

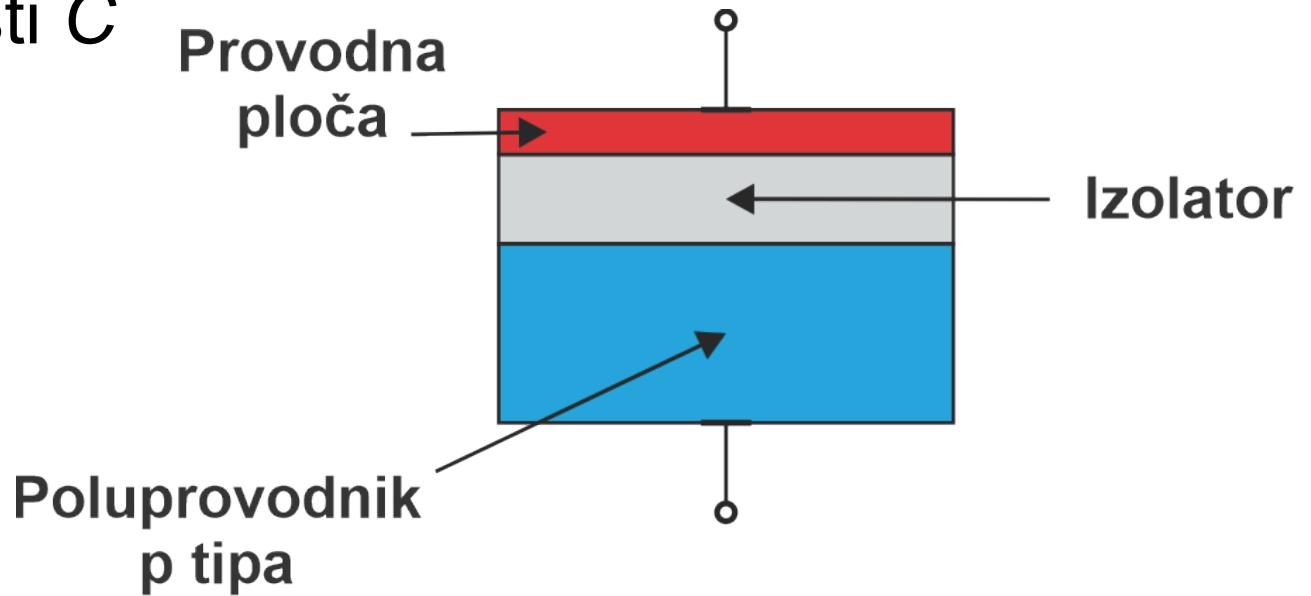


MOSFET

Marko Dimitrijević

MOS tranzistor – principi rada

- **MOS struktura:** metal, silicijum (IV) oksid (dielektrik), poluprovodnik (semiconductor)
- Kondenzator kapacitivnosti C

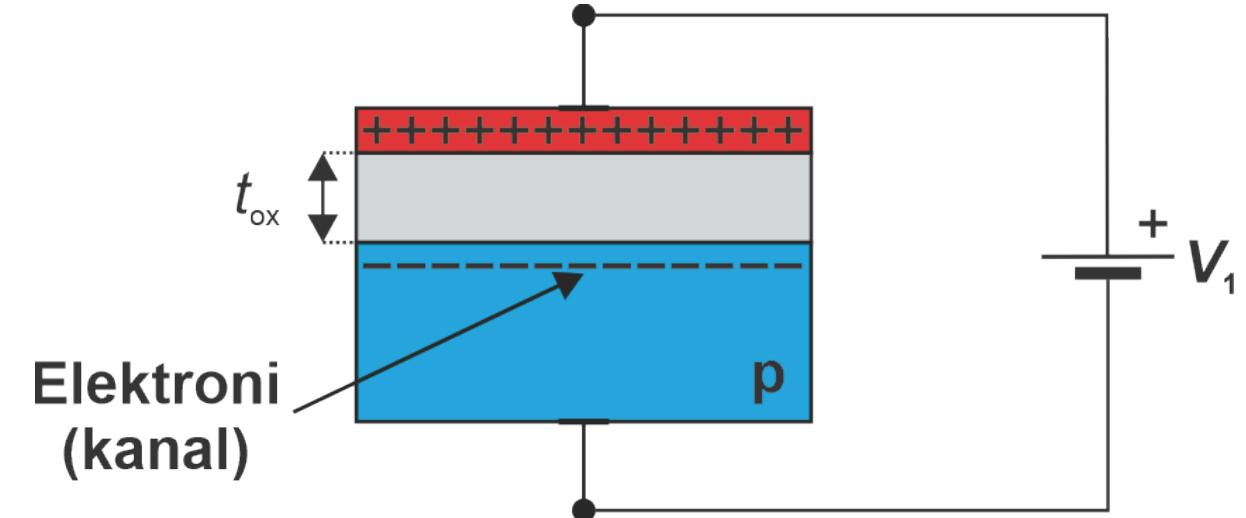


MOS tranzistor – principi rada

- Količina nanelektrisanja je proporcionalna naponu

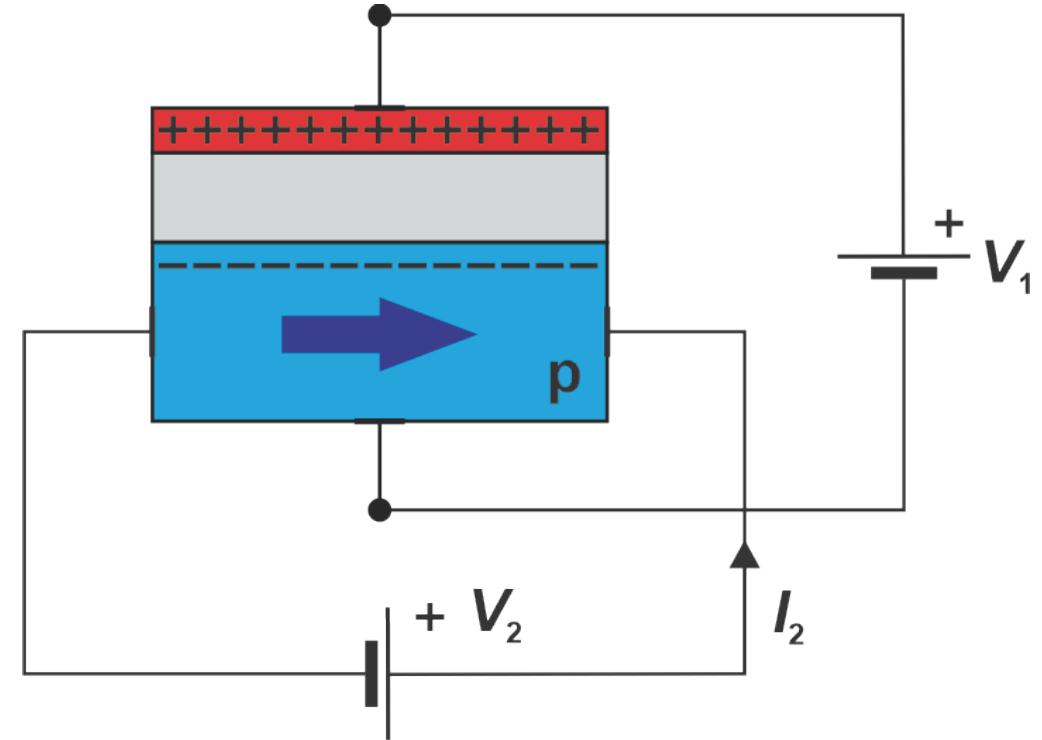
$$Q = CV_1$$

$$C = \epsilon_{\text{ox}} \frac{S}{t_{\text{ox}}}$$



MOS tranzistor – principi rada

- Ukoliko se zatvori kolo, protiče struja I_2
- Struja zavisi od koncentracije naelektrisanja



Tranzistor sa efektom polja

- Najčešći tip tranzistora sa efektom polja je **Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor** (MOSFET). Ime ukazuje na strukturu tranzistora: sastoji se od provodnog (**Metal**) kontakta koji se zove **gejt (G)**, dielektričnog sloja od silicijum oksida (SiO_2 , **Oxide**) i poluprovodničke strukture (**Semiconductor**).
- Poluprovodnička struktura, **kanal**, ima dva kontakta – **sors (S)** i **drejn (D)**. Kanal je simetričan u odnosu na ova dva priključka.
- Osnova ili supstrat (**bulk, B**) MOS tranzistora je vezana za najniži potencijal u kolu.
- Struja gejta je jednaka nuli.
- **Napon na gejtu može da kontroliše struju kanala.**

Tranzistor sa efektom polja

- 1959. godine napravljen je prvi MOSFET u Bell-ovoj laboratoriji.



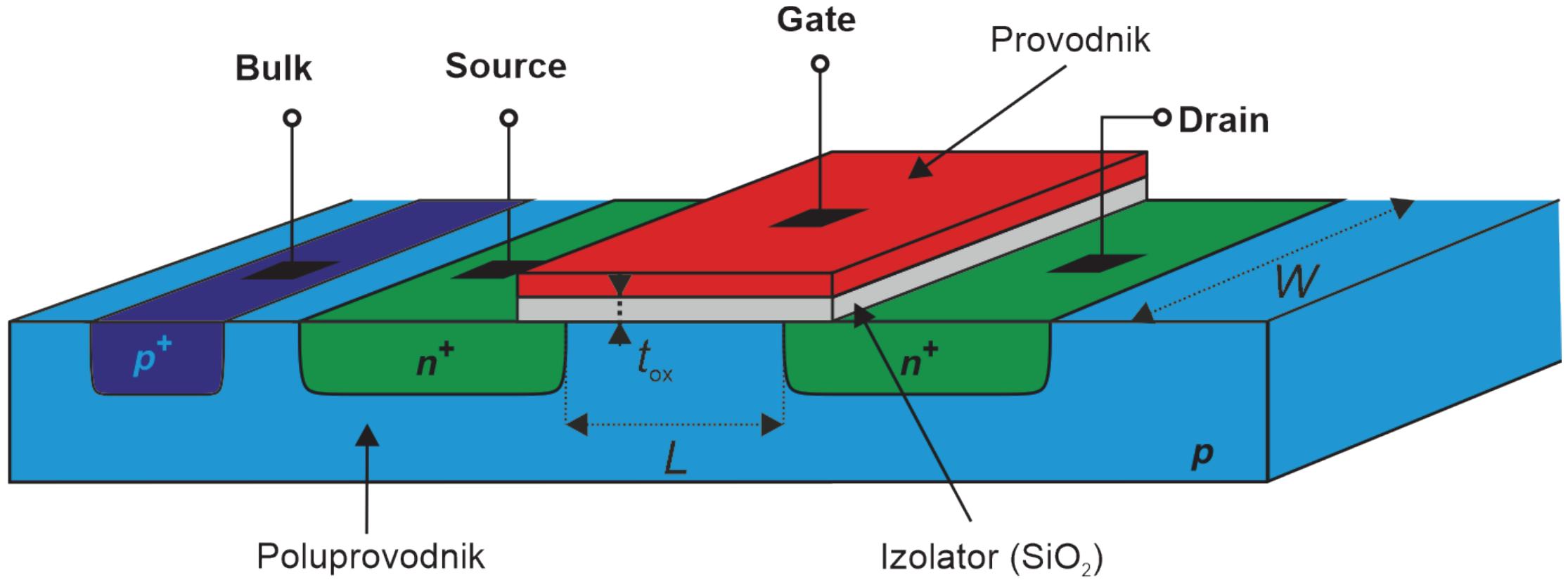
Mohamed Atalla



Dawon Kahng

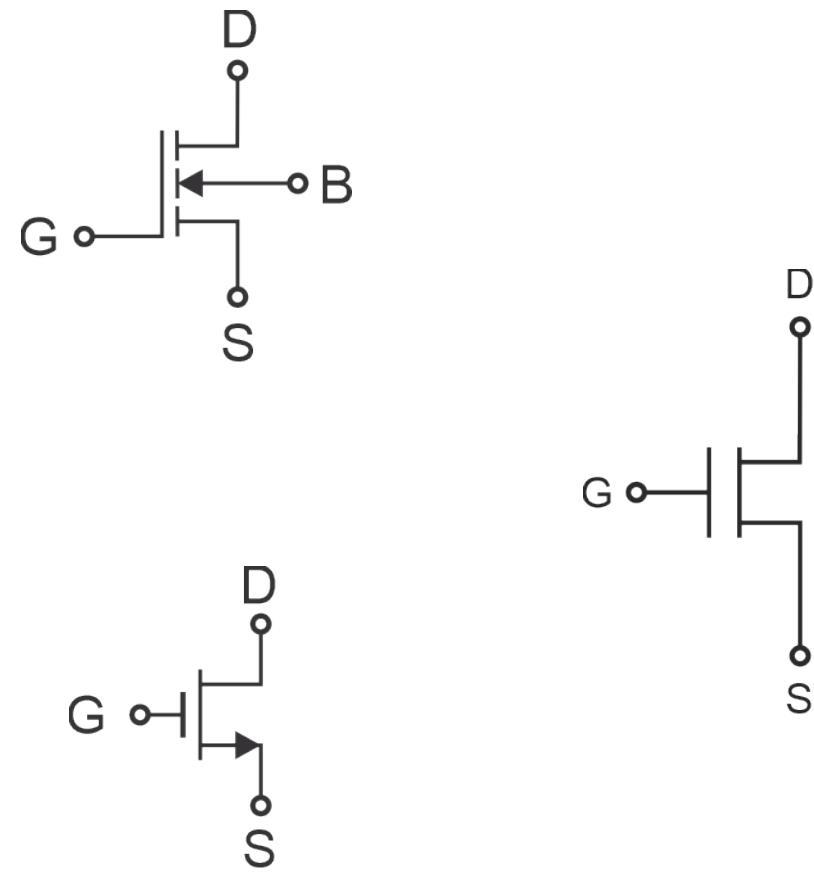
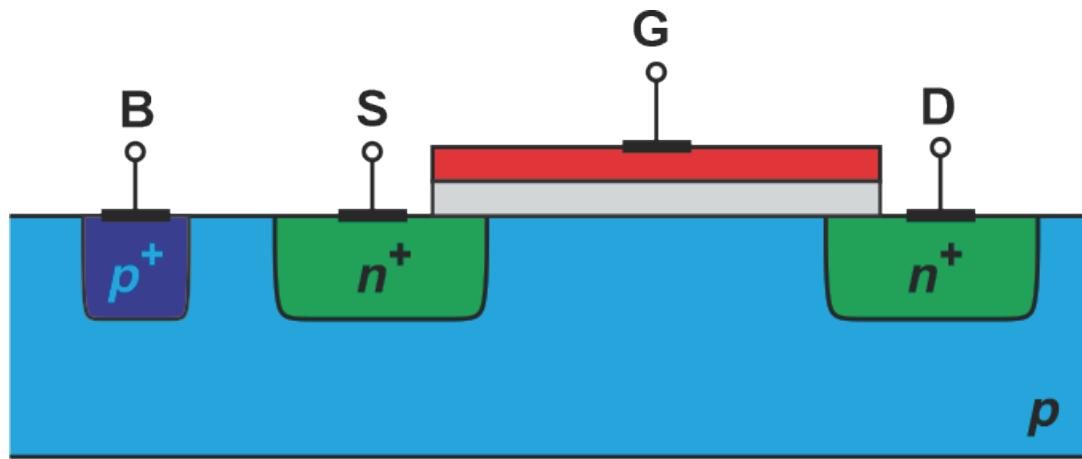
(fotografije: wikipedia.org)

