



MOSFET tranzistori

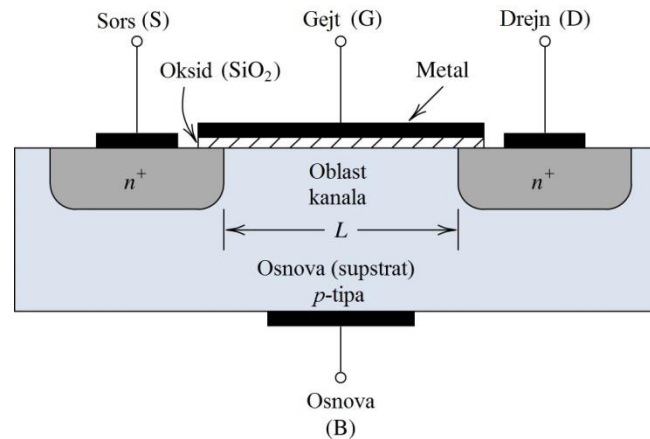
Katedra za elektroniku

Tranzistori sa efektom polja

- Slično kao kod bipolarnih tranzistora i tranzistori sa efektom polja (engl. **FET** = *Field Effect Transistor*) odlikuju se svojstvom da je naponom između dve elektrode moguće kontrolisati struju kroz treću elektrodu. Suštinska razlika je u tome što se mehanizam kontrole struje kod FET tranzistora zasniva na električnom polju koje se formira usled dovođenja odgovarajućeg napona na kontrolnu elektrodu.
- Najznačajniji tip tranzistora sa efektom polja je **MOSFET** (engl. *Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor*). Pojava MOS tranzistora je omogućila revoluciju u digitalnoj elektronici i razvoju mikroprocesorskih tehnologija, zahvaljujući svojim dobrim svojstvima:
 - MOS tranzistori zauzimaju malu površinu silicijuma u okviru integrisanog kola, čime je omogućena realizacija **VLSI** kola (kola veoma visokog stepena integracije, engl. *Very Large Scale of Inegration*).
 - Proizvodni proces je relativno jednostavan, a samim tim i značajno jeftiniji u odnosu na druge tehnologije integrisanih kola.
 - Logička kola i memorijske jedinice mogu biti realizovane isključivo pomoću tranzistora, bez potrebe za upotrebom dodatnih otpornika i dioda.
 - Kada su logička kola u ustaljenim stanjima, prisutne su samo struje curenja tranzistora, pa je statička potrošnja energije gotovo zanemarljiva.
- Pored MOSFET-a, u klasu tranzistora sa efektom polja spadaju još i **JFET** (engl. *Junction FET* = spojni FET) i **MESFET** (engl. *MEtal-Semiconductor FET*).

Struktura MOSFET-a

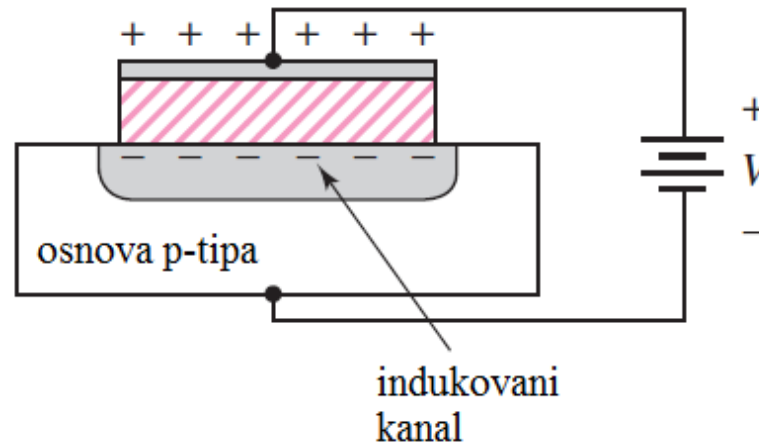
- MOSFET je dobio ime zahvaljujući svojoj strukturi: ispod metalne elektrode gejta nalazi se sloj oksida koji ga odvaja od poluprovodničke oblasti kanala.
- Princip rada MOS tranzistora zasniva se na kontroli provodnosti kanala između elektroda **Sorsa (S)** i **Drejna (D)** dovođenjem odgovarajućeg napona na upravljačku elektrodu zvanu **Gejt (G)**. Ukoliko su primarni nosioci naelektrisanja u kanalu elektroni, za MOSFET se kaže da je **n-kanalni**, u suprotnom ukoliko su to šupljine, u pitanju je **p-kanalni** MOSFET. Na slici je prikazan poprečni presek n-kanalnog MOSFET tranzistora sa indukovanim kanalom:



