

Fakultet elektrotehnike i računarstva
Zavod za elektroniku, mikroelektroniku,
računalne i inteligentne sustave

Elektronika 1

5. Unipolarni tranzistori

Unipolarni tranzistor

Aktivni element s tri priključka

- ❑ ulazni, izlazni i zajednički priključak
- ❑ promjenom napona u ulaznom krugu upravlja se struja u izlaznom krugu
- ❑ primjena: pojačalo, sklopka
- ❑ prednost: beskonačan ulazni otpor – upravljanje bez potroška snage

Nazivi i tipovi

Nazivi

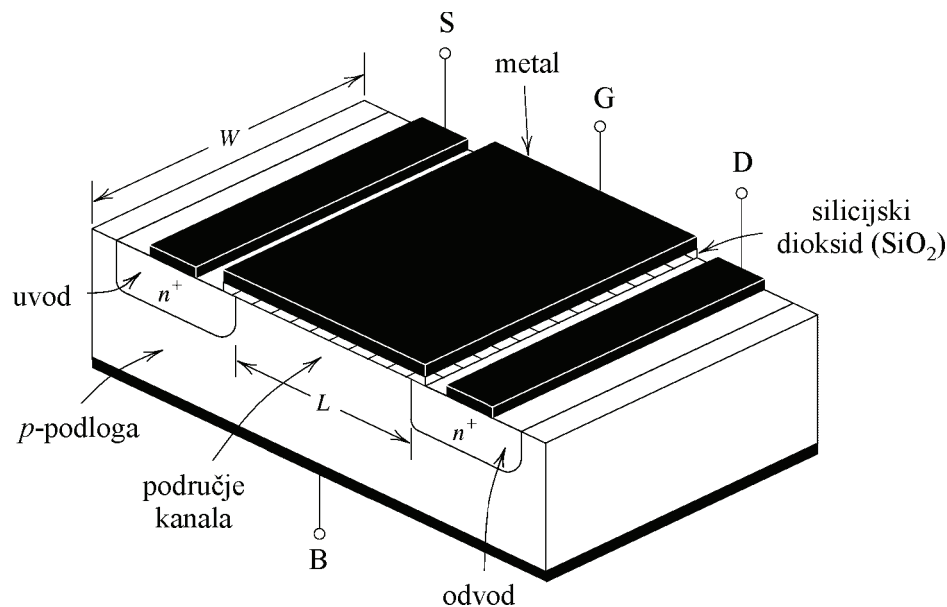
- ❑ unipolarni tranzistor – struju vodi samo jedan tip nosilaca
- ❑ tranzistor s efektom polja – električkim poljem (naponom) u ulaznom krugu modulira se poluvodički otpornik u izlaznom krugu
- ❑ FET – skraćenica engleskog naziva – Field Effect Transistor

Tipovi

- ❑ MOSFET – Metal-Oxide-Semiconductor FET
- ❑ JFET – spojni FET (od Junction FET)
- ❑ MESFET – Metal-Semiconductor FET

Struktura MOSFET-a (1)

Struktura n -kanalnog MOSFET-a obogaćenog tipa



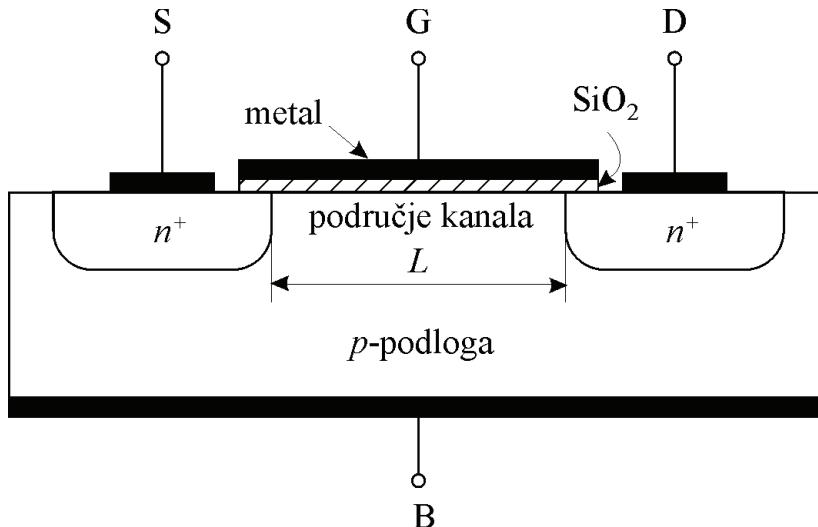
Priključci

- ☐ $uвод$ – S (engl. Source)
- ☐ $odvod$ – D (engl. Drain)
- ☐ upravljačka elektroda – G (engl. Gate)
- ☐ podloga – B (engl. Body)

