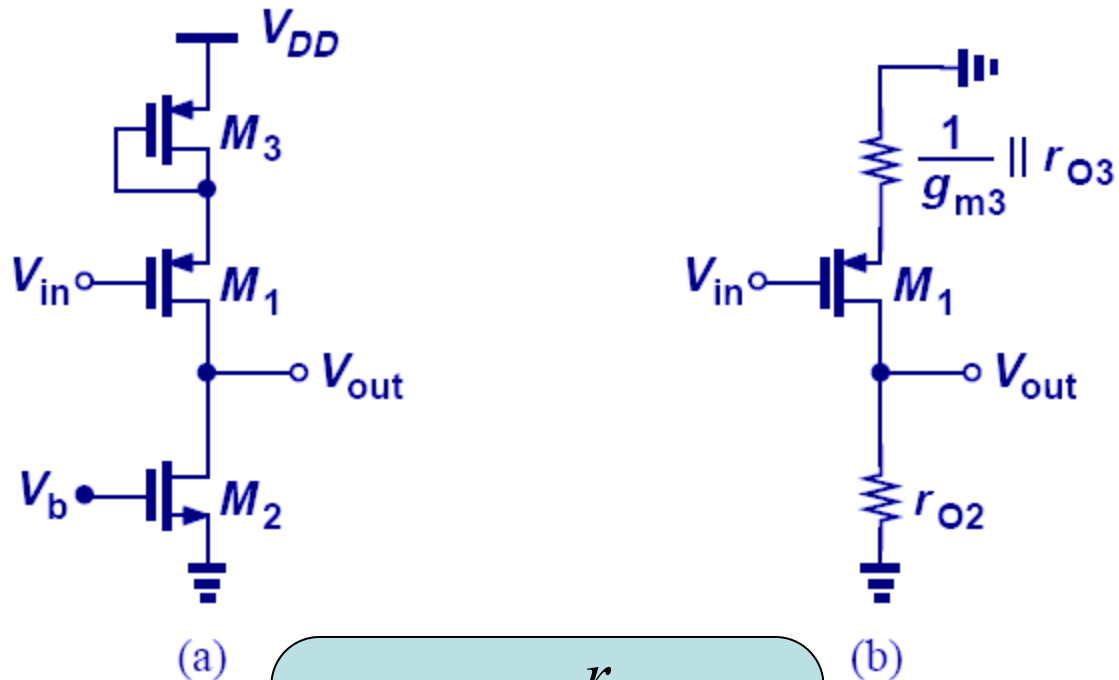
(b)

$$A_v = -g_{m1} \left(\frac{1}{g_{m3}} \parallel r_{o1} \parallel r_{o2} \parallel r_{o3} \right)$$

$$R_{out} = \frac{1}{g_{m3}} \parallel r_{o1} \parallel r_{o2} \parallel r_{o3}$$

- M_1 radi kao pojačavač, dok M_2, M_3 predstavljaju operećenje.

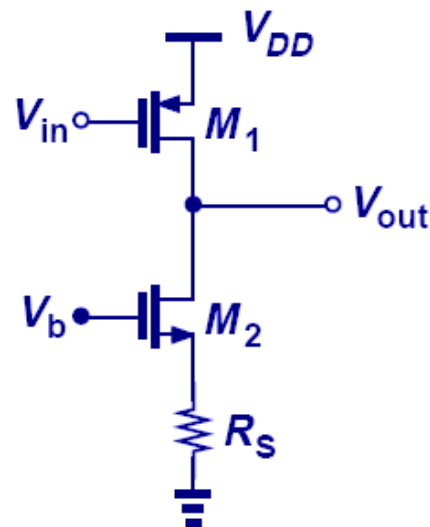
Za vježbu: Primjer 2



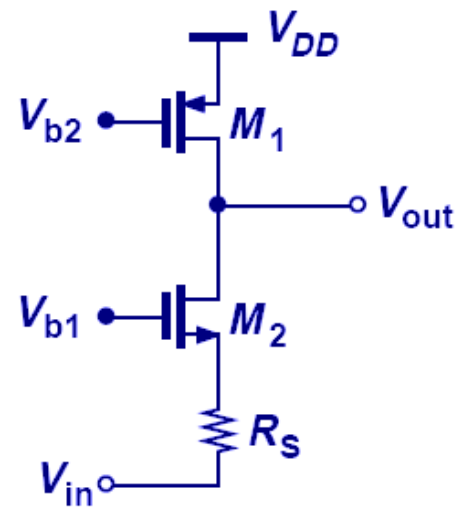
$$A_v = - \frac{r_{O2}}{\frac{1}{g_{m1}} + \frac{1}{g_{m3}} \parallel r_{O3}}$$

- M_1 radi kao pojačavač, M_3 predstavlja otpornost sorsa, i M_2 predstavlja opterećenje.