Struktura MOS tranzistora (n-kanalni)

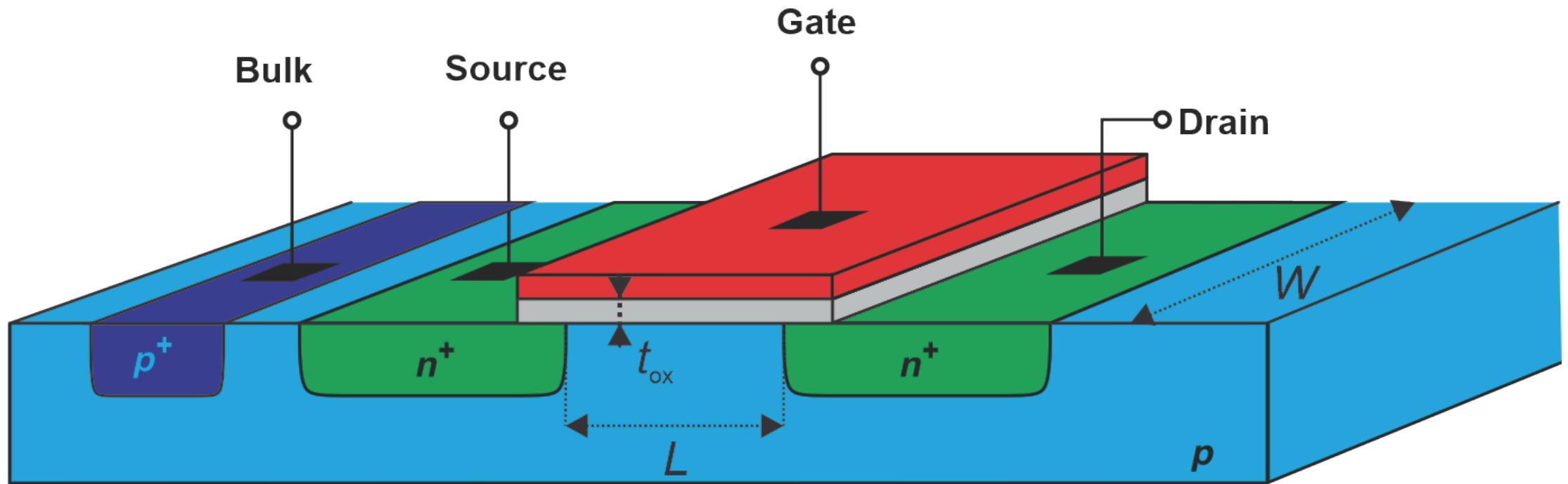


W – širina kanala, L – dužina kanala, t_{ox} – debљина oksida

2D struktura MOS tranzistora i simboli (n-kanalni)



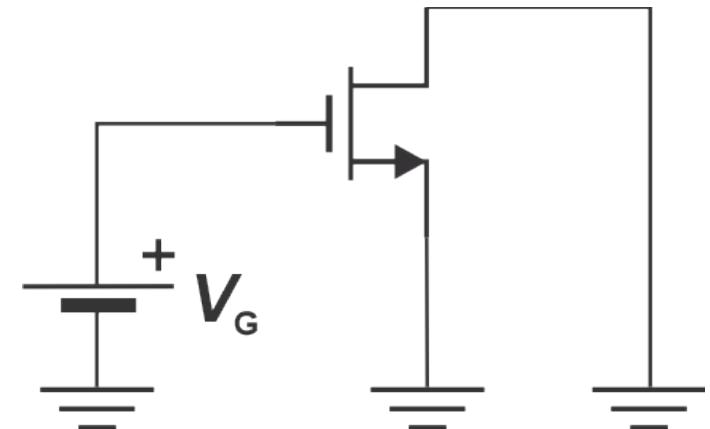
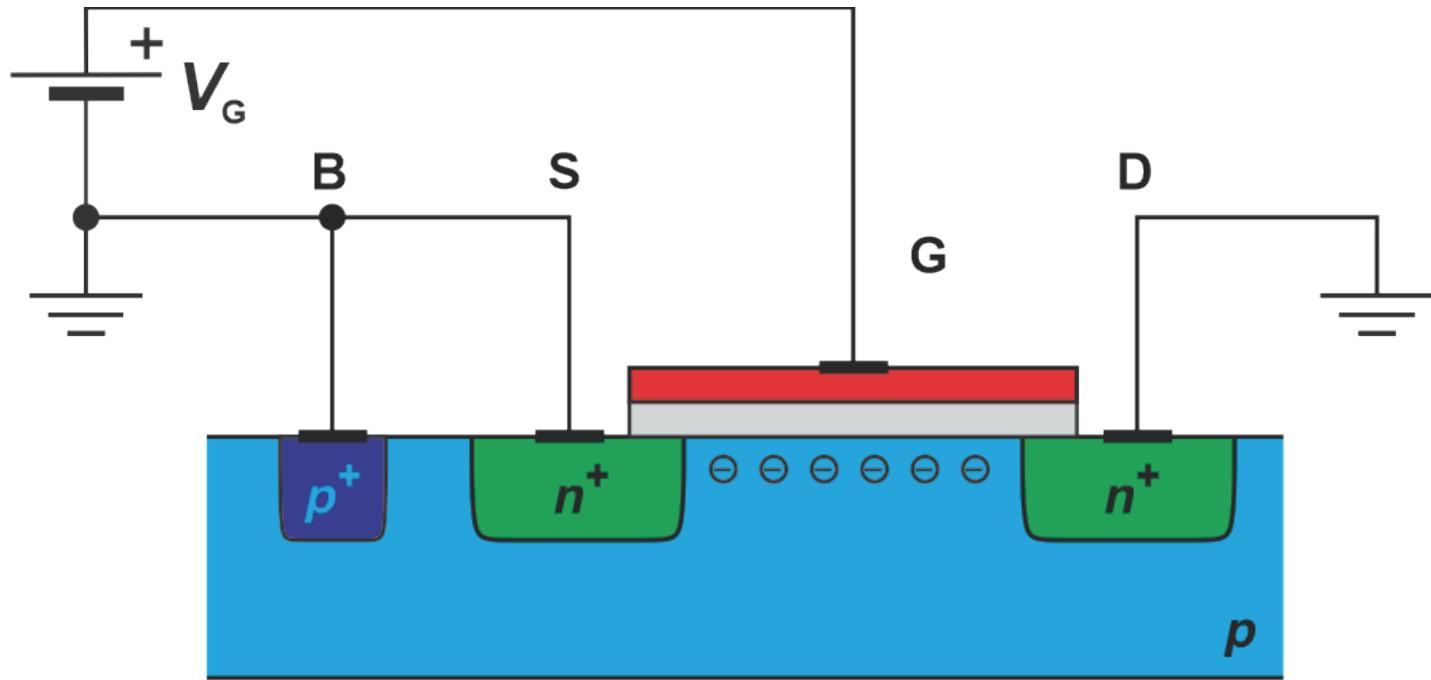
Tipične dimenzije



$$t_{ox} \approx 1.8 \text{ nm}, L \approx 90 \text{ nm}$$

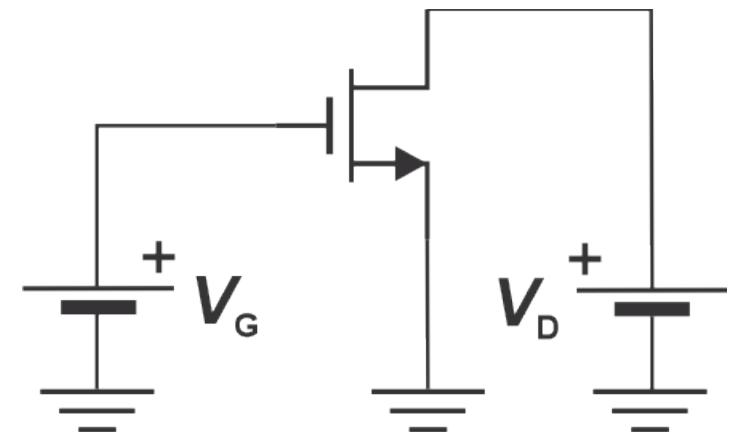
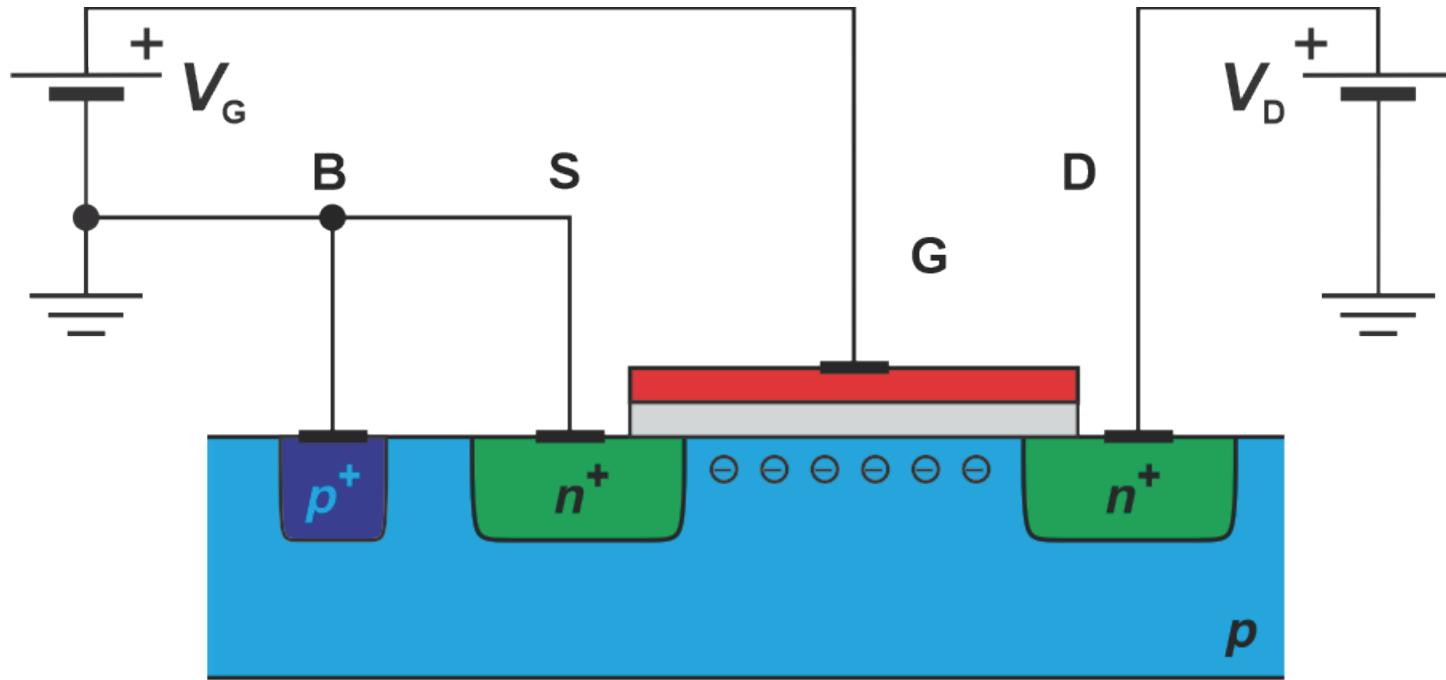
$$C_{\text{ox}} = \epsilon_{\text{ox}} \frac{L \cdot W}{t_{\text{ox}}}$$

Tranzistorski efekat



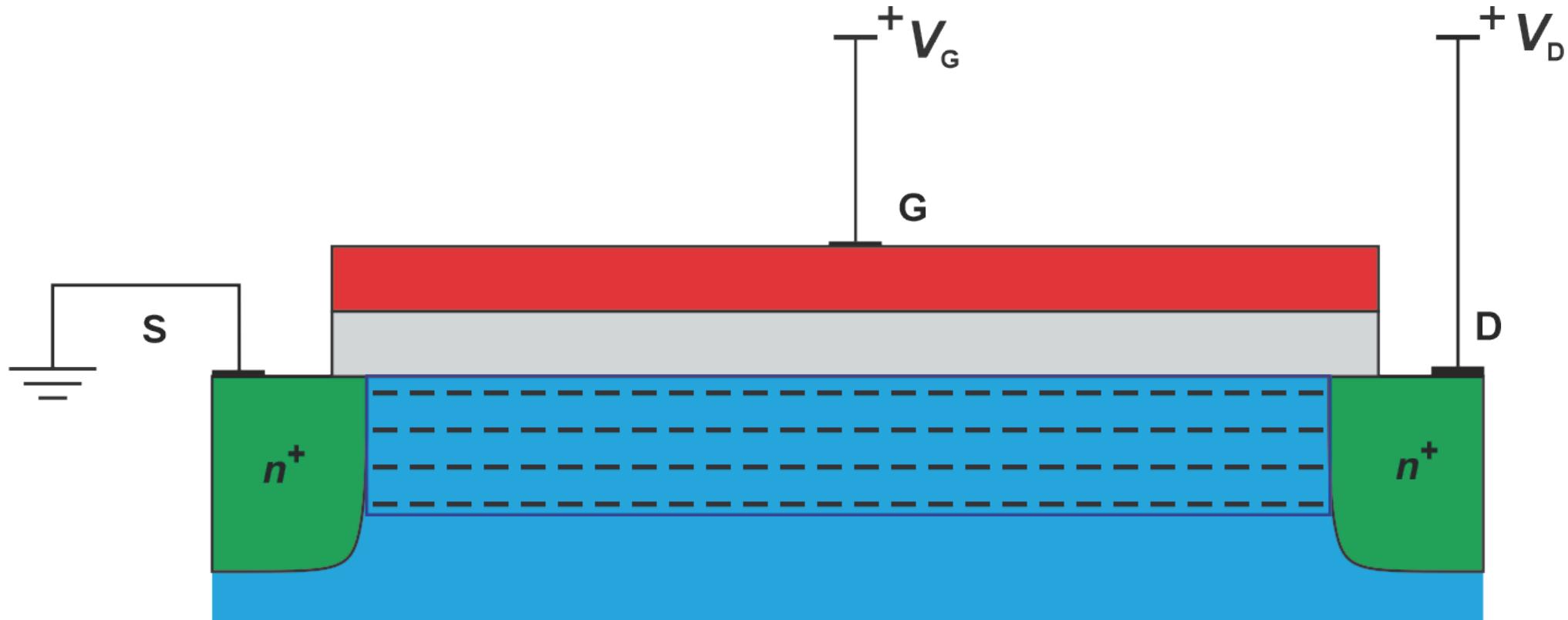
- Kada je $V_G > V_{TH}$, u supstratu se formira (indukuje) kanal koga čine slobodni elektroni.