Dimenzije budućeg kanala

- ☐ $L \rightarrow$ dužina
- ☐ $W \rightarrow$ širina

Struktura MOSFET-a (2)



za n -kanal $\rightarrow p$ -podloga

osnovni dio strukture - MOS

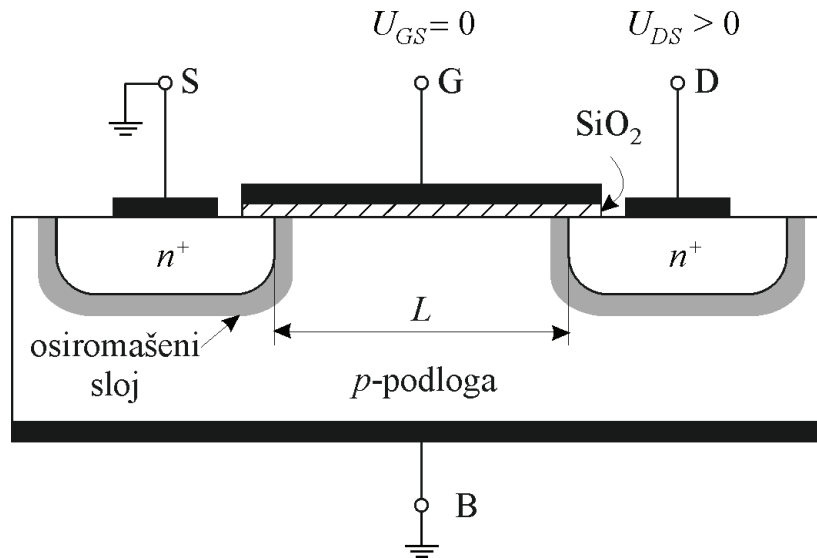
- ☐ M – metal (engl. Metal)
- ☐ O – oksid SiO₂ (engl. Oxide)
- ☐ S – poluvodič (engl. Semiconductor)

struja MOS strukture $I_G = 0$

n^+ područja – kontakti uvoda i odvoda

Podloga (B) se najčešće kratko spaja s uvodom (S)

Priključak malog napona U_{DS}

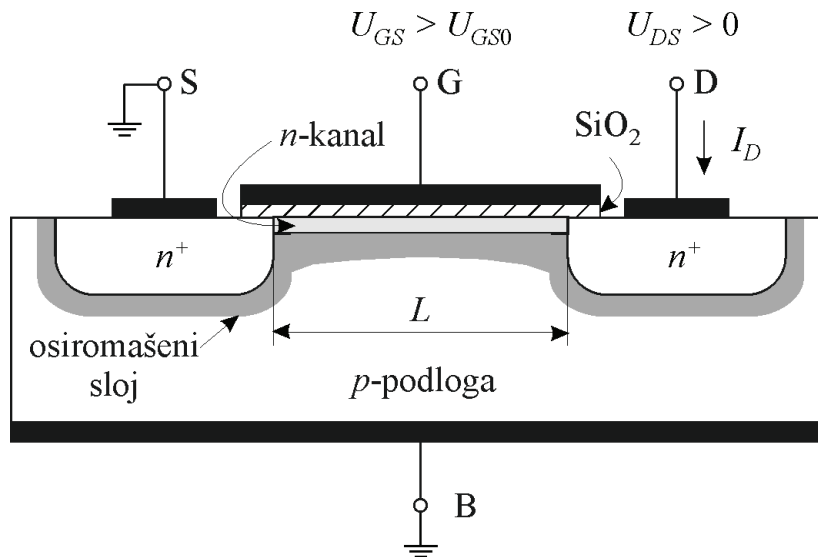


Napon $U_{DS} > 0 \rightarrow$ zaporno polarizira pn -spoj odvod-podloga

Između odvoda i uvoda ne teče struja

Uz mali $U_{DS} \rightarrow$ jednake širine osiromašenih slojeva na stranama uvoda i odvoda

Utjecaj napona U_{GS}



Napon $U_{GS} > 0$ na površinu podloge ispod oksida privlači elektrone i odbija šupljine

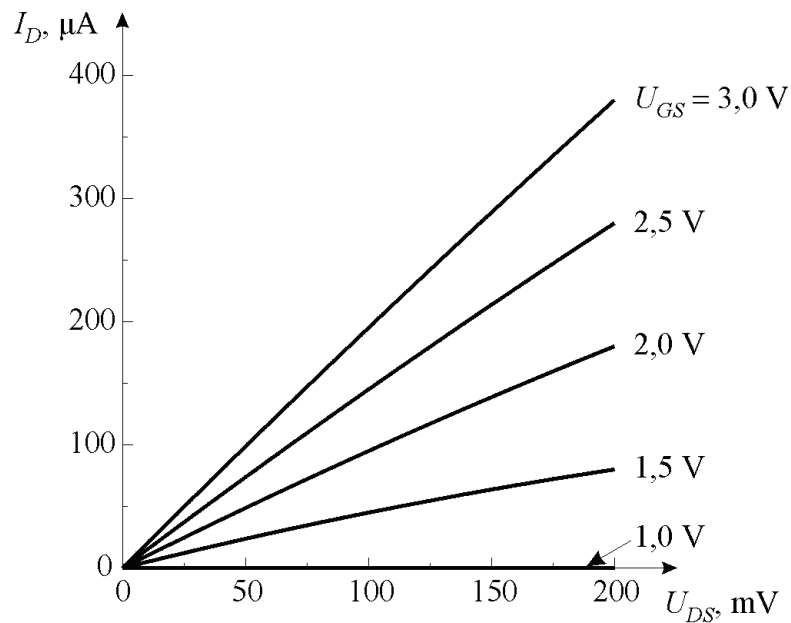
Uz dovoljno velik $U_{GS} > 0$ površina postaje n -tip → **inverzijski sloj – n -kanal**

Stvaranjem n -kanala → između uvoda i odvoda formira se poluvodički otpornik n -tipa

Granica stvaranja kanala: $U_{GS} = U_{GS0} \rightarrow$ koncentracija elektrona u kanalu jednaka je koncentraciji šupljina u podlozi

$U_{GS0} \equiv$ **napon praga**

Rad uz mali napon U_{DS}



$$U_{GS0} = 1 \text{ V}$$

Za $U_{GS} > U_{GS0}$ i za mali napon $U_{DS} > 0$ teče struja odvoda I_D

Za mali napon $U_{DS} > 0$ pad napona u kanalu je zanemariv; MOSFET je linearni otpornik