Za vježbu: Primjer 3



(a)



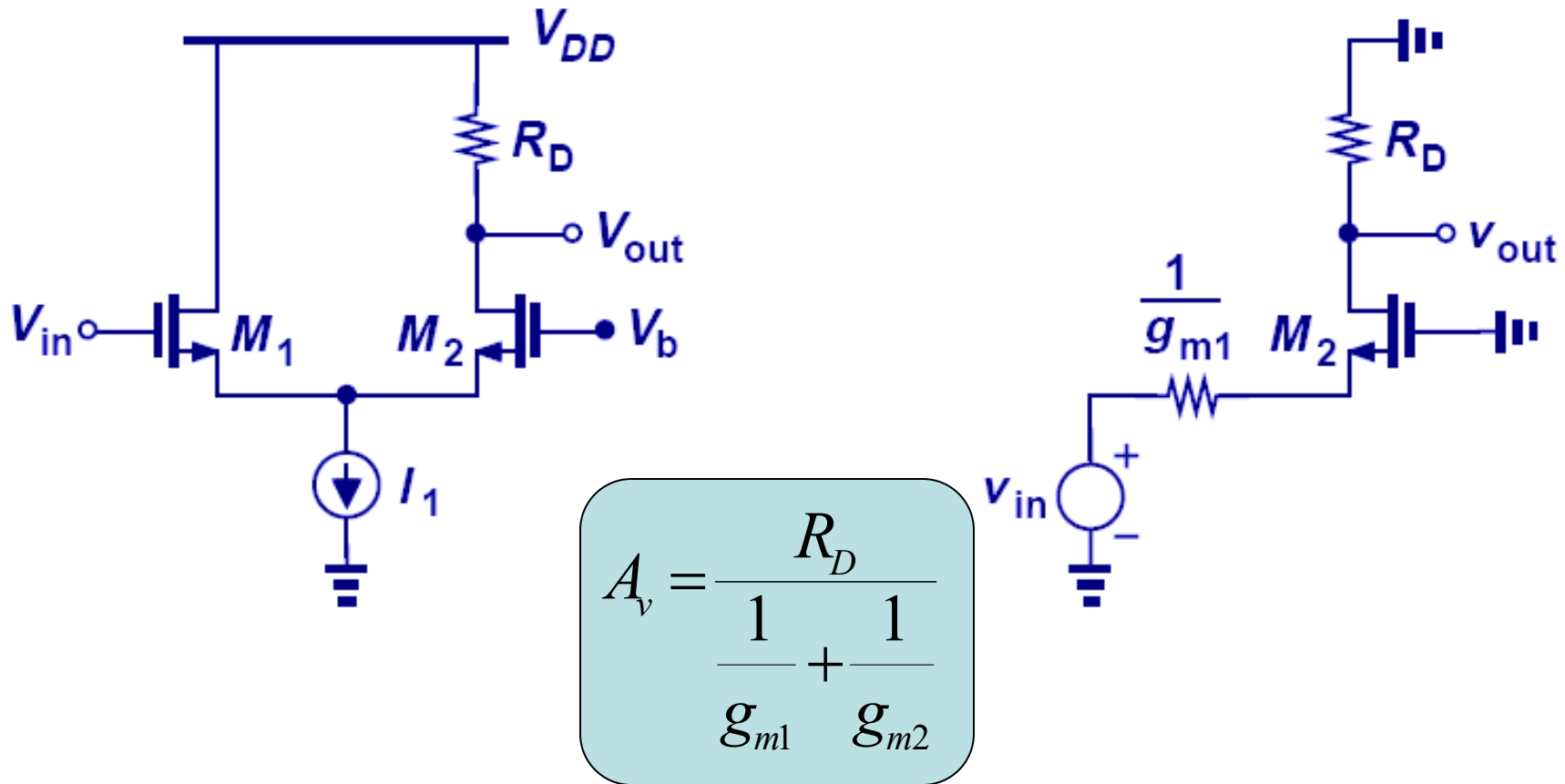
(b)

$$A_{v_CS} = -g_{m1} \left[(1 + g_{m2} r_{O2}) R_S + r_{O2} \right] \parallel r_{O1}$$