- Na prvi pogled, MOSFET je simetrična komponenta. Međutim, četvrta elektroda koja se naziva **Osnova (B)** se u praksi kratko spaja sa elektrodom sorsa. Time je dobijena asimetrična komponenta sa tri elektrode, kod koje je očekivani tok struje od drejna ka sorsu kada je u pitanju n-kanalni tranzistor, odnosno od sorsa ka drejnu za p-kanalni tranzistor.

Princip rada MOSFET-a

- Struktura metal-oksidi-poluprovodnik se prilikom dovođenja spoljašnjeg napona ponaša kao kondenzator.
- Kod n-kanalnog MOSFET-a, ukoliko je napon između gejta i osnove pozitivan, na elektrodi gejta se nagomilava pozitivno naelektrisanje, koje privlači negativno naelektrisane elektrone iz osnove. Elektroni, koji su **manjinski nosioci** u osnovi p-tipa se nagomilavaju u oblasti uz sloj oksida i počinju da formiraju **kanal**. Sličan princip važi i za p-kanalni MOSFET, sa tom razlikom da je napon između gejta i osnove negativan, a nosioci u kanalu su šupljine.

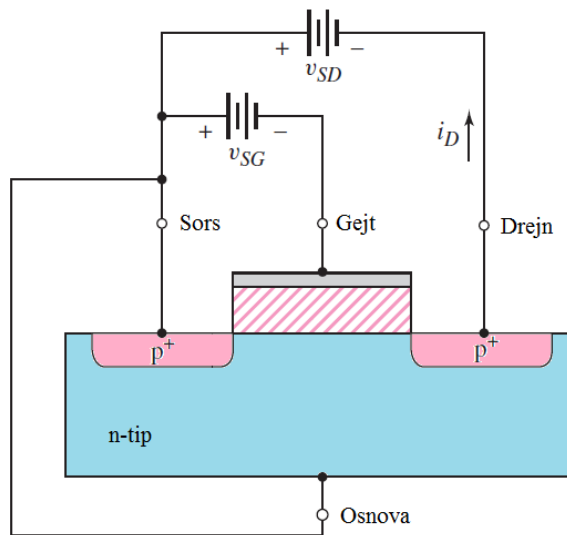


- Kada upravljački napon dostigne kritičnu vrednost koja se naziva **napon praga provođenja** (V_{TH}), moguće je provođenje struje između drejna i sorsa posredstvom nagomilanih nosilaca naelektrisanja u kanalu.

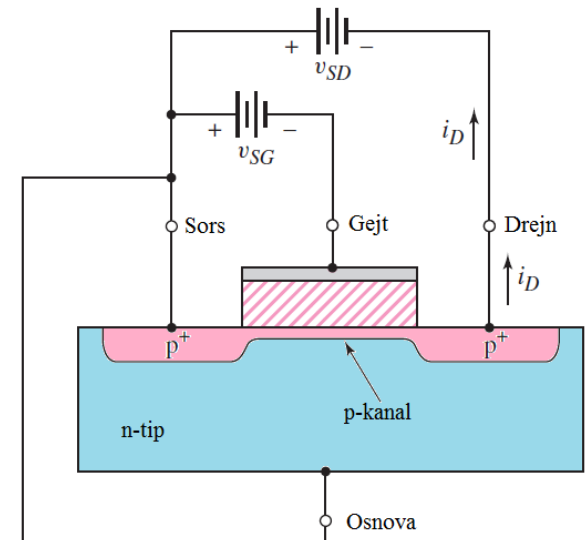
MOSFET sa ugrađenim/indukovanim kanalom (1)