Povećanjem napona U_{GS} raste koncentracija elektrona u kanalu i vodljivost kanala; MOSFET je naponom upravljani linearni otpornik

Rad uz veći napon U_{DS}

Povećanjem napona U_{DS} nastaje pad napona u kanalu

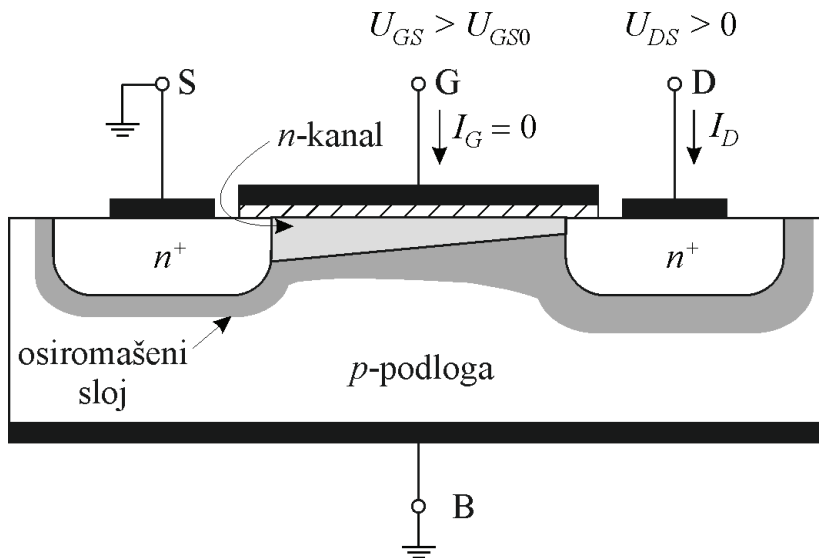
Koncentraciju elektrona u kanalu određuje:

na strani uvoda $\rightarrow U_{GS}$

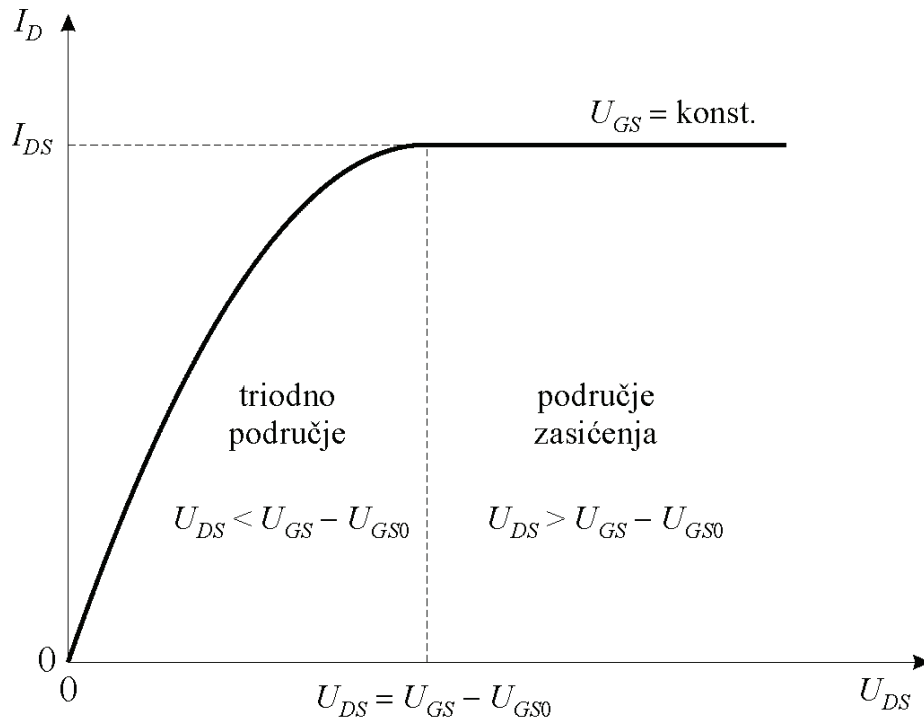
na strani odvoda $\rightarrow U_{GD} = U_{GS} - U_{DS}$

Kanal se prema odvodu sužava; otpor kanala raste

Za napon $U_{DSS} = U_{GS} - U_{GS0} \rightarrow$
 $U_{GD} = U_{GS0} \rightarrow$ kanal se na strani odvoda zatvara



Promjena struje I_D s naponom U_{DS}



Za male napone $U_{DS} \rightarrow$ struja I_D raste linearno s $U_{DS} \rightarrow$ **linearno područje**