Tranzistorski efekat



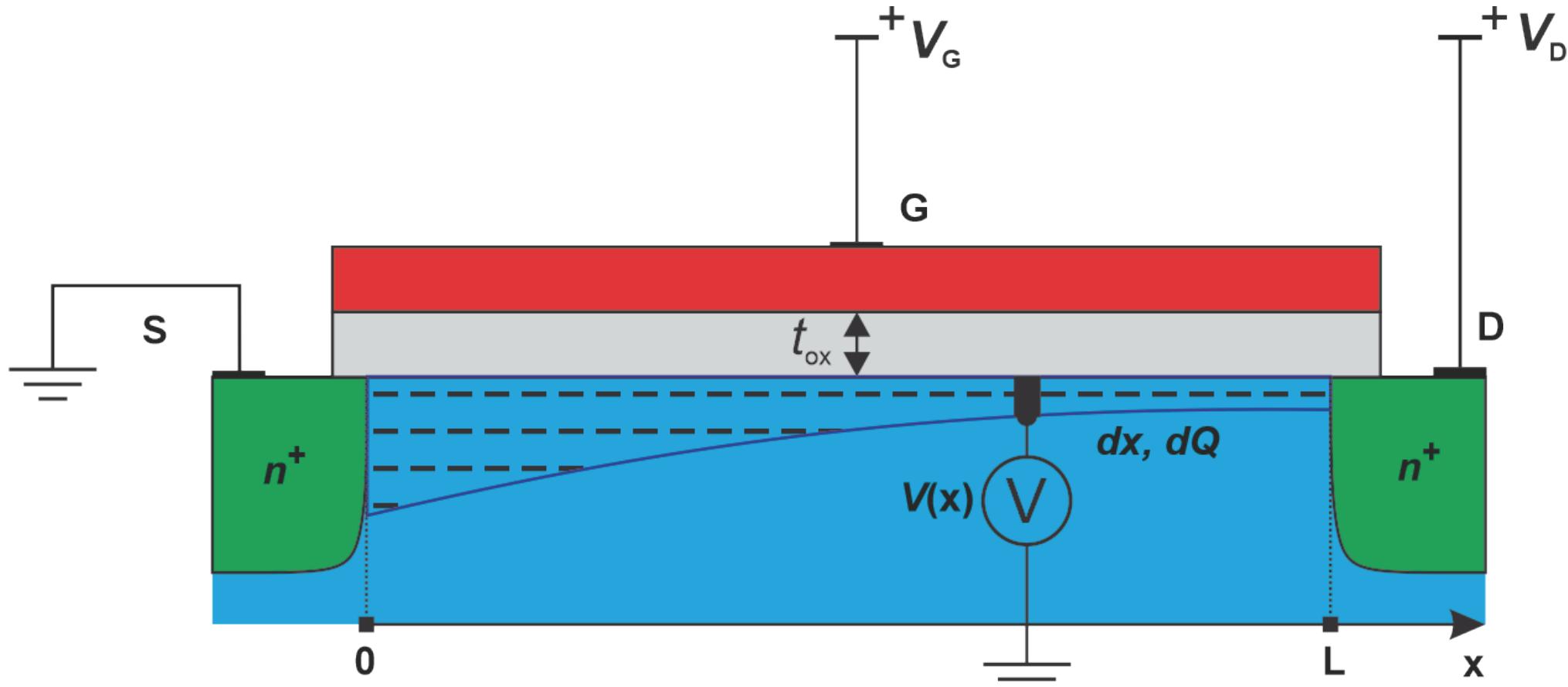
- Kada je $V_D > V_S$, protiče struja drenja koja zavisi od V_D i V_G .

Tranzistorski efekat



- Kada je $V_D=0$, kanal je uniforman.

Tranzistorski efekat



- Kada je $V_D > 0$, $V(0) = 0$, $V(L) = V_D$, kanal je neuniforman.

Tranzistorski efekat

- Količina nanelektrisanja dQ u delu kanalu dužine dx je

$$dQ = C'_{\text{ox}} dx \cdot (V_G - V_{\text{TH}} - V(x))$$

$$dQ = \varepsilon_{\text{ox}} \frac{W}{t_{\text{ox}}} dx \cdot (V_G - V_{\text{TH}} - V(x))$$

- Elektroni se u poluprovodniku pod dejstvom električnog polja kreću konstantnom brzinom

$$v_e = -\mu_n E$$

Tranzistorski efekat

- U vremenskom intervalu dt , elektroni pređu element dužine dx

$$dx = v_e dt$$

$$dx = -\mu_n E dt$$

- Električno polje se može izraziti kao negativni gradijent napona

$$E = -\frac{dV(x)}{dx}$$

Tranzistorski efekat

- Element dužine kanala je dx , prema tome

$$dx = \mu_e \frac{dV(x)}{dx} dt$$

- Količina nanelektrisanja dQ u elementu dužine dx je

$$dQ = \mu_e C'_{\text{ox}} \cdot (V_G - V_{\text{TH}} - V(x)) \cdot \frac{dV(x)}{dx} dt$$

Tranzistorski efekat

- Ukoliko infinitezimalne veličine dx i dt grupišemo na levoj strani

$$\frac{dQ}{dt} dx = \mu_n C'_{ox} \cdot (V_G - V_{TH} - V(x)) \cdot dV(x)$$

- Priraštaj nanelektrisanja u vremenu je struja I_D

$$I_D dx = \mu_n C'_{ox} \cdot (V_G - V_{TH} - V(x)) \cdot dV(x)$$

Tranzistorski efekat

- Integracijom jednačine u granicama od 0 do L , dobija se

$$I_D \int_0^L dx = \mu_n C'_{ox} \cdot \int_{V(0)=0}^{V(L)=V_D} (V_G - V_{TH}) dV - \mu_n C'_{ox} \cdot \int_{V(0)=0}^{V(L)=V_D} V(x) \cdot dV$$

$$I_D \cdot L = \mu_n C'_{ox} \cdot (V_G - V_{TH}) \cdot V_D - \frac{1}{2} \mu_n C'_{ox} \cdot V_D^2$$

$$I_D = \frac{1}{2} \mu_n \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} \frac{W}{L} \cdot (2(V_G - V_{TH}) \cdot V_D - V_D^2)$$

Tranzistorski efekat – triodni režim

- Struja drijna zavisi od **električnih osobina poluprovodnika i dielektrika (oksida)**, ali i od **dimenzija tranzistora**, konkretno odnosa širine i dužine kanala W/L
- Struja drijna ima **kvadratnu** zavisnost od napona V_D
- **Maksimalna struja drijna** se može naći ukoliko se izvod I_D po V_D izjednači sa nulom:

$$\frac{dI_D}{dV_D} = \frac{1}{2} \mu_n \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} \frac{W}{L} \cdot (2(V_G - V_{TH}) - 2V_D)$$

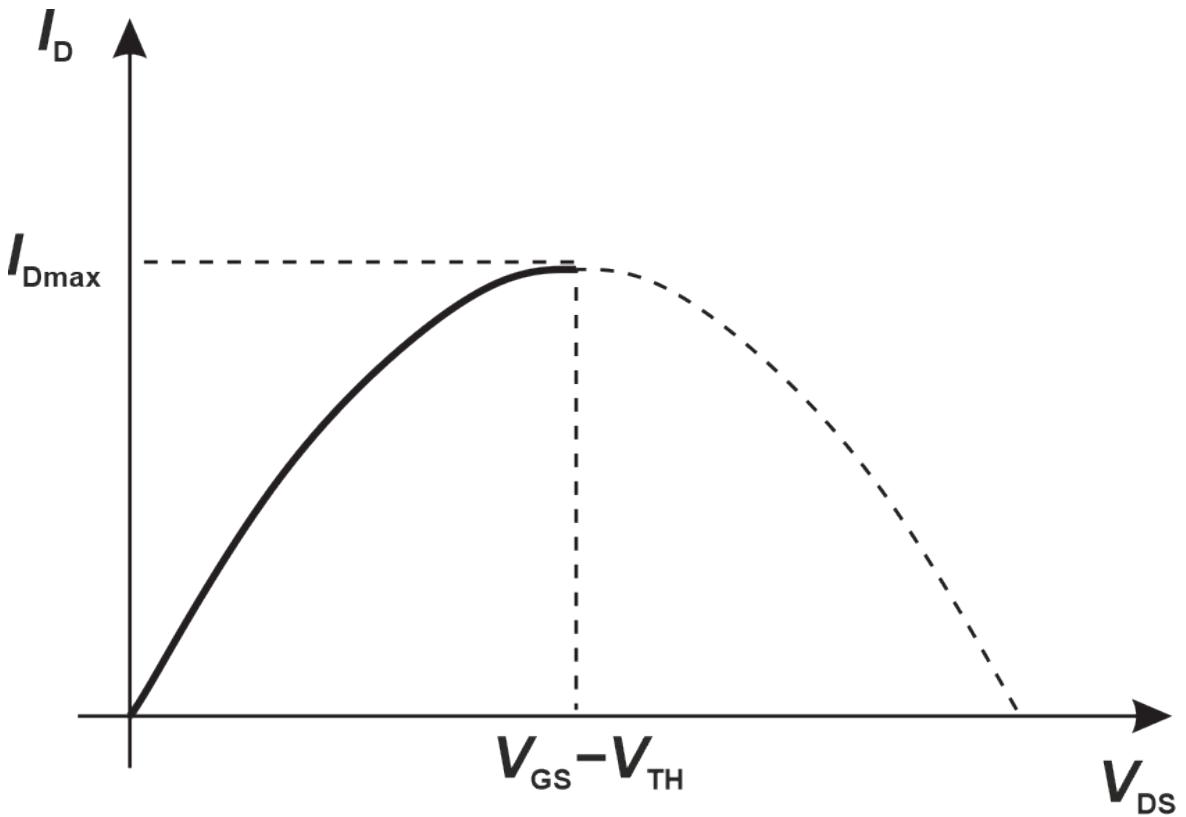
$$V_G - V_{TH} - V_D = 0$$

Tranzistorski efekat – triodni režim

- Sors je vezan za masu,
tako da je $V_G = V_{GS}$,
 $V_D = V_{DS}$

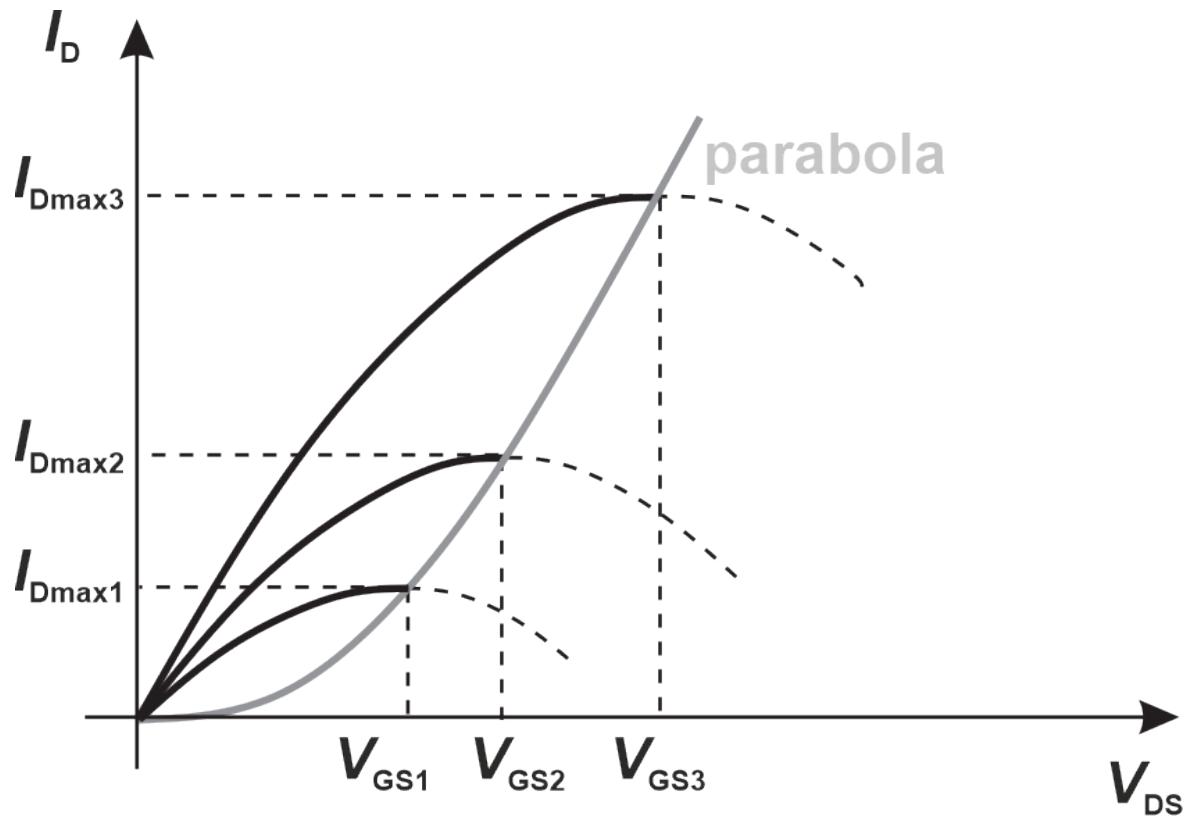
$$V_{DS} = V_{GS} - V_{TH}$$

$$I_{Dmax} = \frac{1}{2} \mu_n \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} \frac{W}{L} \cdot (V_{GS} - V_{TH})^2$$



Tranzistorski efekat – triodni režim

- Familija karakteristika, maksimumi se nalaze na paraboli
- Za male vrednosti $V_{DS} \ll V_{GS} - V_{TH}$, kvadratni član u jednačini za struju drenja možemo da zanemarimo