• Konstruktivski gledano, postoje dve različite izvedbe MOS tranzistora:

- **MOSFET sa ugrađenim kanalom** - ispod sloja oksida postoji sloj poluprovodnika istog tipa kao i sors i drejn. Stoga je kanal provodan čak i kada je napon između gejta i osnove jednak nuli, a napon praga provođenja je negativan ($V_{TH} < 0$).
- **MOSFET sa indukovanim kanalom** - osnova počinje direktno ispod sloja oksida. Da bi tranzistor postao provodan, potrebno je primeniti pozitivan napon koji je veći od praga provođenja ($V_{TH} > 0$), kako bi iz osnove u oblast ispod gejta bio privučen dovoljan broj manjinskih nosilaca za formiranje kanala. U praksi se najčešće koristi upravo ova konstrukcija tranzistora.



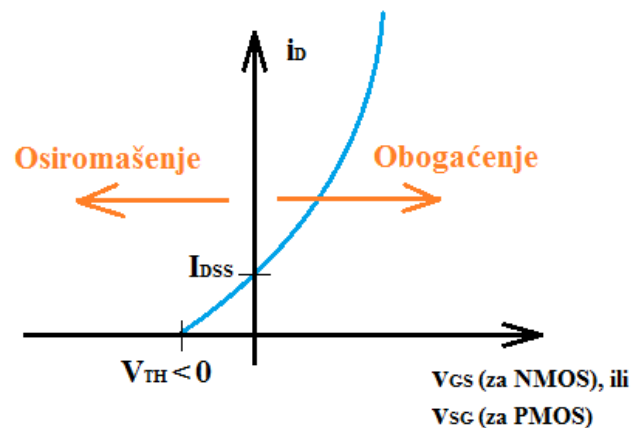
P-kanalni MOSFET sa indukovanim kanalom



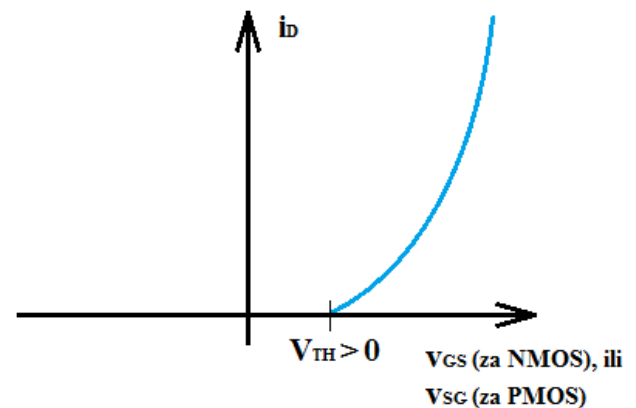
P-kanalni MOSFET sa ugrađenim kanalom

MOSFET sa ugrađenim/indukovanim kanalom (2)

- Prenosna karakteristika prikazuje zavisnost struje drejna od napona između gejta i sorsa, u režimu zasićenja (o čemu će kasnije biti reči).
- MOSFET sa ugrađenim kanalom je provodan čak i pri nultom naponu između gejta i sorsa. Ovu vrstu tranzistora karakteriše parametar I_{DSS} , što je struja drejna u režimu zasićenja pri nultoj polarizaciji gejta.
- Pri pozitivnim vrednostima upravljačkog napona (v_{GS} za NMOS, odnosno v_{SG} za PMOS), provodnost kanala se povećava usled privlačenja dodatnih nosilaca, pa se kaže da je kanal u režimu **obogaćenje**. Nasuprot tome, negativan upravljački napon izaziva **osiromašenje** kanala, pošto naelektrisanje gejta u tom slučaju odbija nosilace naelektrisanja iz kanala. Pri dovoljno velikoj vrednosti negativnog napona kanal ostaje bez nosilaca, što dovodi do zakočenja tranzistora.