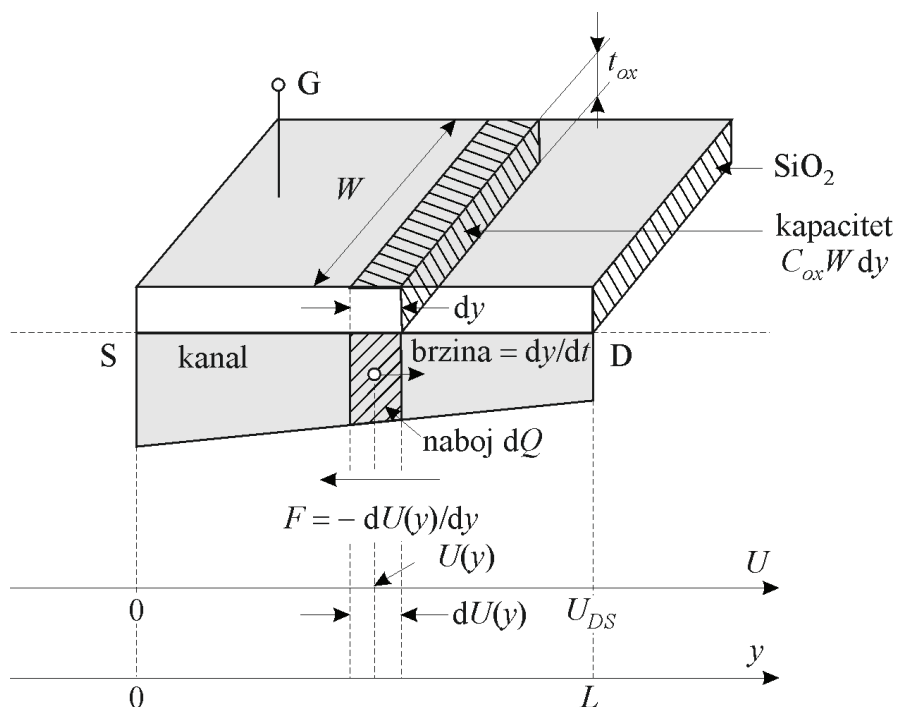
Za veće napone $U_{DS} < U_{GS} - U_{GS0} \rightarrow$ otpor kanala raste; struja I_D raste sporije s $U_{DS} \rightarrow$ **triодно područje**

Za $U_{DS} = U_{GS} - U_{GS0} \rightarrow$ kanal se zatvara; struja postiže maksimalnu vrijednost I_{DS}

Za $U_{DS} > U_{GS} - U_{GS0} \rightarrow$ kanal je zatvoren; struja ostaje konstantna $I_D = I_{DS} \rightarrow$ **područje zasićenja**

Izvod strujno-naponske karakteristike (1)

$$U_{GS} > U_{GS0}, U_{DS} < U_{GS} - U_{GS0}$$



Kapacitet oksida po jedinici površine:

$$C_{ox} = \varepsilon_{ox}/t_{ox}$$

Naboj elektrona:

$$dQ = -C_{ox}(dy \cdot W)[U_{GS} - U_{GS0} - U(y)]$$

Driftna struja:

$$I = \frac{dQ}{dt} = \frac{dQ}{dy} \frac{dy}{dt} = \frac{dQ}{dy} v(y)$$

$$v(y) = -\mu_n F(y) = \mu_n dU(y)/dy$$

$$I = -\mu_n C_{ox} W [U_{GS} - U_{GS0} - U(y)] \frac{dU(y)}{dy}$$

Struja odvoda: $I_D = -I$

Izvod strujno-naponske karakteristike (2)

Diferencijalna jednačina:

$$I_D \, dy = \mu_n C_{ox} W [U_{GS} - U_{GS0} - U(y)] \, dU(y)$$

Integriranjem po kanalu: od $y = 0$ do $y = L$; od $U(0) = 0$ do $U(L) = U_{DS}$

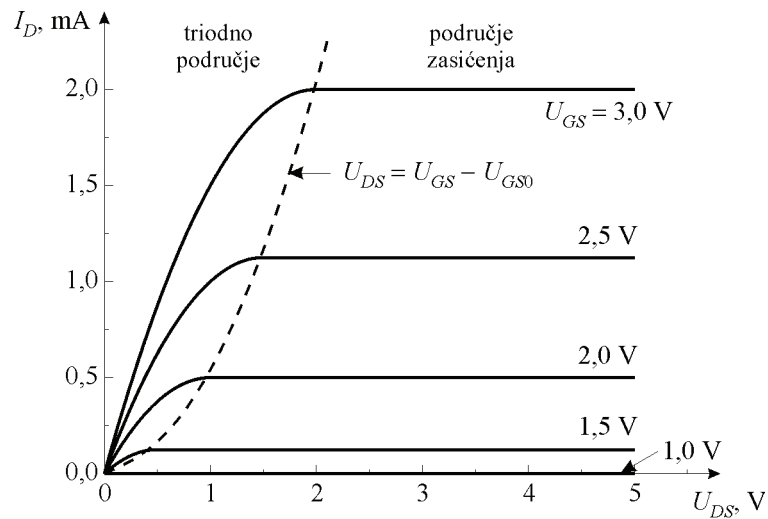
$$I_D = K \left[(U_{GS} - U_{GS0}) U_{DS} - \frac{U_{DS}^2}{2} \right] \quad \text{- struja } I_D \text{ u triodnom području}$$

$$K = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} \quad \text{- strujni koeficijent}$$

Za $U_{DS} = U_{DSS} = U_{GS} - U_{GS0}$

$$I_D = I_{DS} = \frac{K}{2} (U_{GS} - U_{GS0})^2 \quad \text{- struja } I_D \text{ u području zasićenja}$$