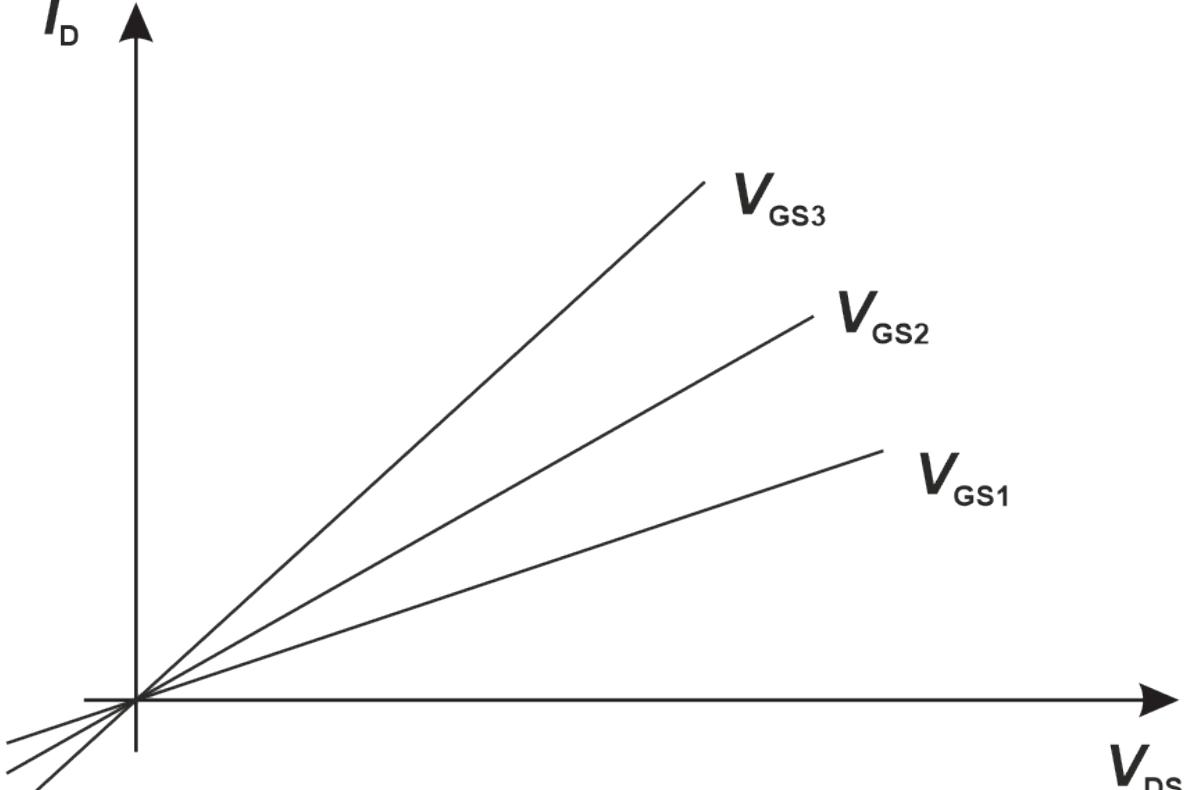
Tranzistorski efekat – triodni režim

$$I_D = \frac{1}{2} \mu_n \frac{\varepsilon_{\text{ox}}}{t_{\text{ox}}} \frac{W}{L} \cdot \left(2(V_{GS} - V_{TH}) \cdot V_{DS} - V_{DS}^2 \right)$$

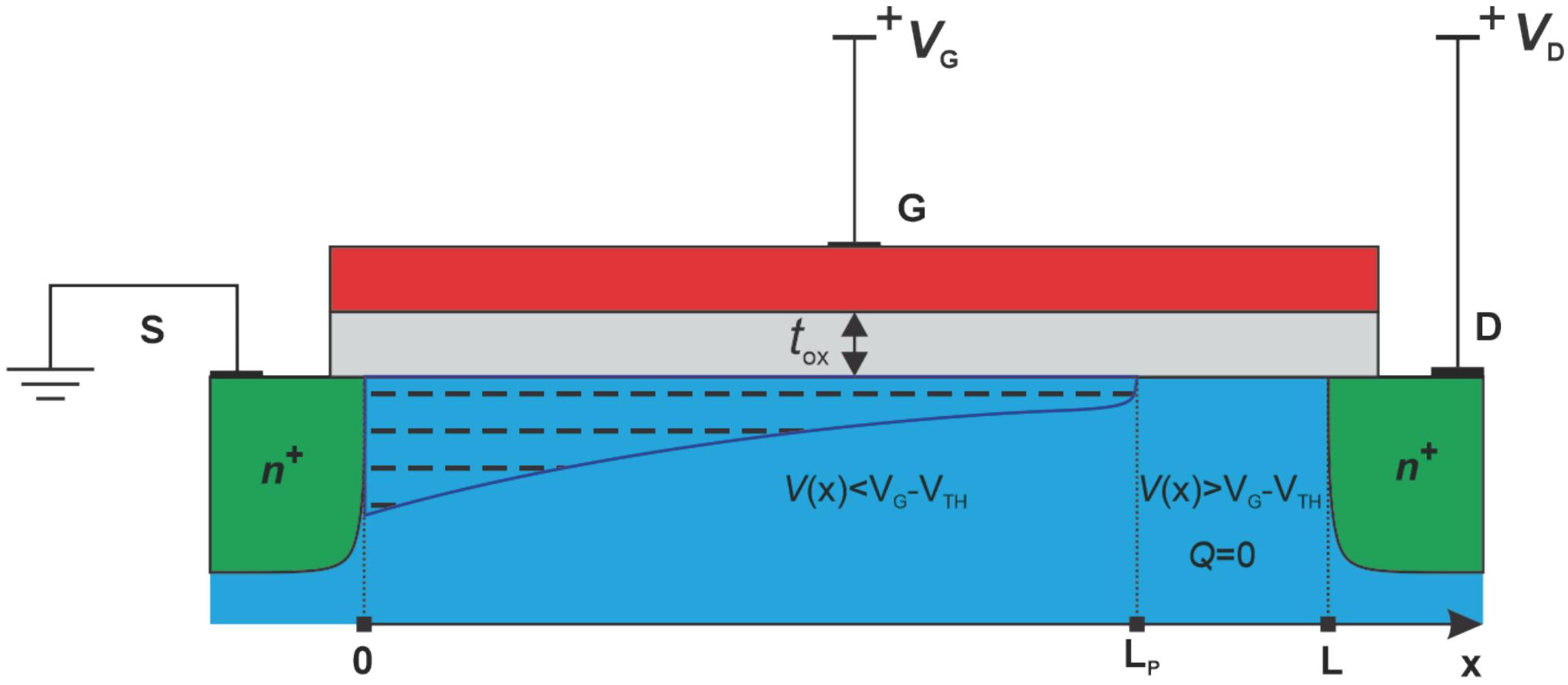
$$I_D = \mu_n \frac{\varepsilon_{\text{ox}}}{t_{\text{ox}}} \frac{W}{L} \cdot (V_{GS} - V_{TH}) \cdot V_{DS}$$

$$I_D = \frac{V_{DS}}{R_D}$$

$$R_D = \frac{1}{\mu_n \frac{\varepsilon_{\text{ox}}}{t_{\text{ox}}} \frac{W}{L} \cdot (V_{GS} - V_{TH})}$$



Tranzistorski efekat – saturacija



- $V_D > V_G - V_{TH}$, prekid kanala, MOSFET ulazi u zasićenje

Tranzistorski efekat – saturacija

- Zbog prekinutog kanala, gornja granica integracije je $V_{GS} - V_{TH}$

$$I_D \int_0^{L_P} dx = \mu_n C'_{ox} \cdot \int_0^{V_{GS} - V_{TH}} (V_{GS} - V) dV - \mu_n C'_{ox} \cdot \int_0^{V_{GS} - V_{TH}} V(x) \cdot dV$$

$$I_D \cdot L_P = \mu_n C'_{ox} \cdot (V_{GS} - V_{TH})^2 - \frac{1}{2} \mu_n C'_{ox} \cdot (V_{GS} - V_{TH})^2$$

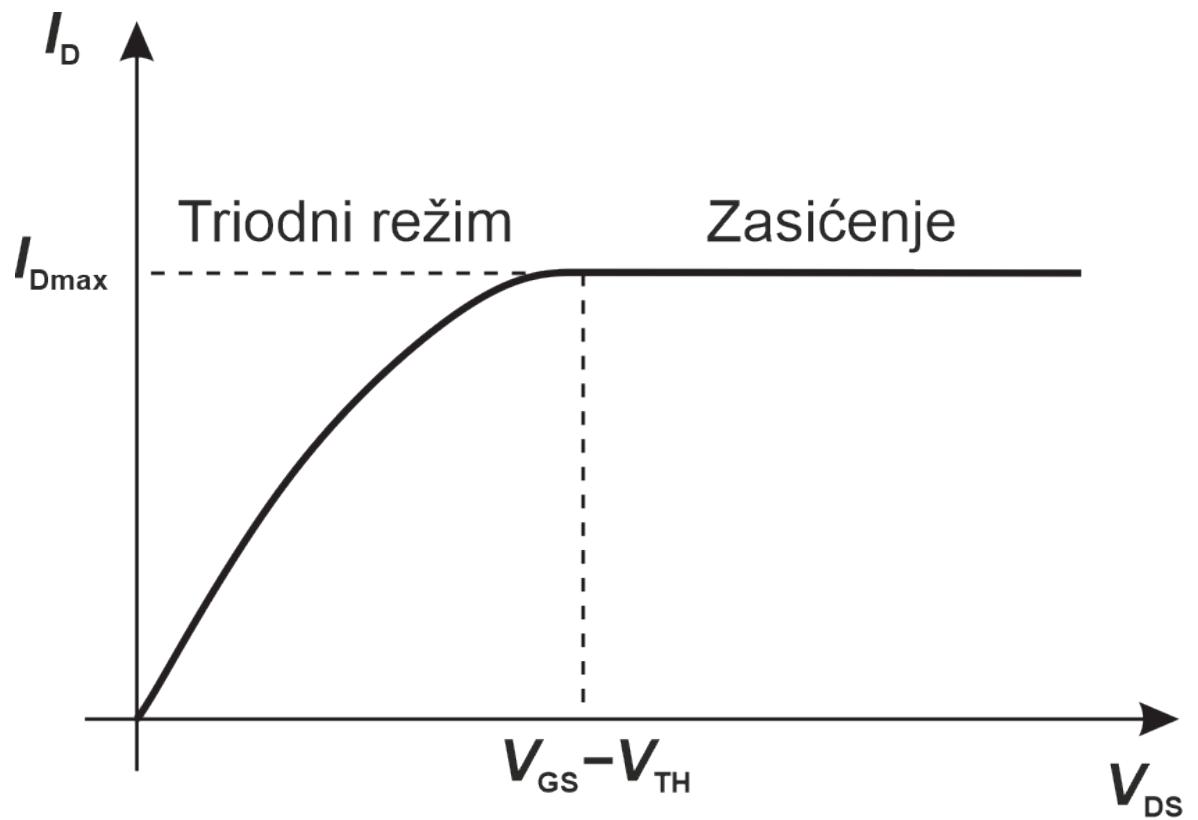
$$I_D = \frac{1}{2} \mu_n \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} \frac{W}{L_P} \cdot (V_{GS} - V_{TH})^2$$

Tranzistorski efekat – modulacija dužine kanala

- Za $V_{DS} > V_{GS} - V_{TH}$, struja drenirana je **približno** konstantna, MOSFET je u zasićenju

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

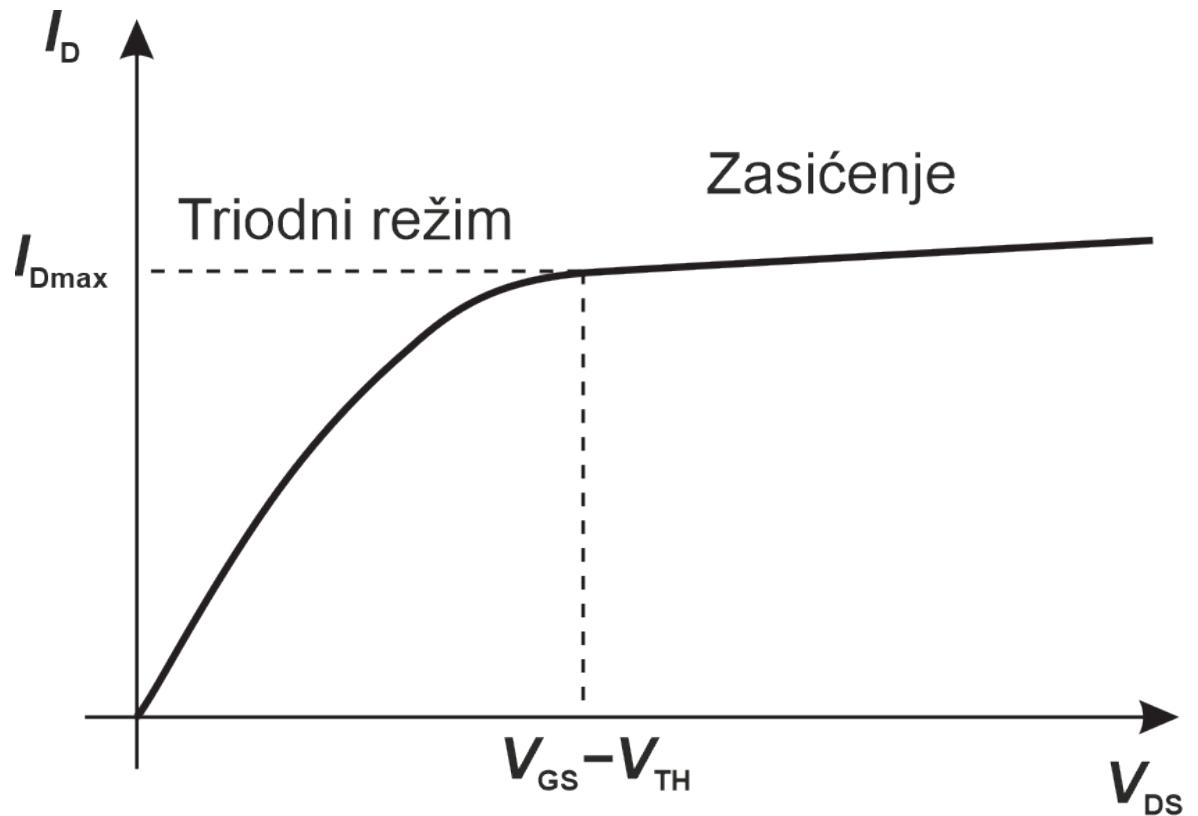
$$I_D = \frac{1}{2} \mu_n \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} \frac{W}{L_p} \cdot (V_{GS} - V_{TH})^2$$