$$A_{v_CG} = \frac{r_{O1}}{\frac{1}{g_{m2}} + R_S}$$

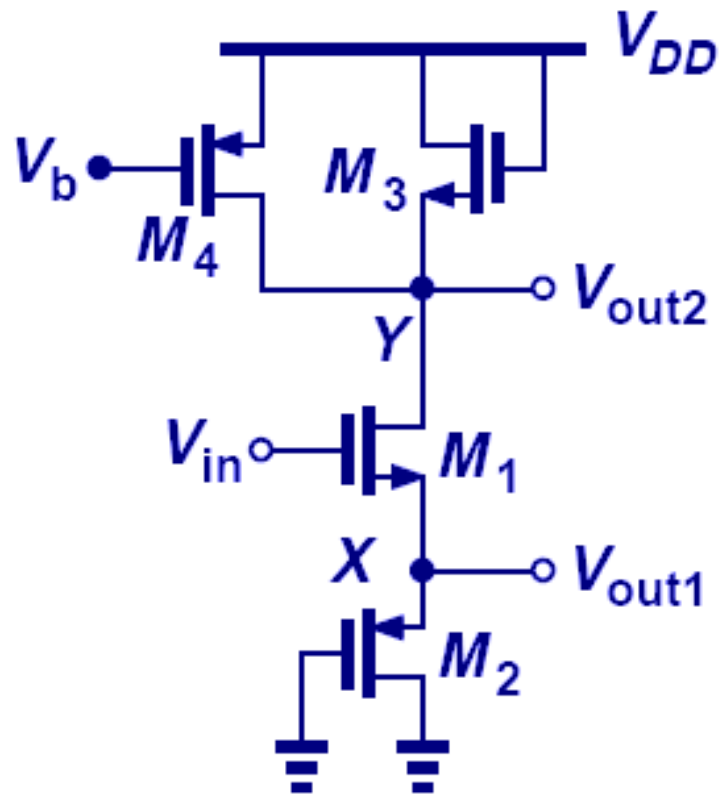
- Postavljanjem ulaznog signala na različite lokacije, dva kola, mada identična u drugim aspektima, ponašaju se različito.

Primjer kompozitnog stepena (1)



- Zamjenom lijeve strane Thevenin-ovim ekvivalentom i prepoznavanjem desne strane kao ZG stepena, naponsko pojačanje se jednostavno dobija.

Primjer kompozitnog stepena (2)



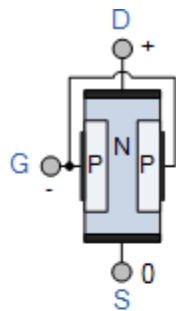
$$\frac{v_{out2}}{v_{in}} = - \frac{\frac{1}{g_{m3}} \parallel r_{O3} \parallel r_{O4}}{\frac{1}{g_{m2}} \parallel r_{O2} + \frac{1}{g_{m1}}}$$

- Ovaj primjer pokazuje da uzimanjem signala sa različitih tačaka, može se dobiti različita vrsta pojačavača.
- V_{out1} je rezultat rada M_1 kao ZC
- V_{out2} je rezultat rada M_1 kao ZS stepena sa otpornikom u grani sorsa.

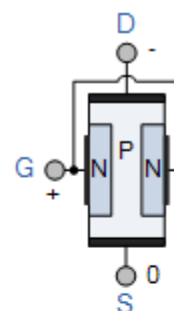
JFET (Junction Field Effect Tranzistor)

JFET ili skraćeno FET je tranzistor koji se sastoji od po dvije oblasti p ili n tipa poluprovodnika, između kojih se nalazi oblast suprotnog tipa (kanal).

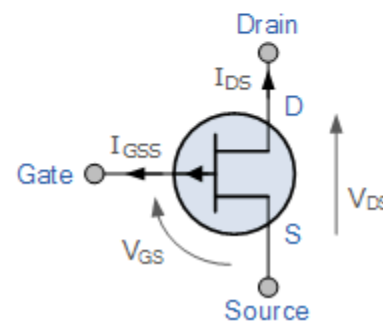
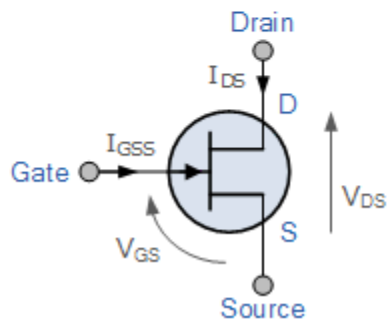
Zavisno od toga da li je kanal n ili p tipa, razlikuju se n kanalni i p kanalni FET-ovi.



N-kanalni FET

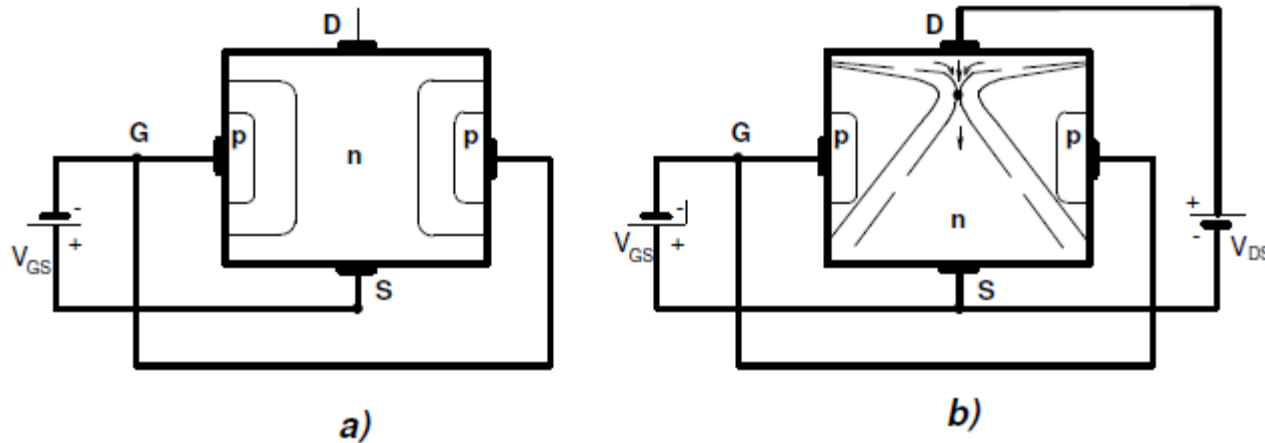


P-kanalni FET



JFET – Struktura

Struktura n kanalnog FET-a, sa naponima polarizacije prikazanim na slikama a i b.