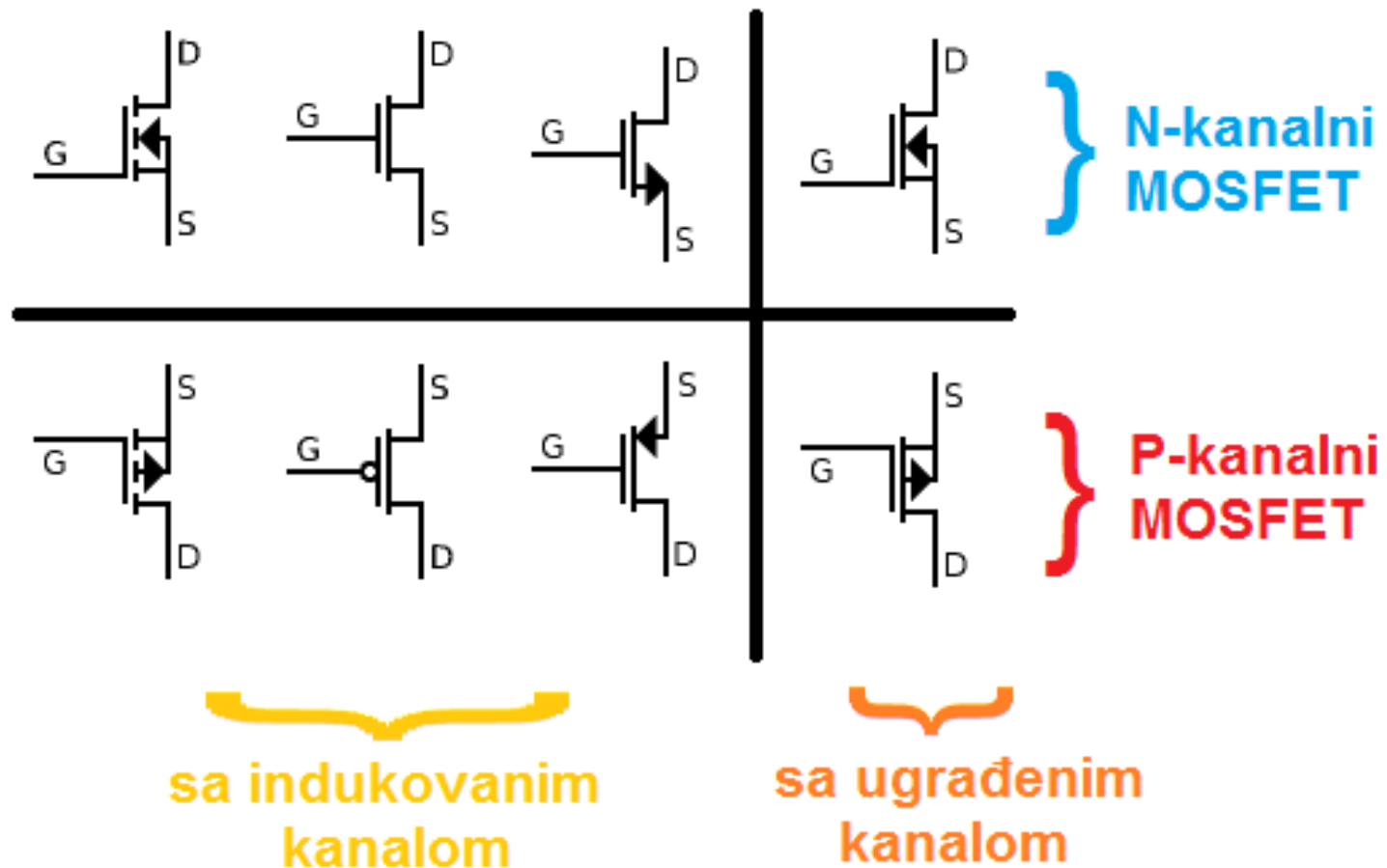


**Prenosna karakteristika
MOSFET-a sa ugrađenim kanalom**



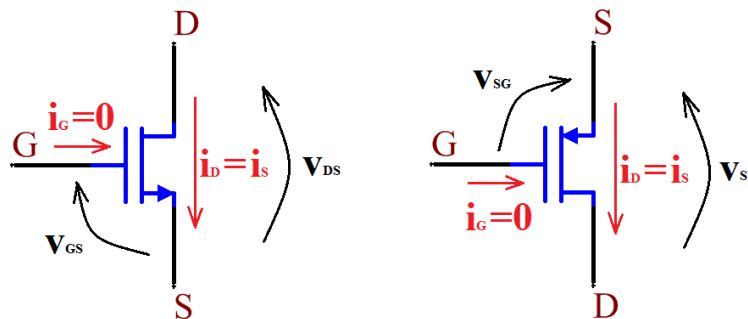
**Prenosna karakteristika
MOSFET-a sa indukovanim kanalom**

Šematski simboli MOS tranzistora



Naponsko-strujne zavisnosti i režimi rada