Izlazne karakteristike



obogaćeni tip $\rightarrow U_{GS0} = 1$ V

triодно područje

za $0 \leq U_{DS} \leq U_{GS} - U_{GS0}$

$$I_D = K \left[(U_{GS} - U_{GS0}) U_{DS} - \frac{U_{DS}^2}{2} \right]$$

područje zasićenja

za $U_{DS} \geq U_{GS} - U_{GS0}$

$$I_D = I_{DS} = \frac{K}{2} (U_{GS} - U_{GS0})^2$$

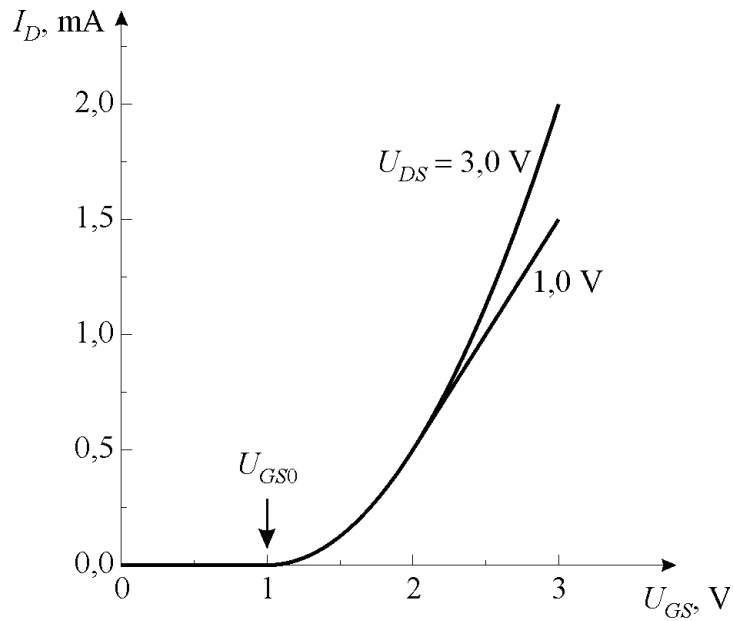
linearno područje za mali U_{DS}

$$I_D \approx K (U_{GS} - U_{GS0}) U_{DS}$$

područje zapiranja za $U_{GS} < U_{GS0}$

$$I_D = 0$$

Prijenosne karakteristike



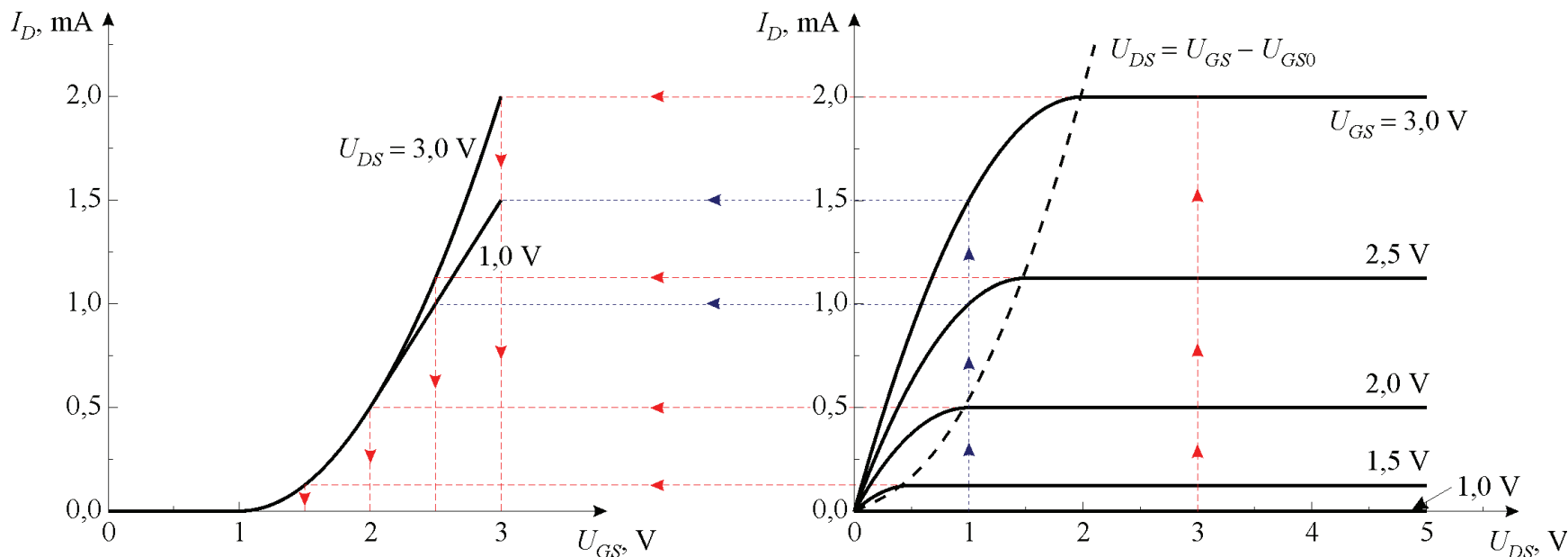
za $U_{DS} = 3$ V \rightarrow područje zasićenja

za $U_{DS} = 1$ V \rightarrow područje zasićenja
i triodno područje

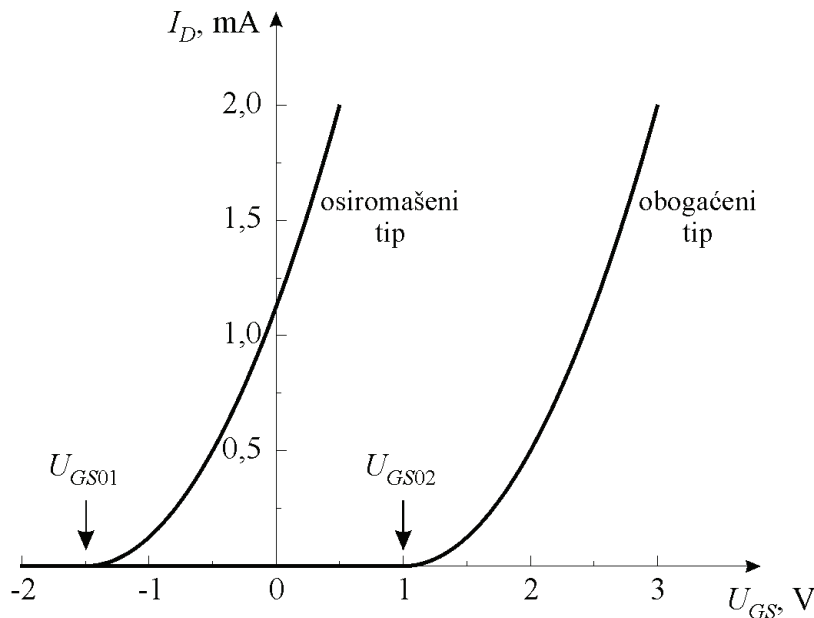
za područje zasićenja – nelinearna
prijenosna karakteristika \rightarrow
izlazne karakteristike nisu
ekvidistantne