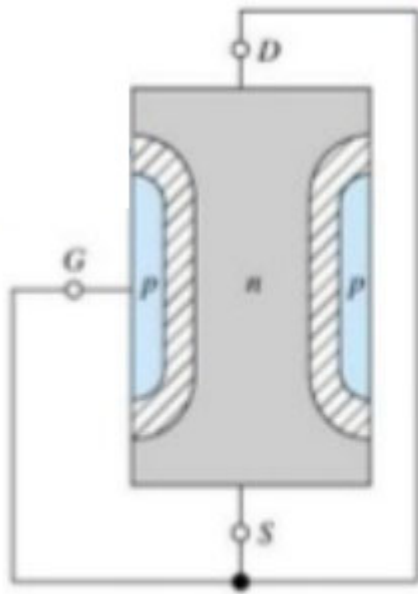


- dva pn spoja
- oba inverzno polarisana naponom V_{GS} .

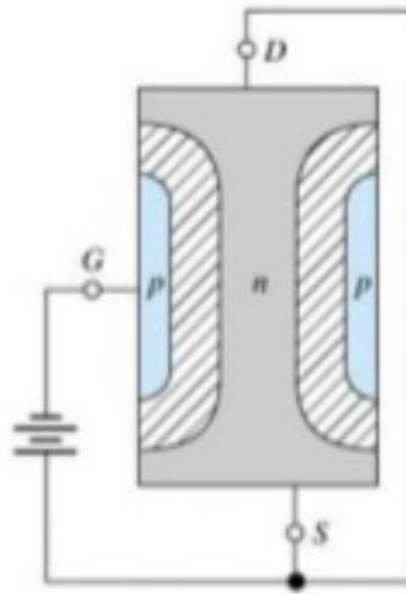
Za uspostavljanje struje od drejna ka sorsu, koristi se električno polje, dobijeno pomoću izvora V_{DS} .

Pod uticajem električnog polja, elektroni se kreću od sorsa ka drejnu, što ima za posljedicu struju suprotnog smjera.

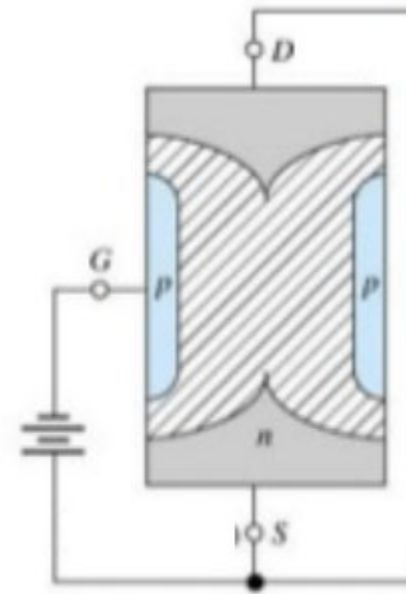
JFET – napon polarizacije V_{GS}



$V_{GS} = 0$
oblast prostotnog tovara
je tanka



$0 < V_{GS} < V_{GST}$
oblast porostotnog tovara se
proširuje



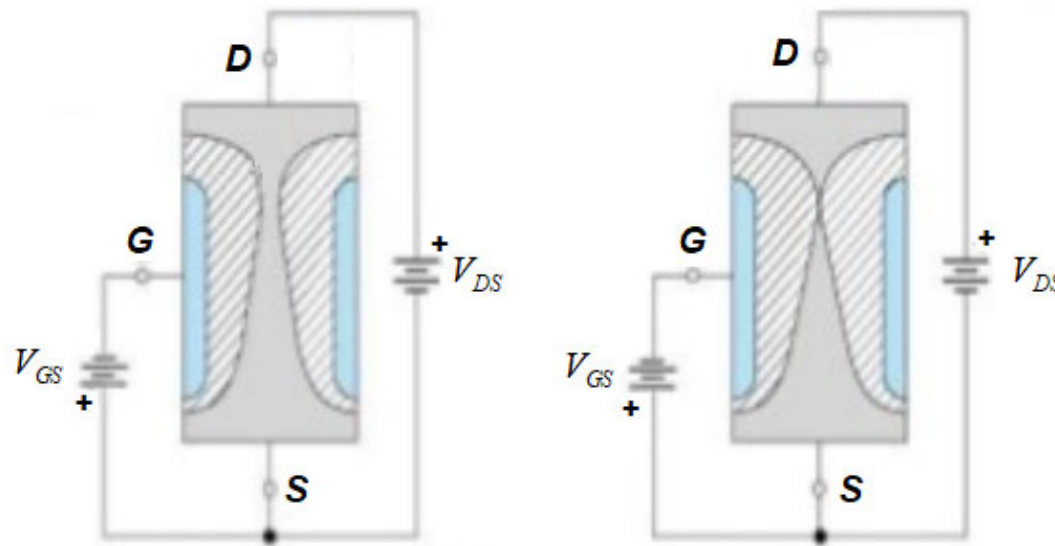
$V_{GS} \geq V_{GST}$
oblast prostotnog tovara je zauzela
cijeli kanal