- Sloj oksida između elektrode gejta i kanala je dobar izolator, koji kao takav sprečava proticanje struje između gejta i kanala $\Rightarrow i_G = 0$.

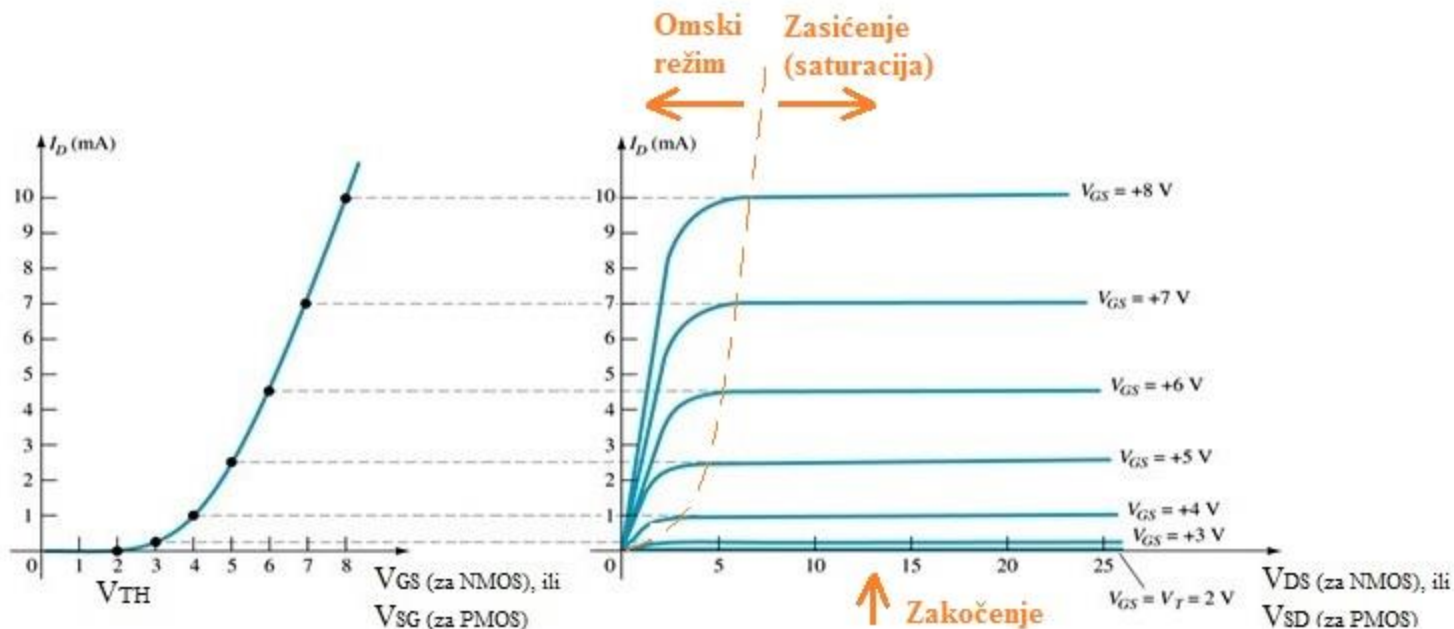


- U zavisnosti od napona gejta-sors i drejn-sors, postoje tri osnovna režima rada MOSFET-a:

Režim rada	v_{GS}	v_{DS}	i_D
Zakočenje	$v_{GS} < V_{TH}$	—	$i_D = 0$
Omski režim	$v_{GS} > V_{TH}$	$v_{DS} < v_{GS} - V_{TH}$	$i_D = B \cdot (2 \cdot (v_{GS} - V_{TH}) \cdot v_{DS} - v_{DS}^2)$
Zasićenje	$v_{GS} > V_{TH}$	$v_{DS} \geq v_{GS} - V_{TH}$	$i_D = B \cdot (v_{GS} - V_{TH})^2$

- U tabeli su navedene naponsko-strujne zavisnosti za n-kanalni MOSFET. Kada je u pitanju p-kanalni MOSFET, svi izrazi imaju identičan oblik, ukoliko se v_{GS} zameni sa v_{SG} , v_{DS} sa v_{SD} , a V_{TH} se uzima sa suprotnim predznakom
- U izrazu za struju drejna, vrednosti B i V_{TH} su konstante koje zavise od tehnoloških parametara tranzistora.

Prenosna i izlazna karakteristika



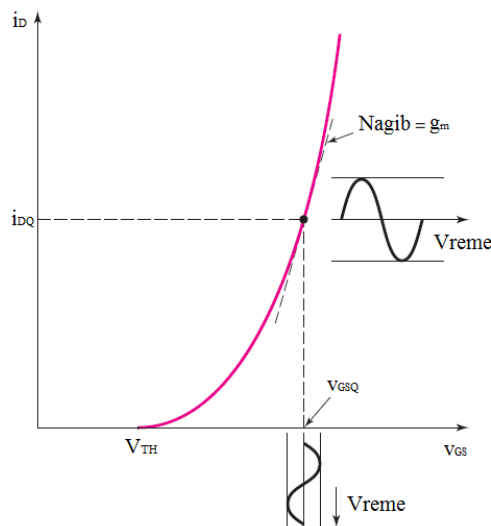
**Prenosna karakteristika
za MOSFET sa indukovanim kanalom
u režimu zasićenja**

**Polje izlaznih
karakteristika**

- U režimu **zasićenja**, MOSFET se ponaša kao naponom kontrolisani strujni izvor, pošto i_D tada zavisi isključivo od napona v_{GS} . Prema tome, MOSFET u ovom režimu pokazuje pojačavačko svojstvo.
- U prekidačkim aplikacijama, koriste se režim **zakočanja** (otvoren prekidač) i **omski režim** (zatvoren prekidač).
- Granica između omskog režima i zasićenja može analitički da se odredi iz uslova:
$$v_{DS} = v_{GS} - V_{TH} \Rightarrow i_D = B \cdot v_{DS}^2$$

Model MOSFET-a za male signale

- Ideja je slična kao u pojačavačkim kolima sa bipolarnim tranzistorom: malim promenama napona gejt-sors izazivaju se velike promene struje drejna. Ulazna karakteristika se aproksimira linearnim segmentom u okolini radne tačke.



$$i_D = B \cdot (v_{GS} - V_{TH})^2$$

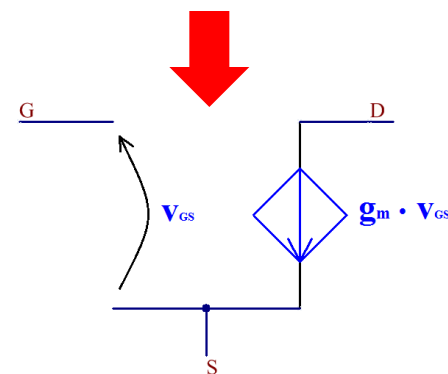
$$g_m = \left. \frac{di_D}{dv_{GS}} \right|_Q = 2 \cdot B \cdot (v_{GSQ} - V_{TH})$$