Tranzistorski efekat – modulacija dužine kanala

- L_P je dužina prekinutog kanala, zavisi od napona V_{DS}
- Parametar λ je koeficijent modulacije dužine kanala

$$L_P = \frac{L}{1 + \lambda \cdot V_{DS}}$$



Struja dregna

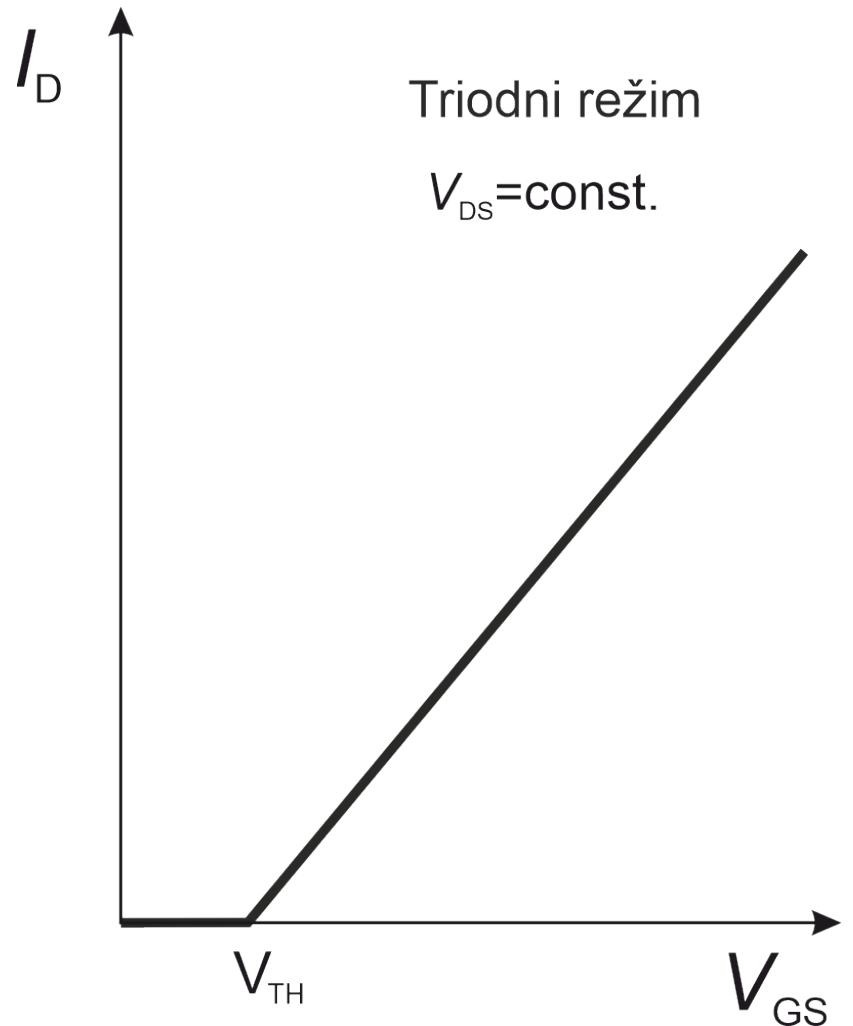
- Pojednostavljenje izraza

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

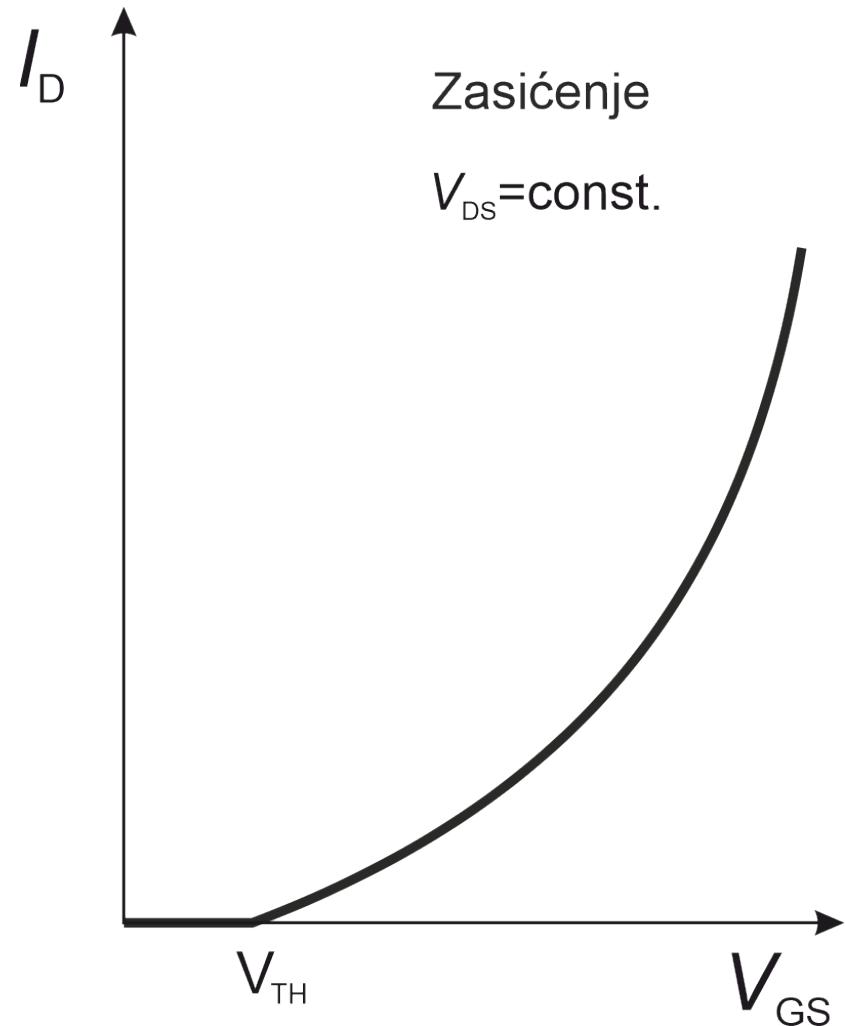
$$I_D = \underbrace{\frac{1}{2} \mu_n \cdot V_{TH}^2 \cdot \frac{\varepsilon_{ox}}{t_{ox}} \frac{W}{L}}_{I_{DS}} \cdot \left(\frac{V_{GS}}{V_{TH}} - 1 \right)^2 \cdot (1 + \lambda V_{DS})$$

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

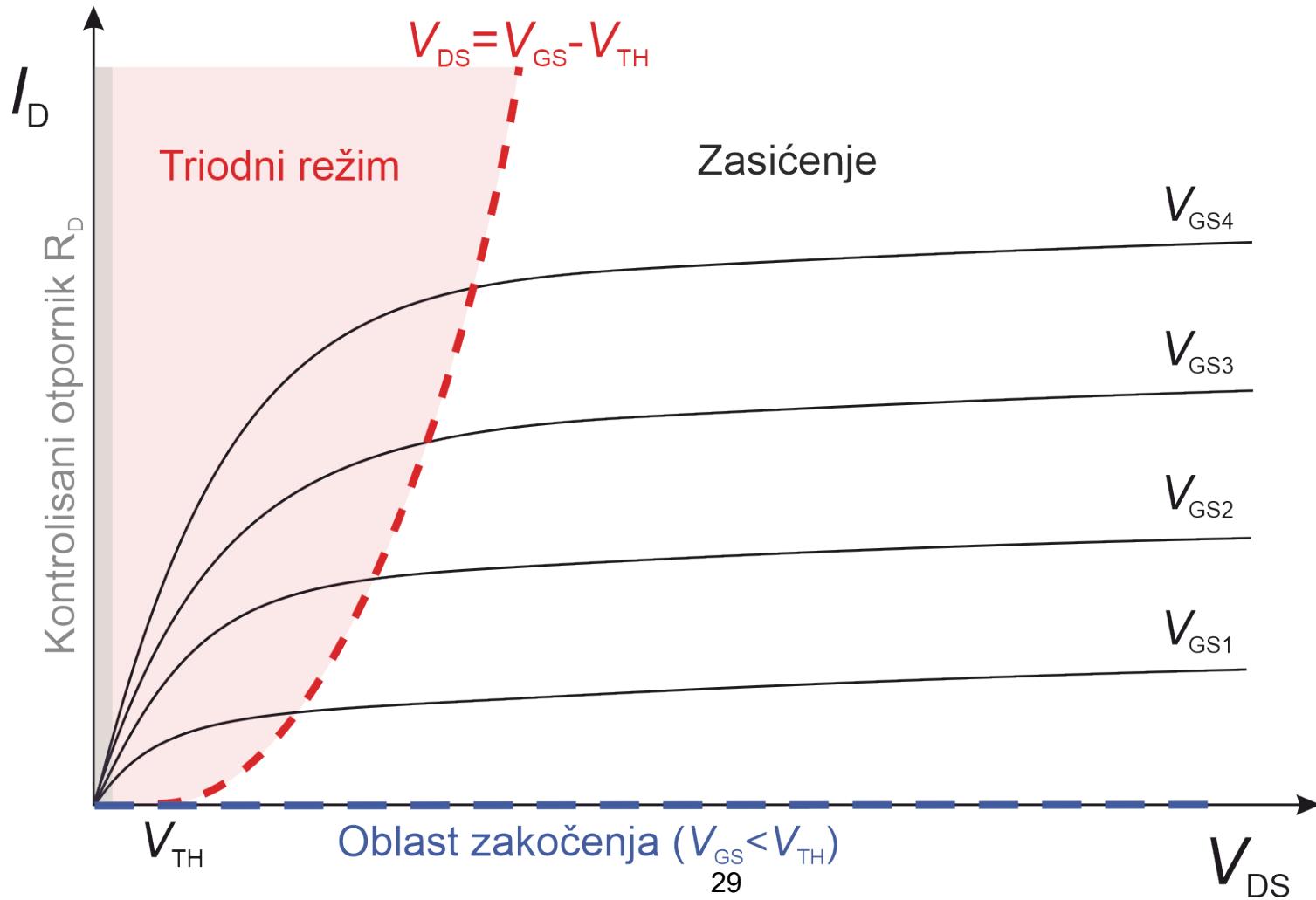
Prenosna karakteristika



28



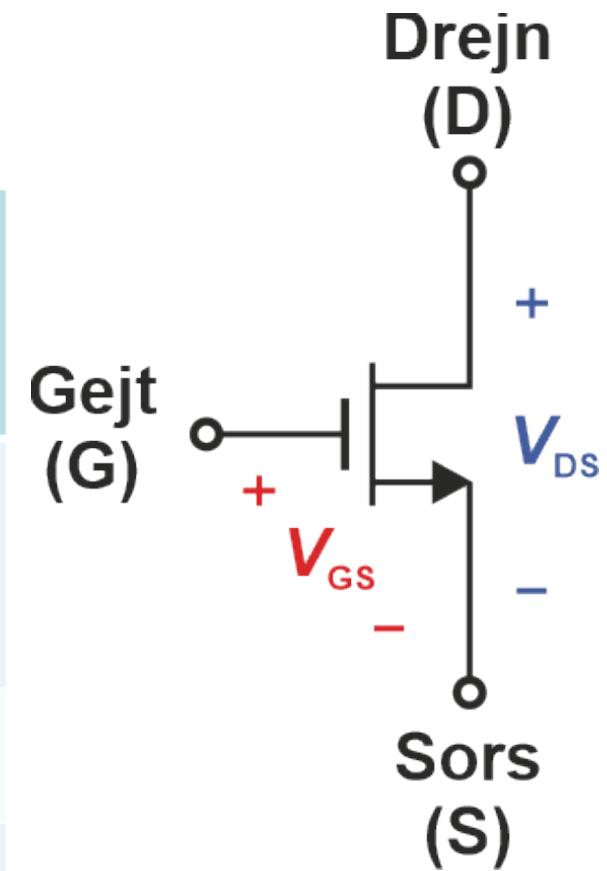
Izazna karakteristika



Režimi rada MOSFET-a

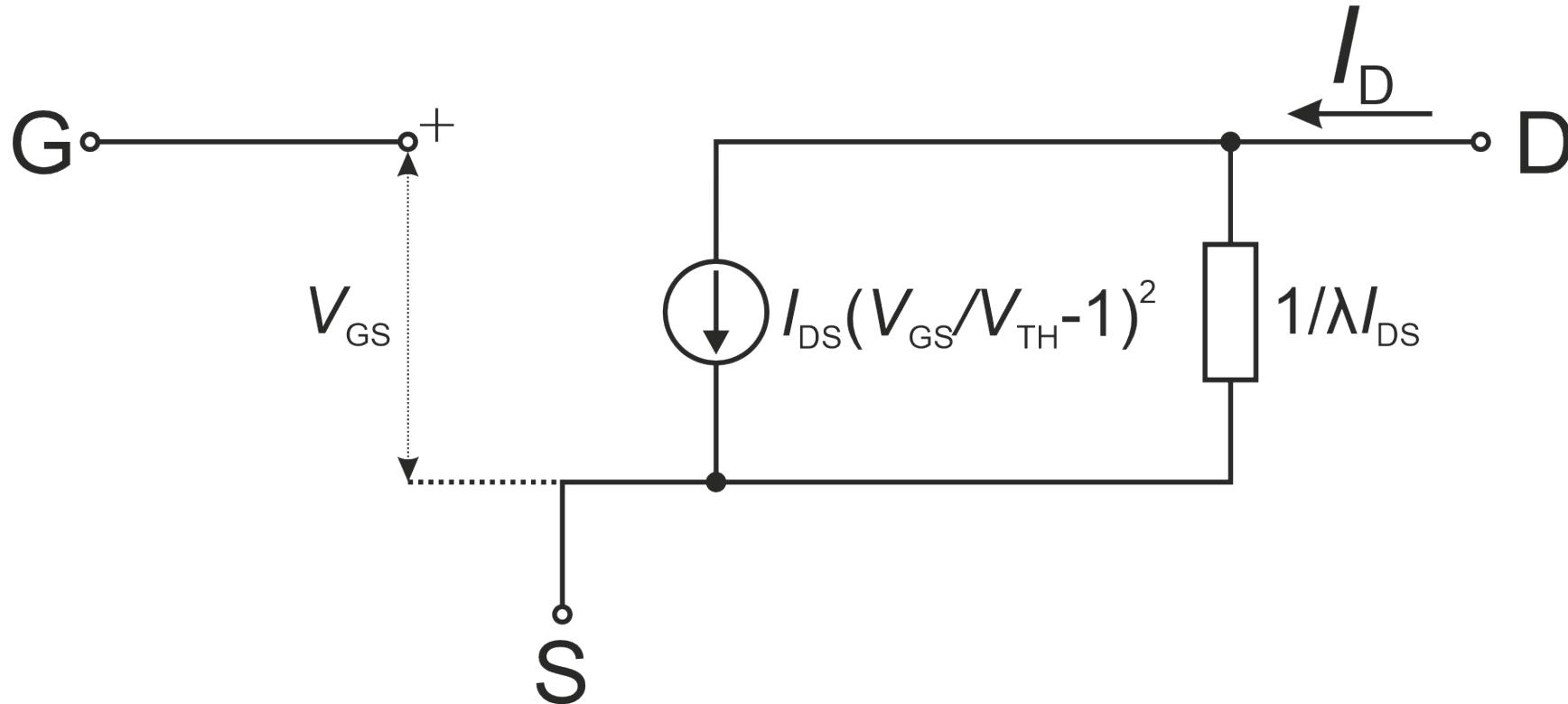
- Režim rada MOSFET-a zavisi od odnosa napona između priključaka V_{GS} i V_{DS} .