Kontrola širine kanala se obavlja naponom inverzne polarizacije između gejtta i sorsa (V_{GS}).

Povećanjem ovog napona (u apsolutnom iznosu) do određenog graničnog napona V_{GST} , može se potpuno prekinuti kanal.

JFET – napon polarizacije V_{DS}

Postojanje napona između drejna i sorsa ima za posljedicu nesimetrične oblasti prostornih tovara.



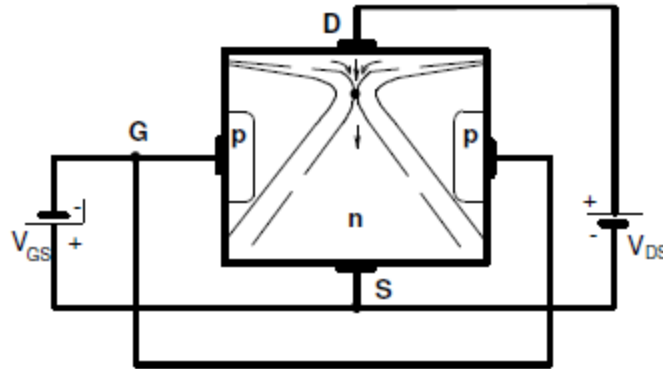
PN spojevi na mjestima bliže drejnu jače su inverzno polarisani.
Povećanjem napona V_{DS} će smanjivati širinu kanala bliže drejnu.

$$V_{GD} = V_{GS} - V_{DS}$$

Stiskanje kanala.

$$V_{GD} = V_{GST}$$

JFET – napon polarizacije V_{DS}



Režim rada JFET-a kada je kanal stisnut naziva se zasićenje.

Zavisnost struje drejna od napona V_{GS} kada je JFET u zasićenju opisuje se izrazom:

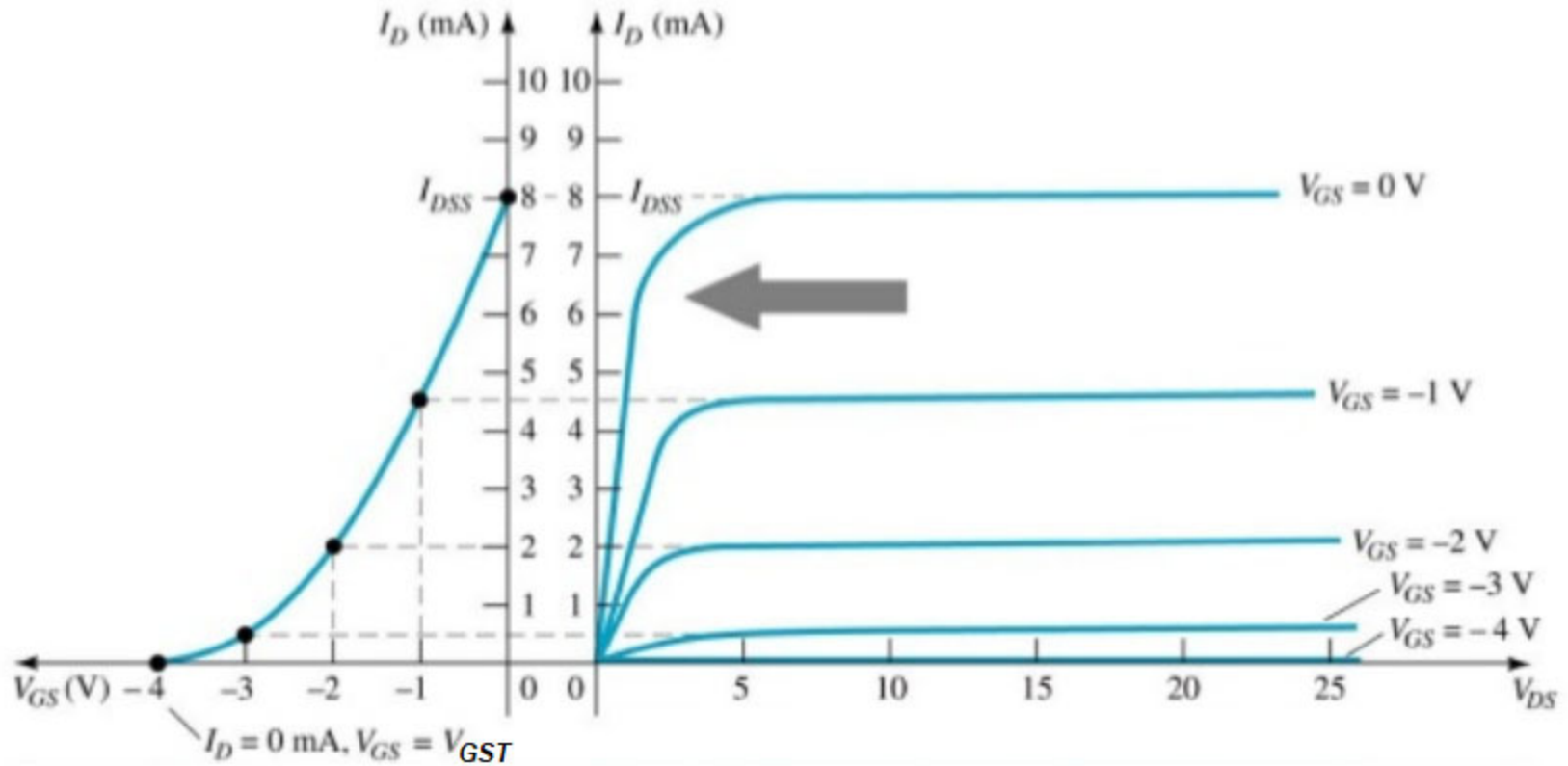
$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_{GST}} \right)^2$$