$$I_{DQ} = B \cdot (v_{GSQ} - V_{TH})^2 \Rightarrow g_m = 2 \cdot \sqrt{B \cdot I_{DQ}}$$

$$\Delta i_D = g_m \cdot \Delta v_{GS}$$

Za MOSFET sa ugrađenim kanalom važi još i:

$$g_m = 2 \cdot \frac{\sqrt{I_{DSS} \cdot I_{DQ}}}{|V_{TH}|}$$



Model MOSFET-a
za male signale

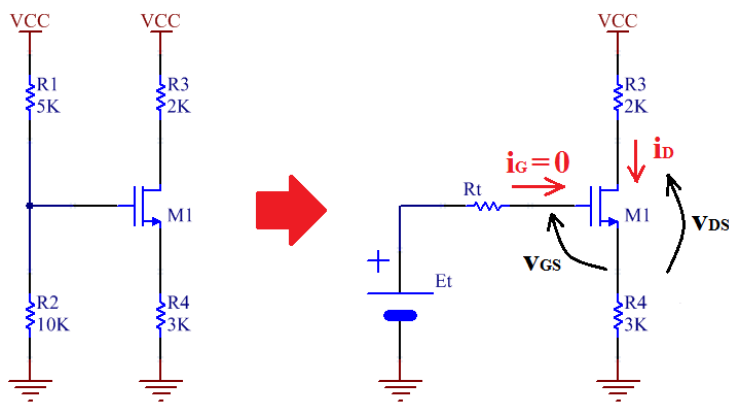
- Parametar modela za male signale g_m zavisi od položaja mirne radne tačke i naziva se **transkonduktansa**.

Polarizacija MOSFET-a

PRIMER:

Za kolo prikazano na slici poznato je $V_{CC} = 12V$, $V_{TH} = 4V$, $B = 1 \frac{mA}{V^2}$,

- pronaći mirnu radnu tačku MOSFET-a M1.
- Odrediti opseg otpornika R_3 , za koji će biti zadovoljeno da MOSFET vodi u režimu zasićenja. Vrednosti ostalih komponenti su iste kao u prvom delu zadatka.



b)

satracija $\Rightarrow v_{DS} \geq v_{GS} - V_{TH}$, $i_D = 1mA$

$v_{DS} = V_{CC} - (R_3 + R_4) \cdot i_D \geq v_{GS} - V_{TH} = 5V - 4V = 1V$

$12 - (R_3 + 3K) \cdot 1m \geq 1$

$R_3 + 3K \leq \frac{12-1}{1m} = 11K$

$\Rightarrow R_3 \leq 8K\Omega$

a)

$$E_t = V_{CC} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 12V \cdot \frac{10K}{5K + 10K} = 8V$$

$$R_t = R_1 \parallel R_2 = 3.33k\Omega$$

pretpostavka: M1 je u saturaciji

$$v_{GS} > V_{TH}, i_D = B \cdot (v_{GS} - V_{TH})^2$$

$$i_G = 0 \Rightarrow E_t - v_{GS} - R_4 \cdot i_D = 0$$

$$E_t - v_{GS} - R_4 \cdot B \cdot (v_{GS} - V_{TH})^2 = 0$$

$$3k \cdot 1m(v_{GS} - 4)^2 + v_{GS} - 8 = 0$$

$$3v_{GS}^2 - 23v_{GS} + 40 = 0$$

$$v_{GS_{1/2}} = \frac{23 \pm \sqrt{23^2 - 4 \cdot 3 \cdot 40}}{2 \cdot 3} = \frac{23 \pm 7}{6}$$

$$v_{GS} > V_{TH} \Rightarrow v_{GS} = 5V$$

$$i_D = B \cdot (v_{GS} - V_{TH})^2 = 1mA$$

$$V_{CC} - R_3 \cdot i_D - v_{DS} - R_4 \cdot i_D = 0$$

$$v_{DS} = V_{CC} - (R_3 + R_4) \cdot i_D = 7V$$

provera:

$$v_{GS} - V_{TH} = 1V < v_{DS} = 7V \Rightarrow \text{pretpostavka je ispravna}$$