Veza prijenosnih i izlaznih karakteristika

Prijenosne karakteristike mogu se konstruirati iz izlaznih karakteristika



Tipovi *n*-kanalnog MOSFET-a

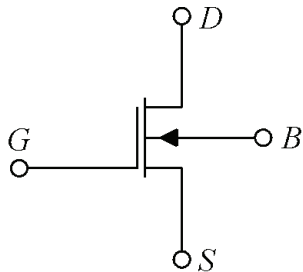


obogaćeni tip → kanal se stvara pozitivnim naponom $U_{GS} = U_{GS0}$

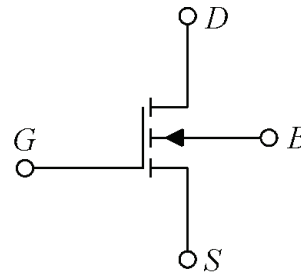
osiromašeni tip → vodi struju uz $U_{GS} = 0$ V; kanal se zatvara negativnim naponom $U_{GS} = U_{GS0}$

n-kanalni MOSFET → vodi struju uz $U_{GS} > U_{GS0}$

Električki simboli *n*-kanalnog MOSFET-a



osiromašeni tip



obogaćeni tip

puna crta između uvoda i odvoda → postojanje kanala uz $U_{GS} = 0 \text{ V}$

isprekidana crta između uvoda i odvoda → izostanak kanala uz $U_{GS} = 0 \text{ V}$

strelica → od *p*-podloge prema *n*-kanalu

Primjer 5.1 (1)

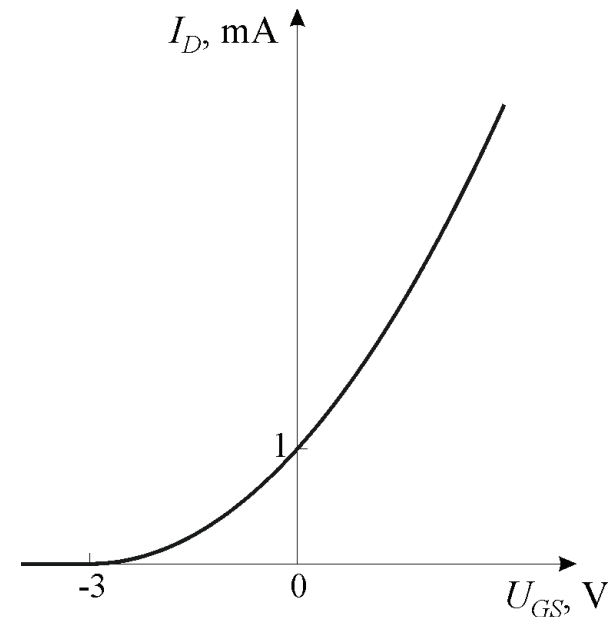
Prijenosna karakteristika MOSFET-a području zasićenja prikazana je na slici. Debljina sloja SiO_2 iznad kanala je 20 nm, a pokretljivost većinskih nosilaca u kanalu je $400 \text{ cm}^2/\text{Vs}$

- a) Koliki je omjer širine i dužine kanala W/L ?
- b) Kolika je dužina kanala L ako kapacitet upravljačke elektrode prema kanalu mora biti $C_G \leq 20 \text{ fF}$?

Rješenje:

$$\text{a) } I_D = \frac{K}{2} (U_{GS} - U_{GS0})^2$$

iz slike: za $I_D = 0 \rightarrow U_{GS} = U_{GS0} = -3 \text{ V}$, za $U_{GS} = 0 \rightarrow I_D = 1 \text{ mA}$



Primjer 5.1 (2)

$$K = \frac{2 I_D}{(U_{GS} - U_{GS0})^2} = \frac{2 \cdot 1}{(0 + 3)^2} = 0,222 \text{ mA/V}^2$$

$$K = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} = \mu_n \frac{\varepsilon_{ox}}{t_{ox}} \frac{W}{L}$$