Zavisnost struje drejna od napona V_{GS} kada je JFET u omskoj (triodnoj) oblasti opisuje se izrazom:

$$I_D = \frac{2I_{DSS}}{V_{GST}^2} \left[(V_{GS} - V_{GST})V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right]$$

I_{DSS} - zavisi od karakteristika tehnološke izrade JFET-a

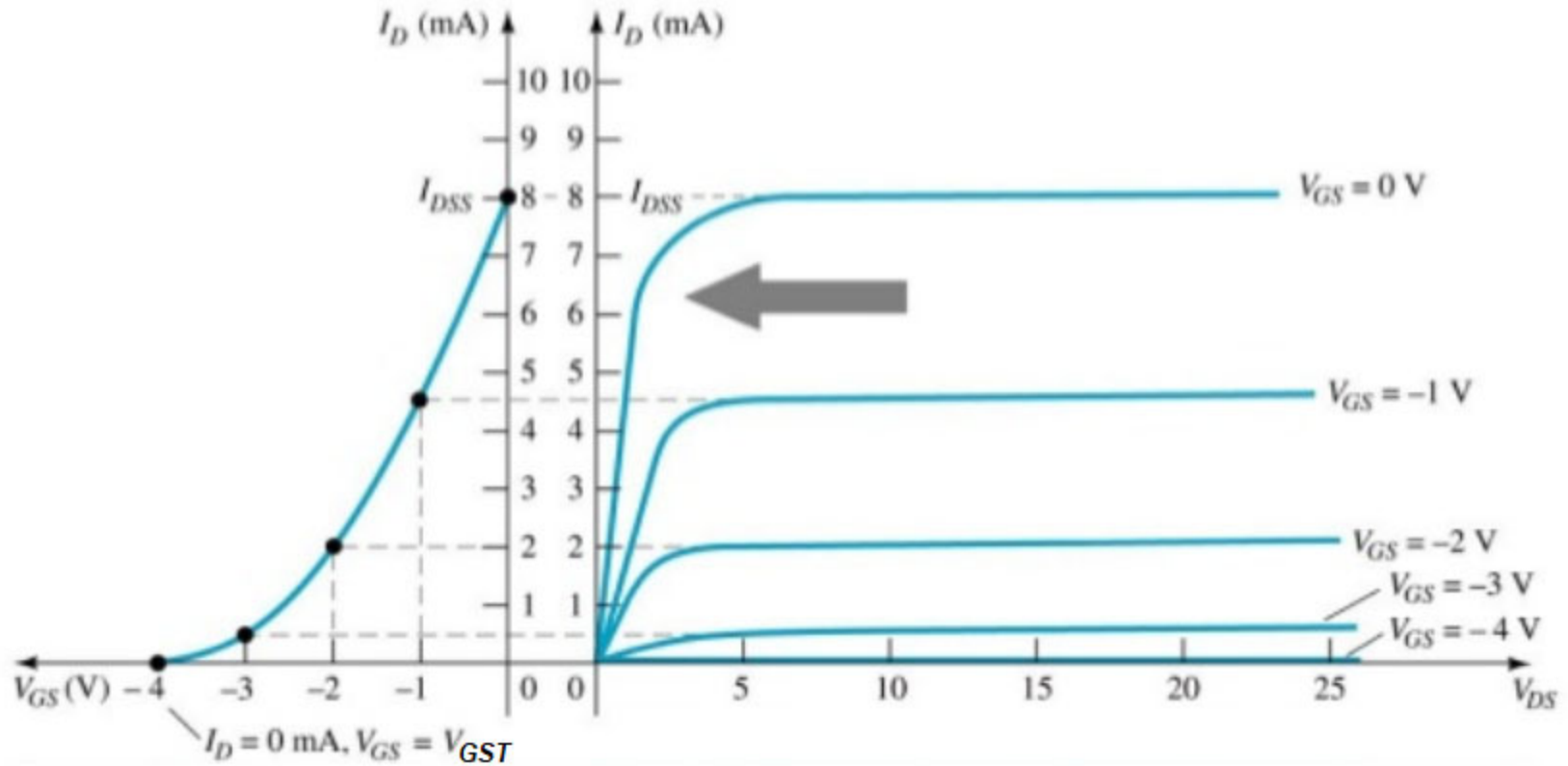
JFET – IV karakteristike



Prenosna karakteristika