Naponi	Zavisnost struje kanala I_D od V_{GS}	Zavisnost struje kanala I_D od V_{DS}	Režim rada	Ponašanje
$V_{GS} > V_{TH}$, $V_{TH} - V_{GS} < V_{DS}$ $< V_{GS} - V_{TH}$	linearna	kvadratna	triodni režim	Kontrolisani otpornik, zatvoreni prekidač
$V_{GS} > V_{TH}$, $V_{DS} > V_{GS} - V_{TH}$	kvadratna	linerana	zasićenje	Kontrolisani strujni izvor
$V_{GS} < V_{TH}$	-	-	zakočenje	Otvoreni prekidač

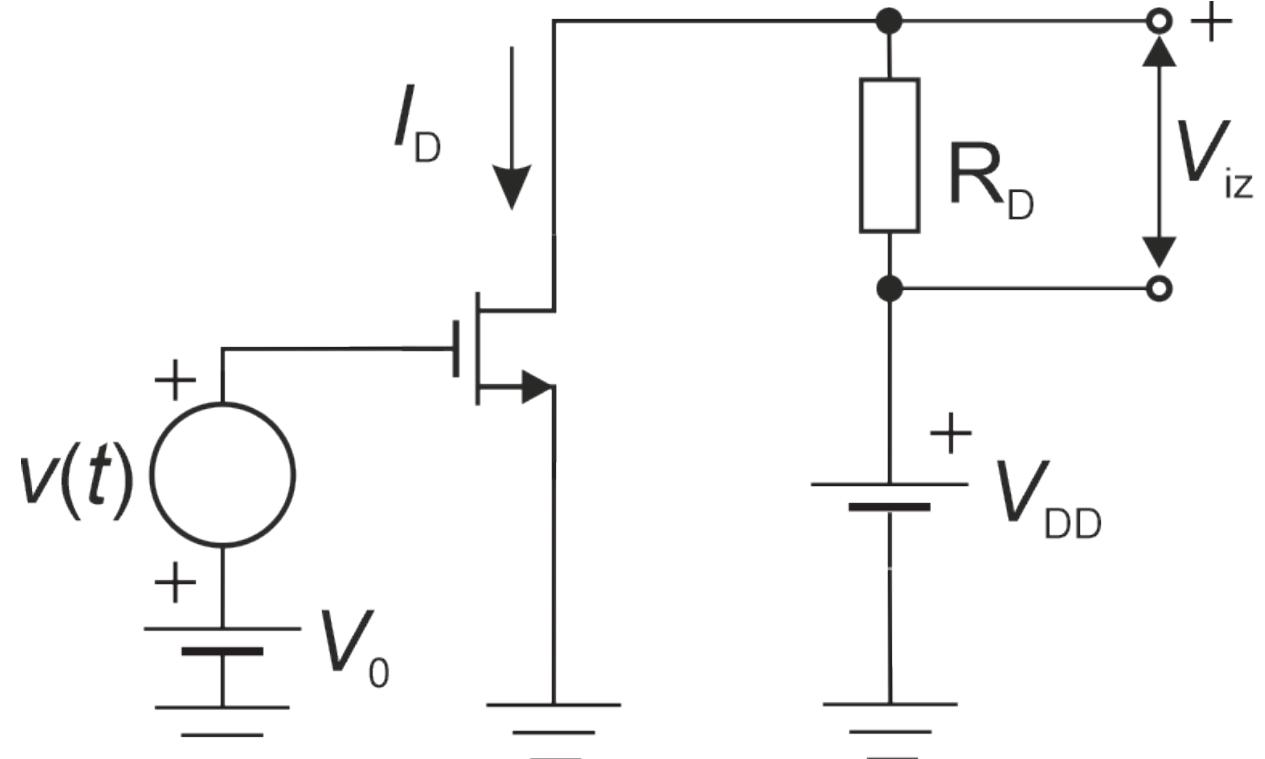
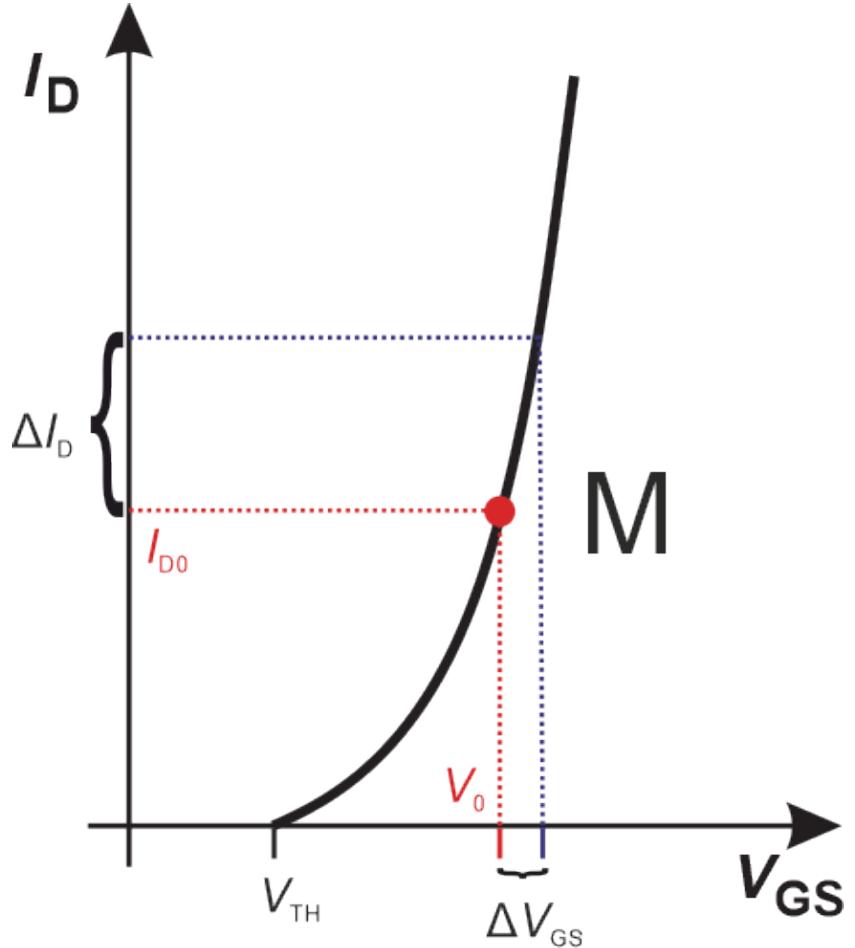


Model za velike signale

- Parametri modela: I_{DS} , V_{TH} , λ



Polarizacija i radna tačka



Transkonduktansa MOS tranzistora

$$I_D = \frac{1}{2} \mu_n \cdot \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH})^2 = I_{DS} \left(\frac{V_{GS}}{V_{TH}} - 1 \right)^2$$

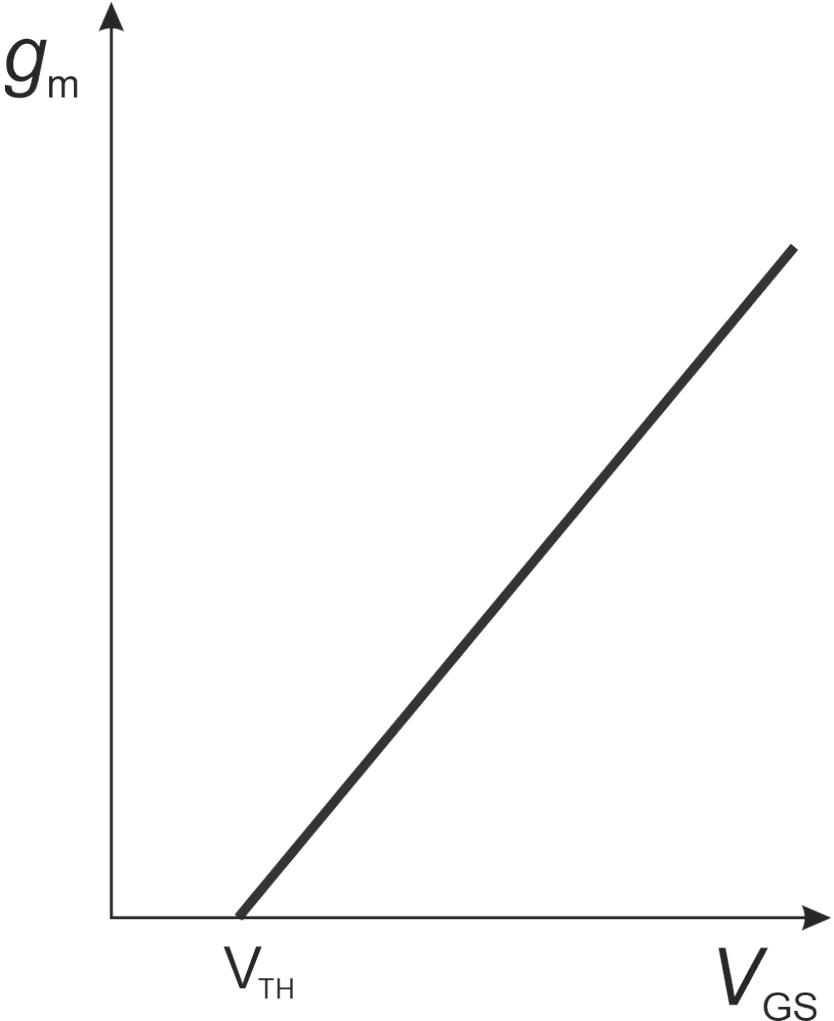
$$g_m = \frac{dI_D}{dV_{GS}}$$

$$g_m = \frac{2I_{DS}}{V_{TH}} \left(\frac{V_{GS}}{V_{TH}} - 1 \right)$$

$$g_m = \mu_n \cdot \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH})$$

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

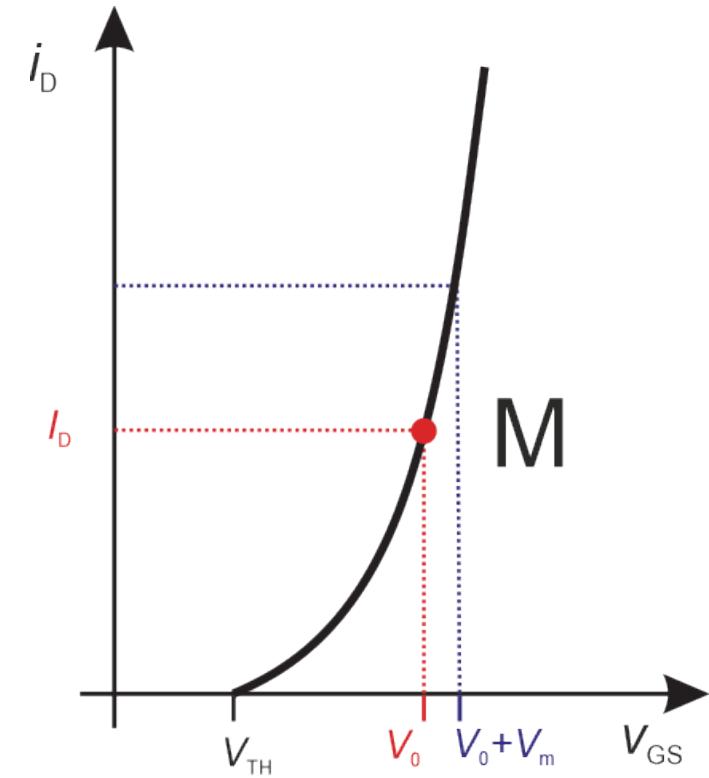
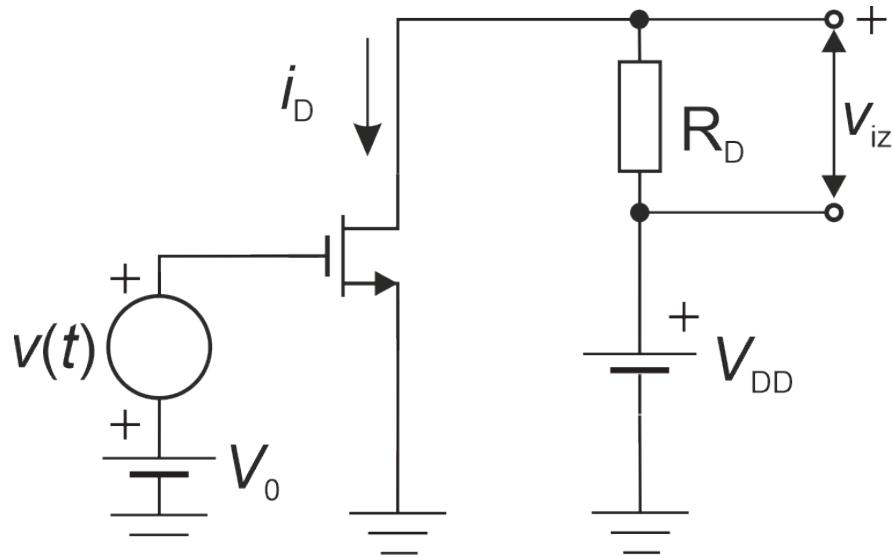
$$g_m = \sqrt{2I_D \cdot \mu_n \cdot \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} \frac{W}{L}}$$



Model MOS tranzistora za male signale

- Signal $v(t)$ je superponiran jednosmernom naponu V_0 , promena napona v_{GS} je mala ($V_m \ll V_{TH}$):

$$v_{GS} = V_0 + v(t) = V_0 + V_m \cdot \sin \omega t$$



Model MOS tranzistora za male signale

$$i_D = I_{DS} \cdot \left(\frac{V_{GS}}{V_{TH}} - 1 \right)^2$$

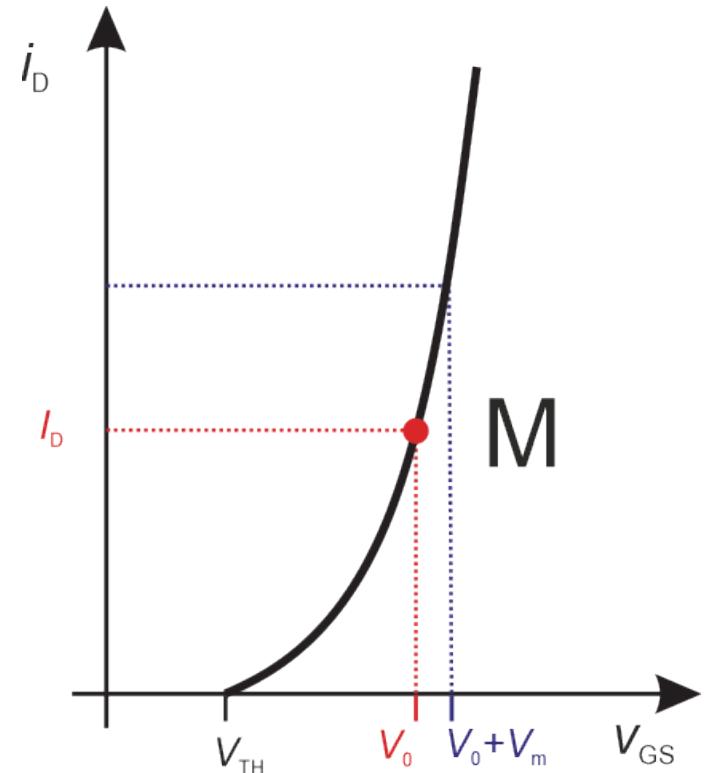
$$i_D = I_{DS} \cdot \left(\frac{V_0 + v(t)}{V_{TH}} - 1 \right)^2$$

$$i_D = I_{DS} \cdot \left(\frac{V_0}{V_{TH}} - 1 \right)^2 + 2I_{DS} \cdot \left(\frac{V_0}{V_{TH}} - 1 \right) \cdot \frac{v(t)}{V_{TH}} + I_{DS} \cdot \underbrace{\left(\frac{v(t)}{V_{TH}} \right)^2}_{\approx 0, V_m \ll V_{TH}}$$

$$i_D = I_D + \underbrace{\frac{2I_{DS}}{V_{TH}} \cdot \left(\frac{V_0}{V_{TH}} - 1 \right)}_{g_m} \cdot v(t)$$