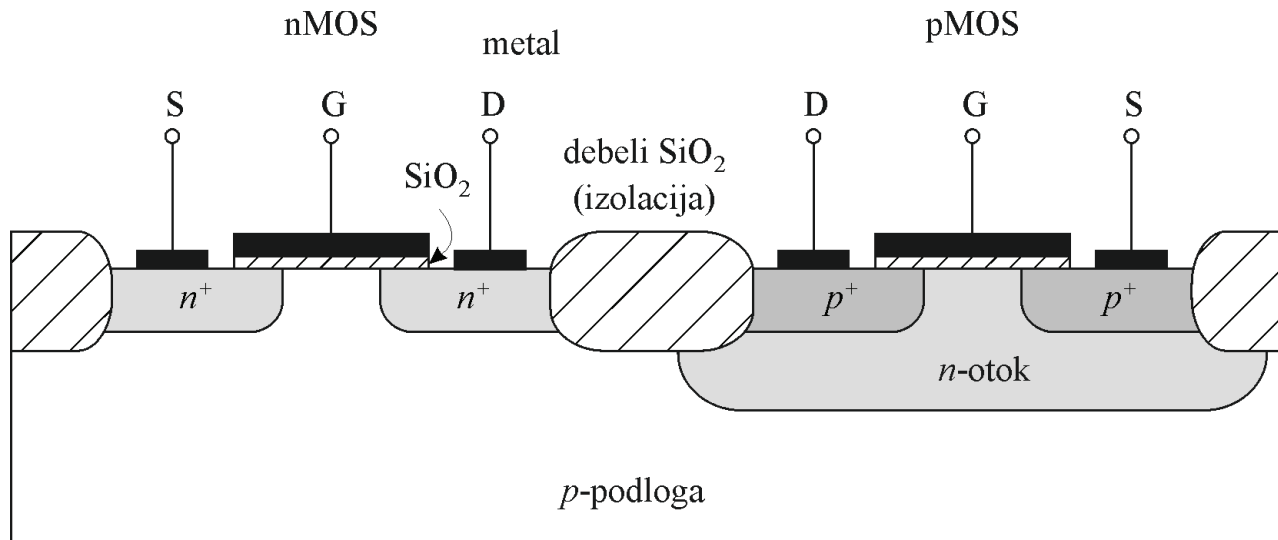
$$\frac{W}{L} = K \frac{t_{ox}}{\mu_n \varepsilon'_{ox} \varepsilon_0} = 0,222 \cdot 10^{-3} \frac{20 \cdot 10^{-7}}{400 \cdot 3,9 \cdot 8,854 \cdot 10^{-14}} = 3,22$$

$$\text{b) } C_G = C_{ox} W L \quad C_{ox} = \frac{K}{\mu_n} \frac{L}{W}$$

$$C_G = \frac{K}{\mu_n} \frac{L}{W} W L = \frac{K}{\mu_n} L^2$$

$$L = \sqrt{\frac{C_G \mu_n}{K}} = \sqrt{\frac{20 \cdot 10^{-15} \cdot 400}{0,222 \cdot 10^{-3}}} = 1,90 \text{ } \mu\text{m}$$

CMOS struktura

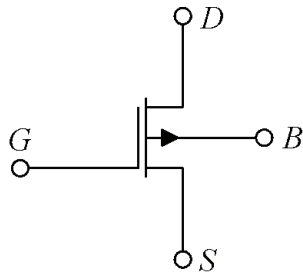


nMOS → na *p*-podlozi

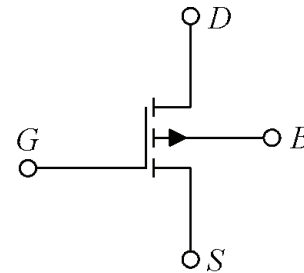
pMOS → u zasebnom *n*-otoku

Zbog električke izolacije *p*-podloga se spaja na najniži, a *n*-otok na najviši potencijal u sklopu

Električki simboli *p*-kanalnog MOSFET-a



osiromašeni tip



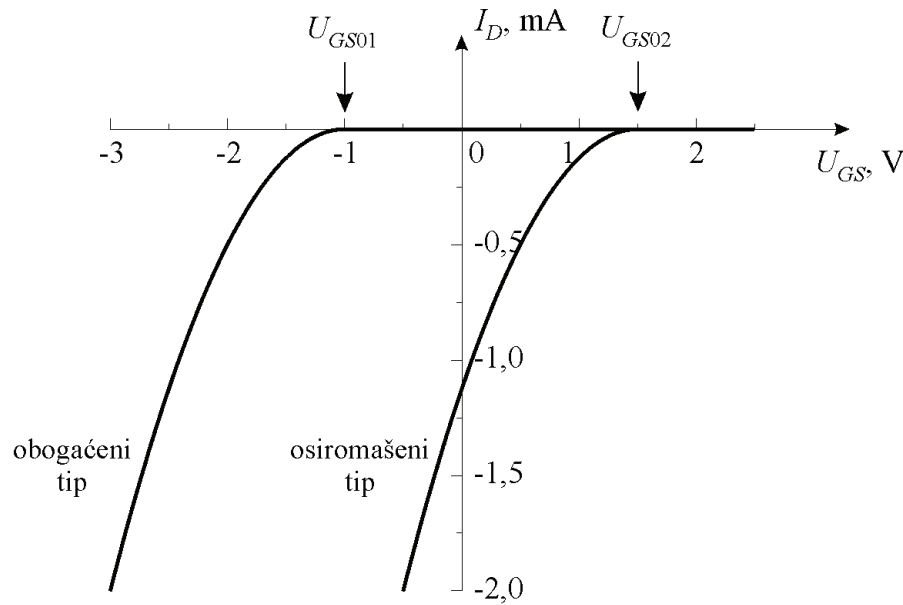
obogaćeni tip

puna crta između uvoda i odvoda → postojanje kanala uz $U_{GS} = 0 \text{ V}$

isprekidana crta između uvoda i odvoda → izostanak kanala uz $U_{GS} = 0 \text{ V}$