Izlazna karakteristika

JFET – IV karakteristike

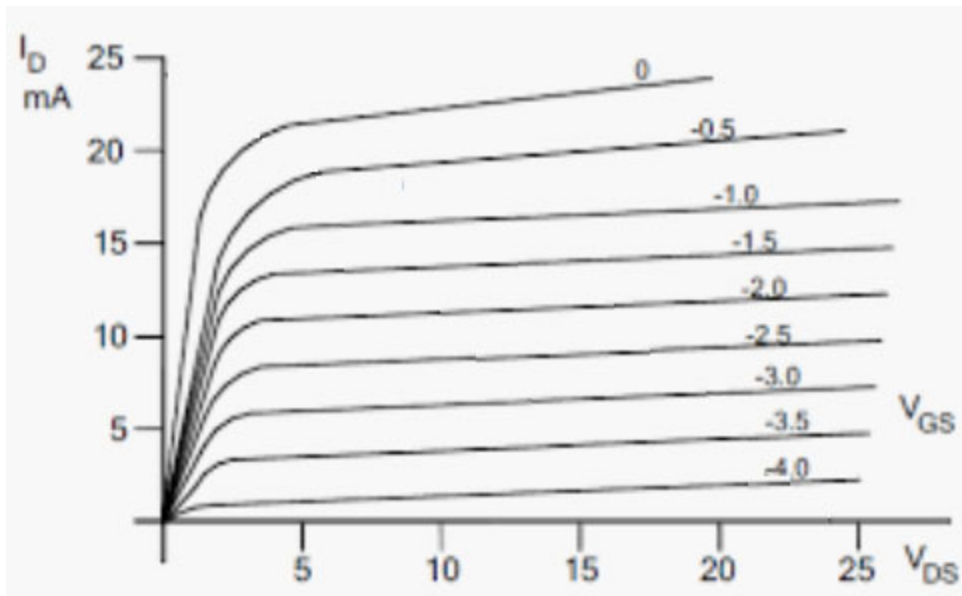


Prenosna karakteristika

Izlazna karakteristika

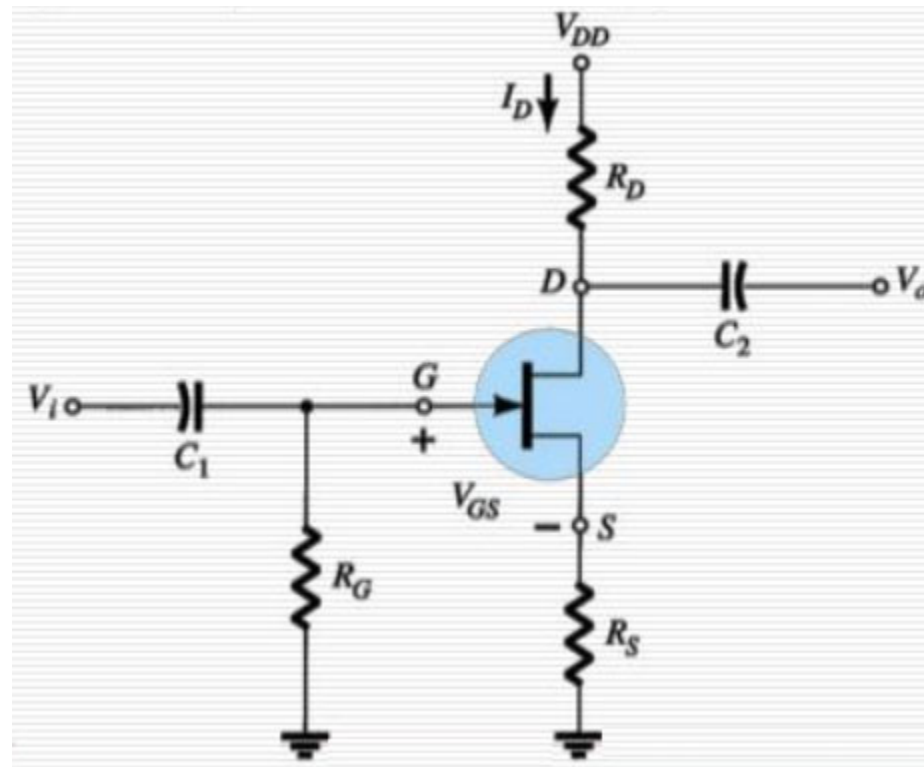
JFET – izlazna karakteristika

Efekat skraćenja kanala

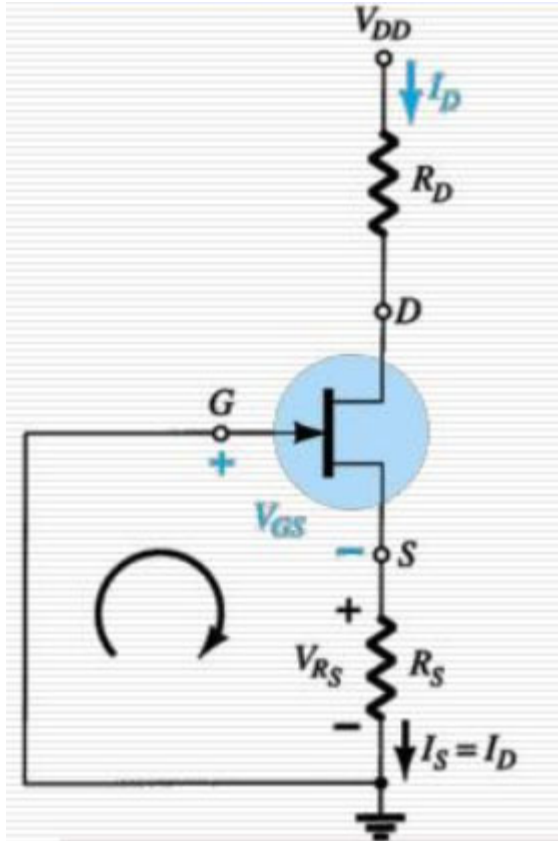


$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_{GST}} \right)^2 (1 + \lambda V_{DS})$$

JFET – polarizacija