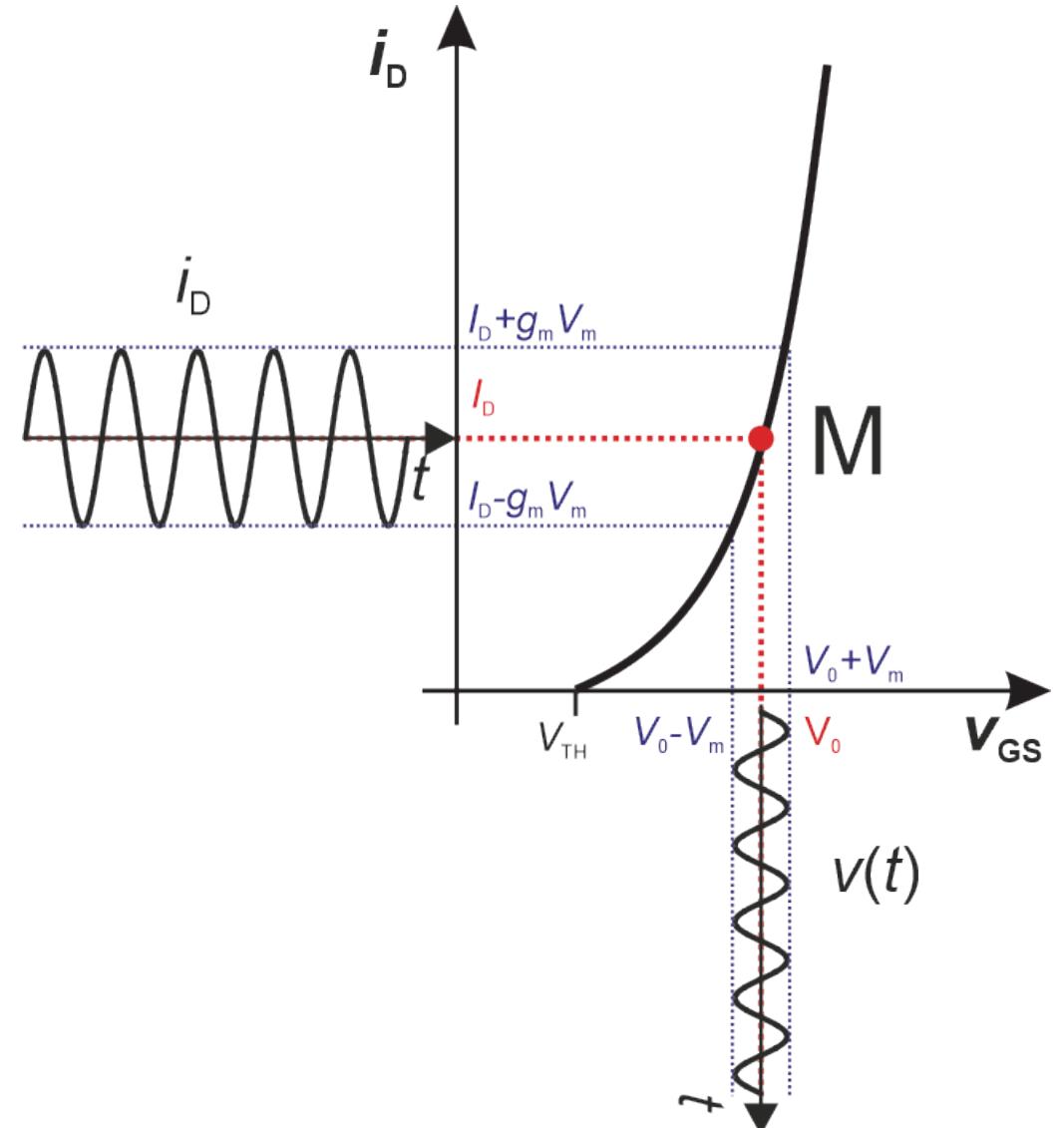
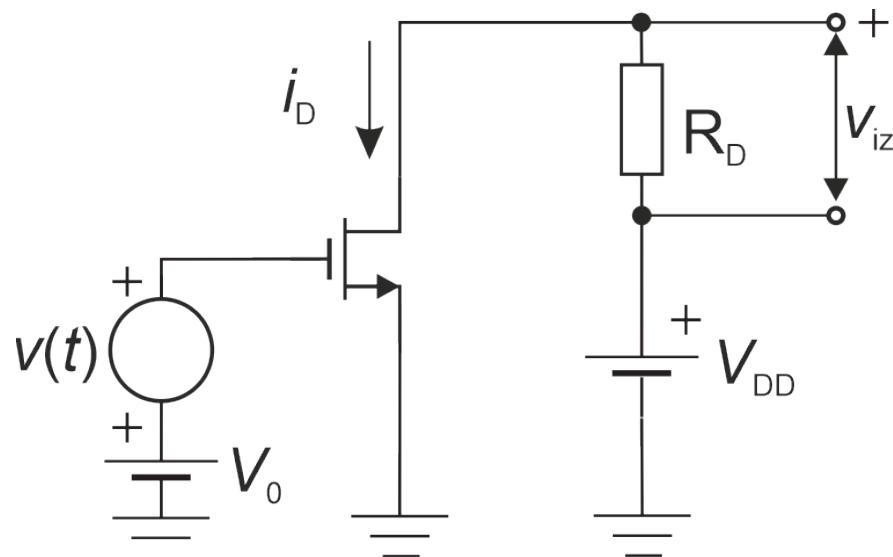
$$i_D = I_D + g_m \cdot v(t)$$

35

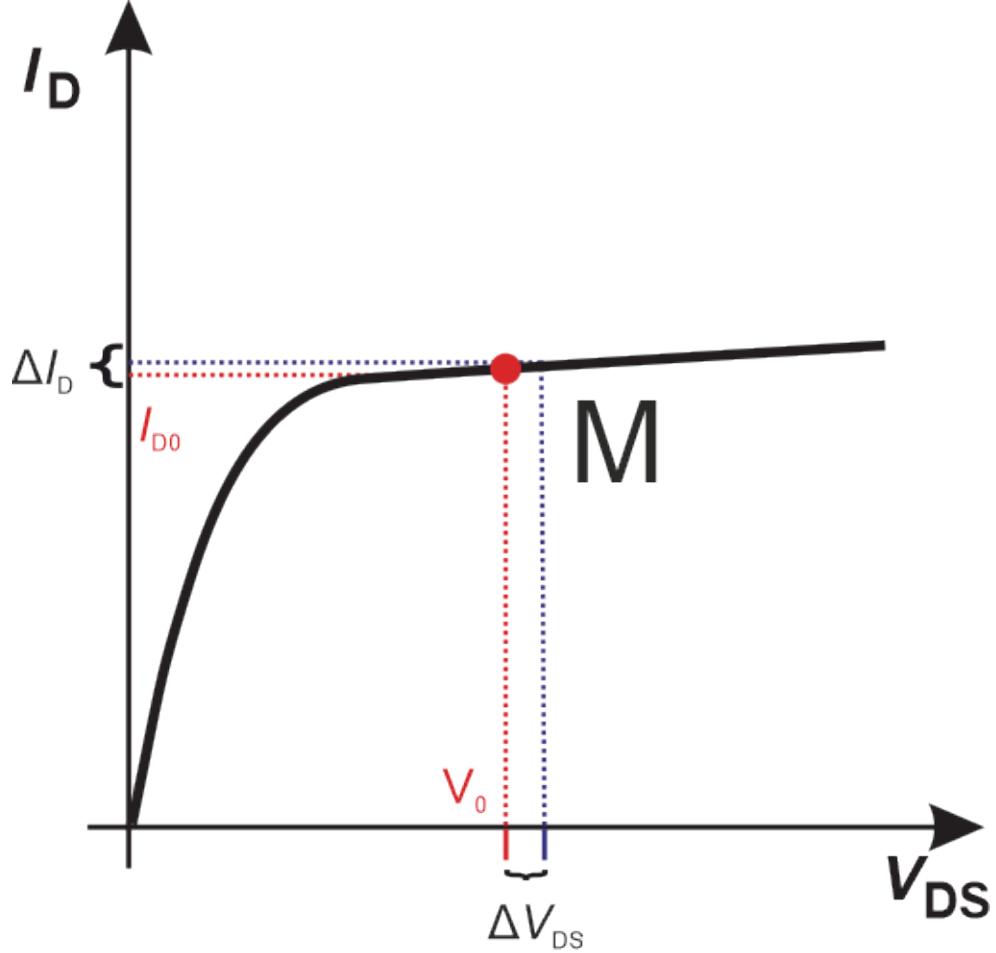


Model MOS tranzistora za male signale

$$i_D = I_D + g_m \cdot V_m \sin \omega t = I_D + \underbrace{g_m \cdot v(t)}_{i_d(t)}$$



Otpornost kanala MOS tranzistora



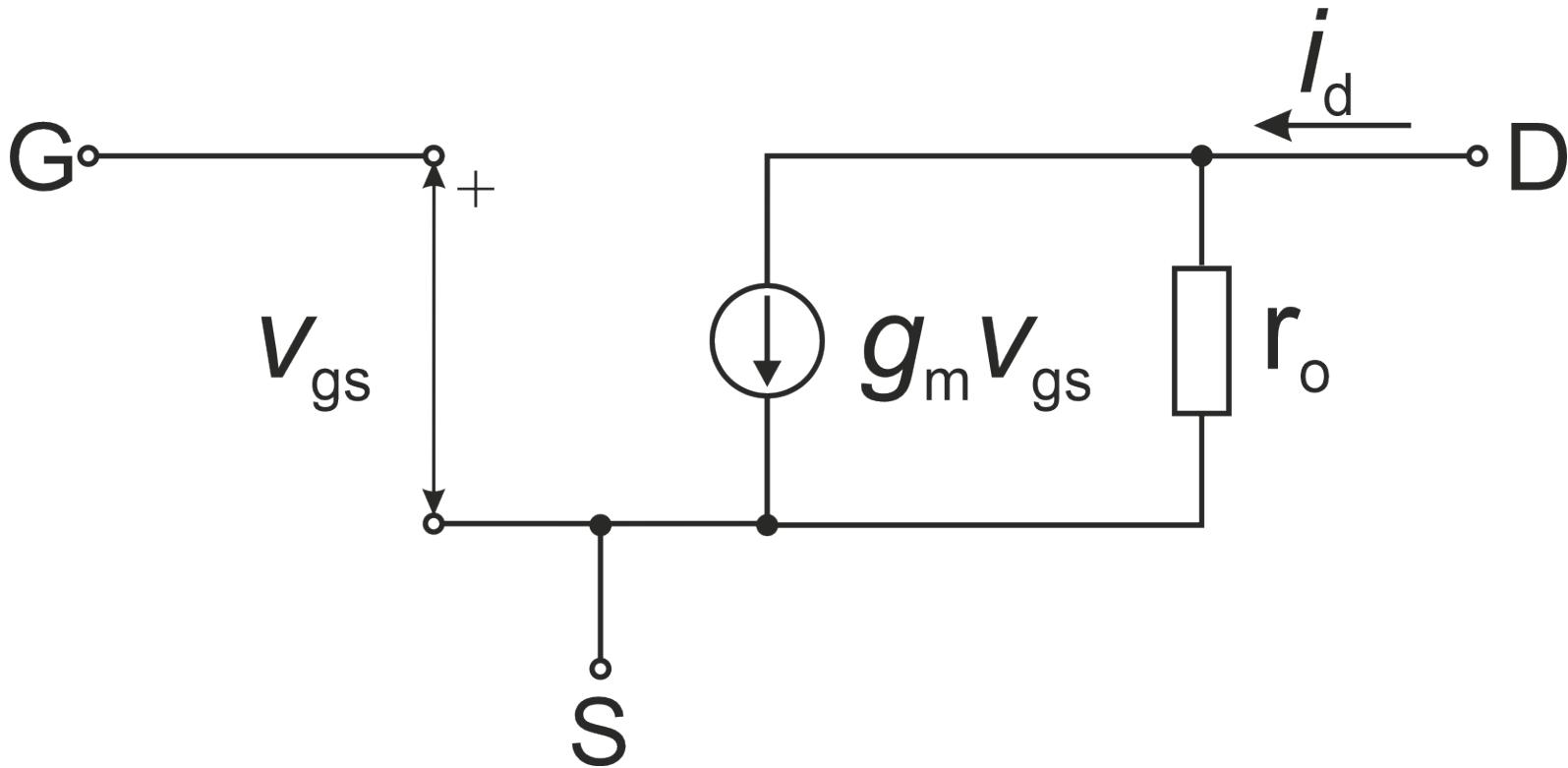
$$i_D = I_{DS} \cdot \left(\frac{V_{GS}}{V_{TH}} - 1 \right)^2 (1 + \lambda v_{DS})$$

$$\frac{di_D}{dV_{DS}} = \lambda I_{DS} \cdot \left(\frac{V_{GS}}{V_{TH}} - 1 \right)^2 \approx \lambda I_D$$

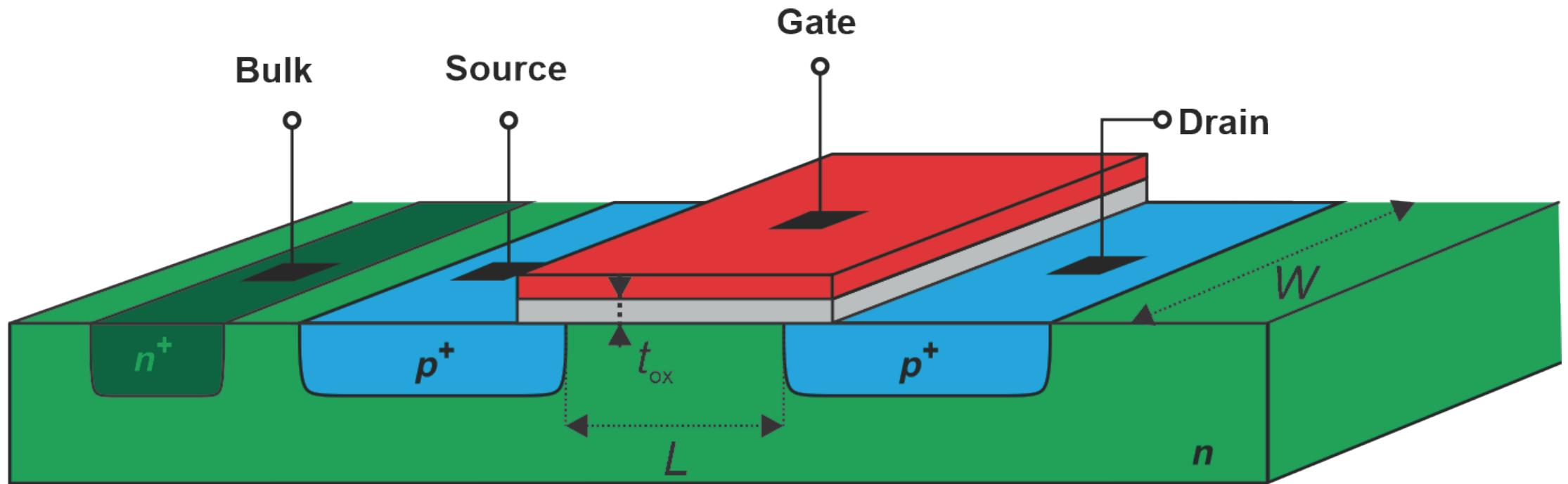
$$r_o = \frac{1}{\lambda I_D}$$

Model MOS tranzistora za male signale

$$g_m = \frac{2I_{DS}}{V_{TH}} \cdot \left(\frac{V_{GS}}{V_{TH}} - 1 \right), \quad r_o = \frac{1}{\lambda I_D}$$



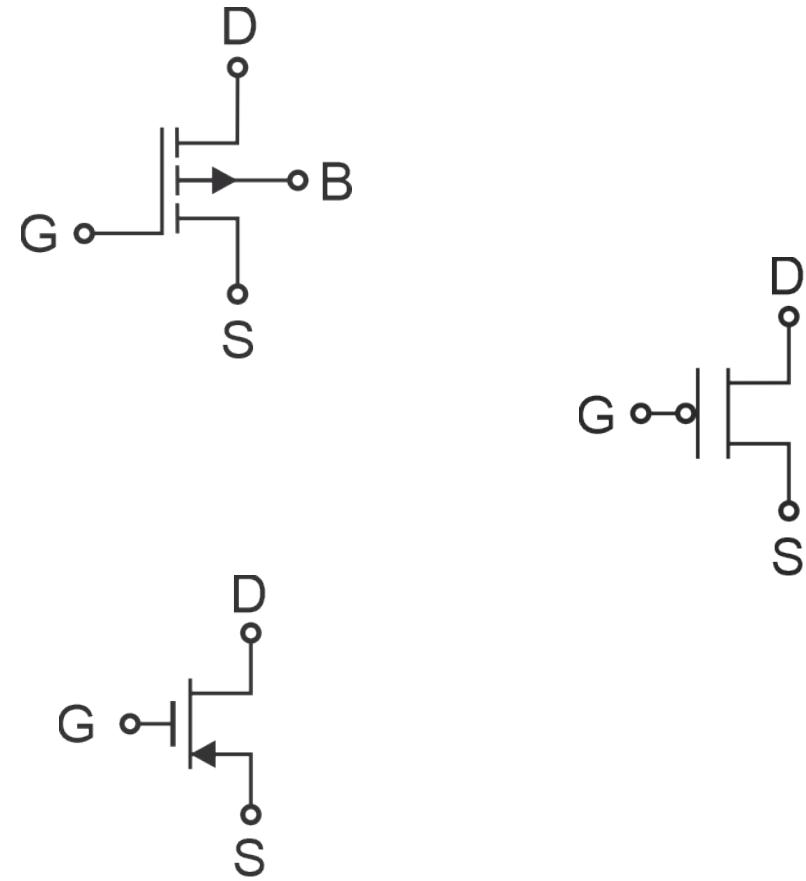
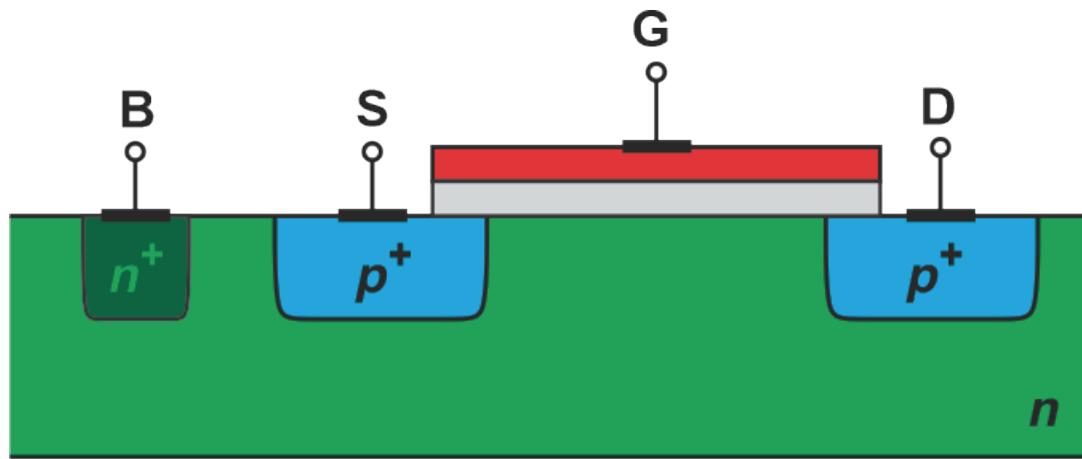
P-kanalni MOS tranzistor



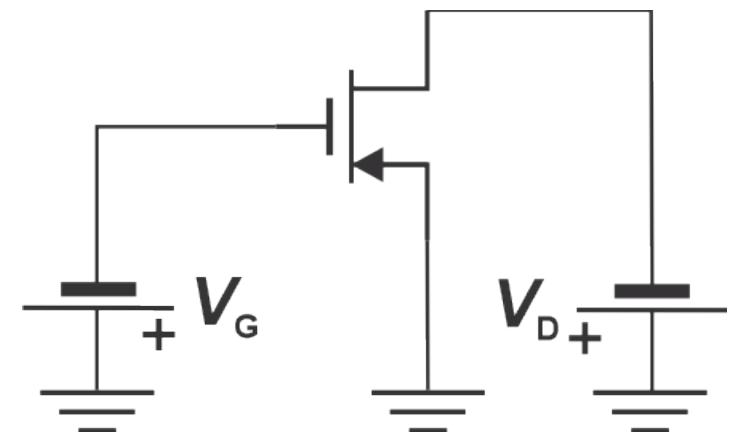
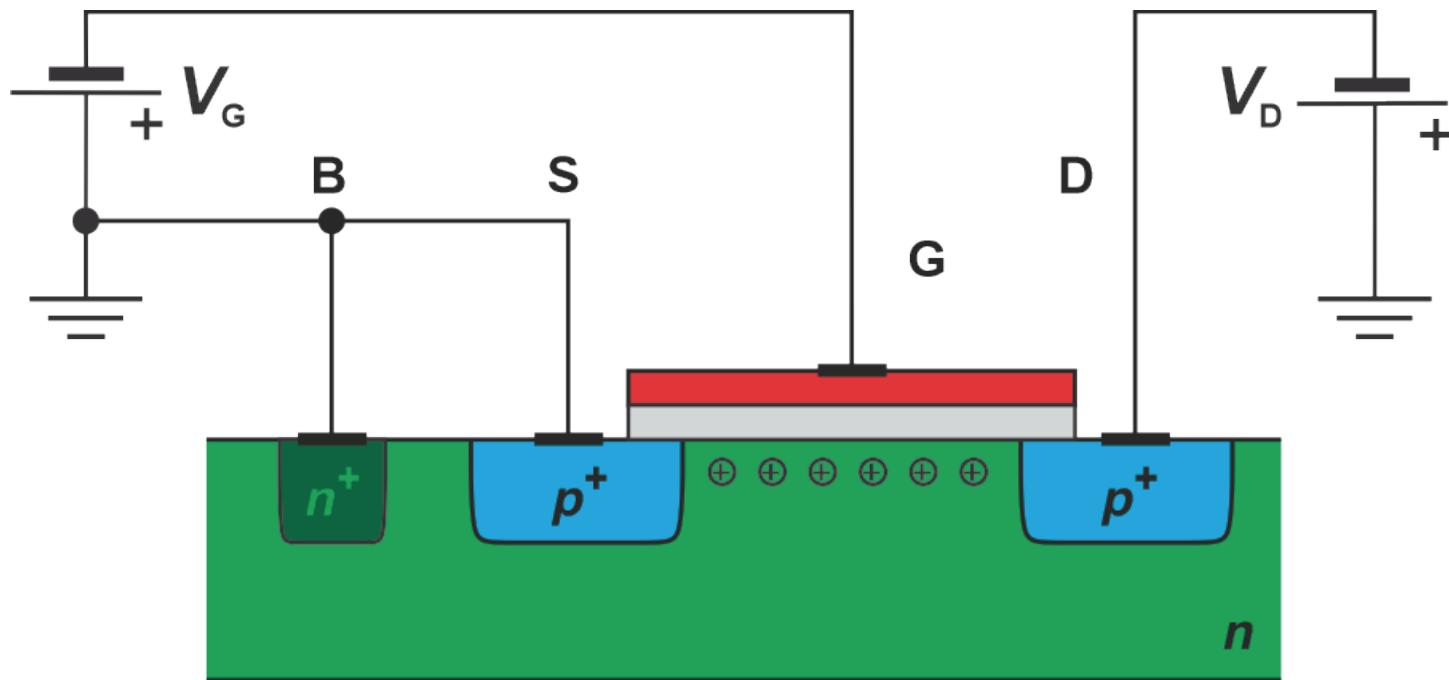
$$t_{ox} \approx 1.8 \text{ nm}, L \approx 90 \text{ nm}$$

$$C_{ox} = \epsilon_{ox} \frac{L \cdot W}{t_{ox}}$$

2D struktura MOS tranzistora i simboli (p-kanalni)



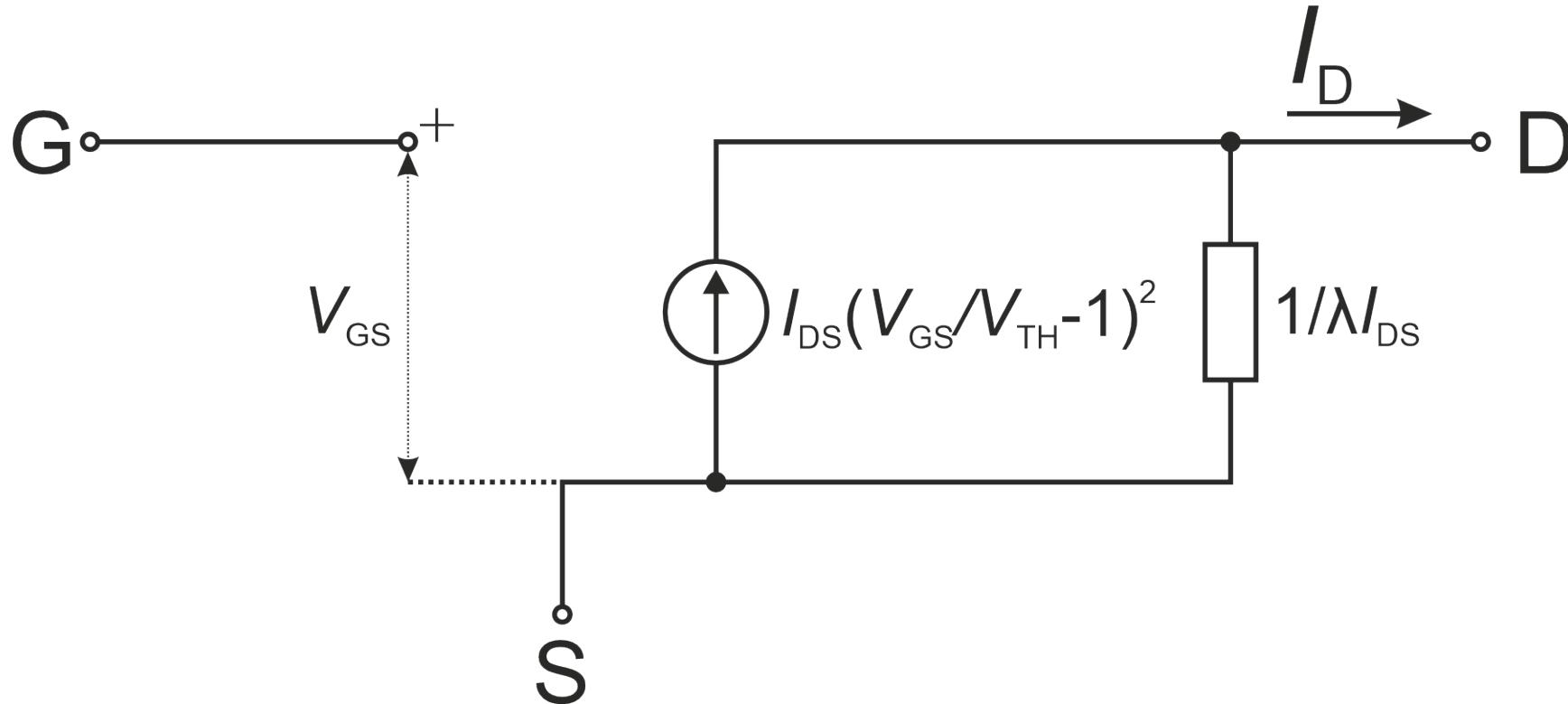
Tranzistorski efekat



- Kada je $V_D < V_S$, protiče struja drejna koja zavisi od V_D i V_G .

Model za velike signale

- Parametri modela: I_{DS} , V_{TH} , λ



Model PMOS tranzistora za male signale

$$g_m = \frac{2I_{DS}}{V_{TH}} \cdot \left(\frac{V_{GS}}{V_{TH}} - 1 \right), \quad r_o = \frac{1}{\lambda I_D}$$