JFET – polarizacija



$$I_G \approx 0 \Rightarrow V_{RG} = I_G R_G = 0$$

$$V_{RS} = I_D R_S$$

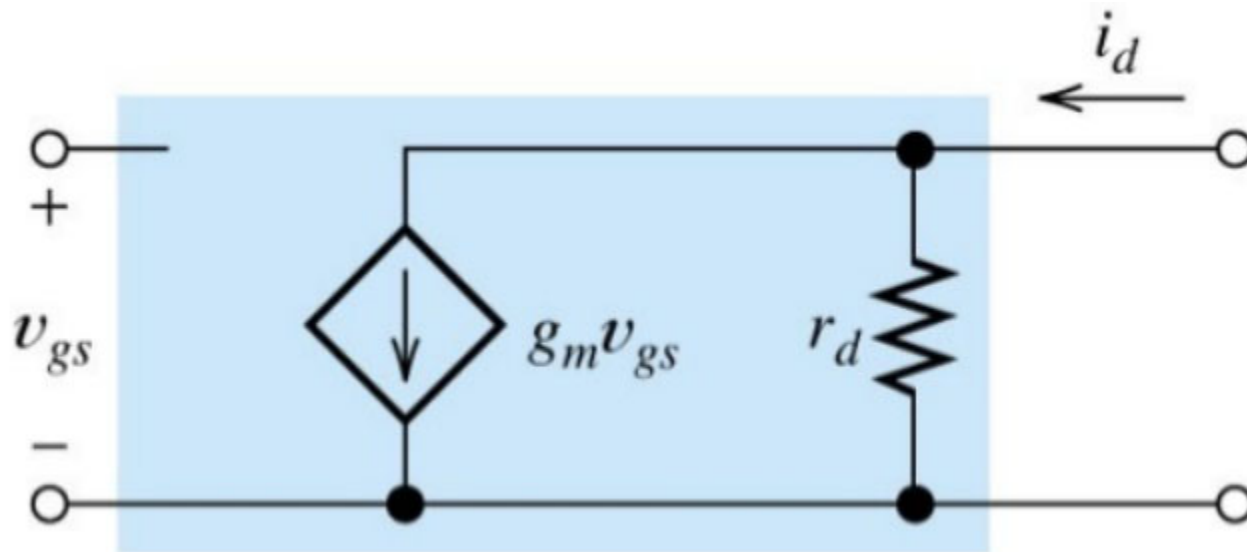
$$V_{GS} + V_{RS} = 0$$

$$V_{GS} = -V_{RS} = -I_D R_S$$

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_{GST}} \right)^2$$

$$I_D = I_{DSS} \left(1 + \frac{I_D R_S}{V_{GST}} \right)^2$$

JFET – model za male signale



JFET – pojačavačka kola