strelica → od *p*-kanala prema *n*-podlozi

Tipovi *p*-kanalnog MOSFET-a



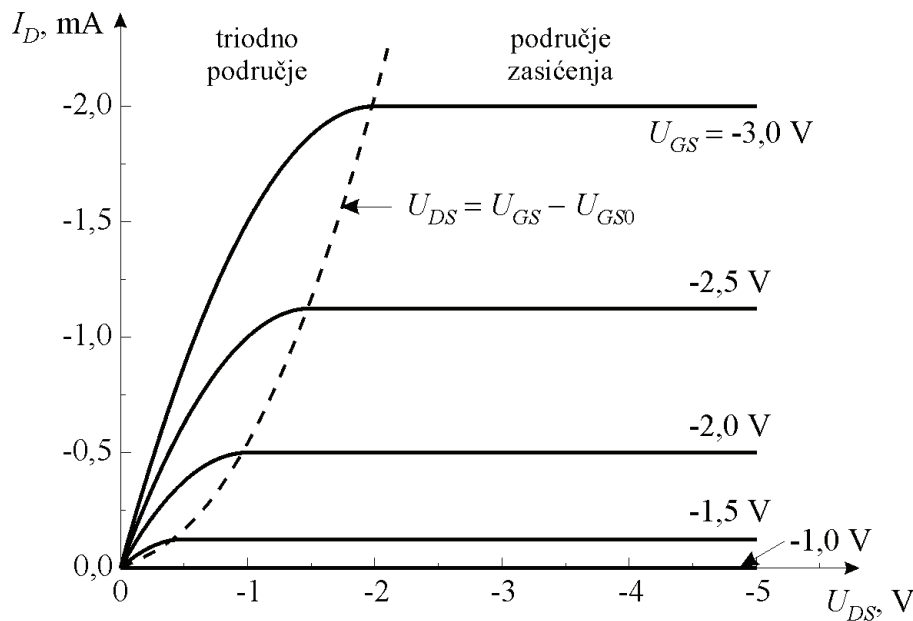
struja je I_D negativna

obogaćeni tip → kanal se stvara negativnim naponom $U_{GS} = U_{GS0}$

osiromašeni tip → vodi struju uz $U_{GS} = 0$ V; kanal se zatvara pozitivnim naponom $U_{GS} = U_{GS0}$

p-kanalni MOSFET → vodi struju uz $U_{GS} < U_{GS0}$

Izlazne karakteristike p-kanalnog MOSFETa



triодно područje

za $U_{GS} - U_{GS0} \leq U_{DS} \leq 0$

$$I_D = K \left[(U_{GS} - U_{GS0})U_{DS} - \frac{U_{DS}^2}{2} \right]$$

područje zasićenja

za $U_{DS} \leq U_{GS} - U_{GS0}$

$$I_D = \frac{K}{2} (U_{GS} - U_{GS0})^2$$

koeficijent struje

$$K = -\mu_p C_{ox} \frac{W}{L}$$

područje zapiranja za $U_{GS} > U_{GS0}$

$$I_D = 0$$

Primjer 5.2 (1)

MOSFET ima strujni koeficijent K iznosa $0,4 \text{ mA/V}^2$ i napon praga $U_{GS0} = -1 \text{ V}$. Nacrtati izlazne karakteristike ako je MOSFET

- a) n -kanalni,
- b) p -kanalni.

Rješenje:

Struja I_D

$$I_D = K \left[(U_{GS} - U_{GS0})U_{DS} - \frac{U_{DS}^2}{2} \right] \quad \text{u triodnom području}$$

$$I_D = I_{DS} = \frac{K}{2} (U_{GS} - U_{GS0})^2 \quad \text{u području zasićenja}$$

- a) Uz $U_{GS0} < 0 \rightarrow n$ -kanalni MOSFET je osiromašenog tipa; $K = + 0,4 \text{ mA/V}^2$
triодно područje za $U_{DS} < U_{GS} - U_{GS0}$
područje zasićenja za $U_{DS} > U_{GS} - U_{GS0}$

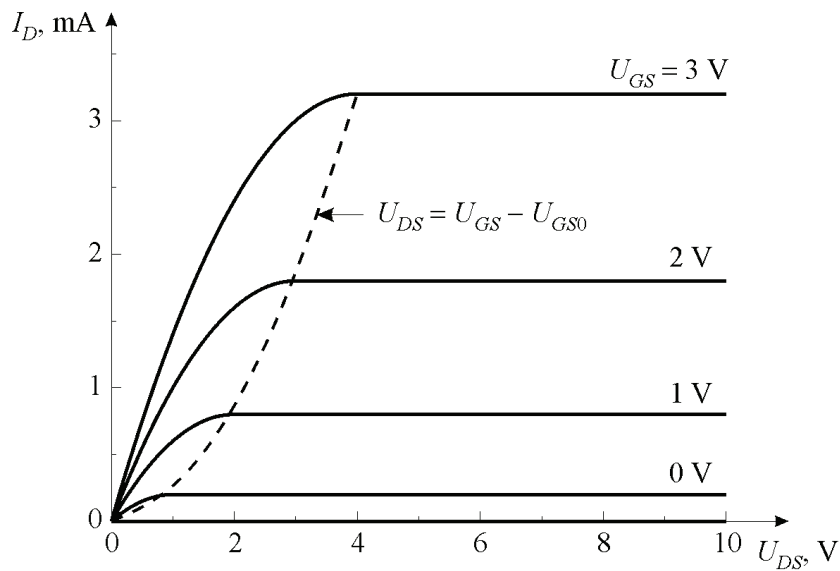
Primjer 5.2 (2)

U_{GS}, V	-1	0	1	1	3
$U_{GS} - U_{GS0}, \text{V}$	0	1	2	3	4
I_D, mA	0	0,2	0,8	1,8	3,2

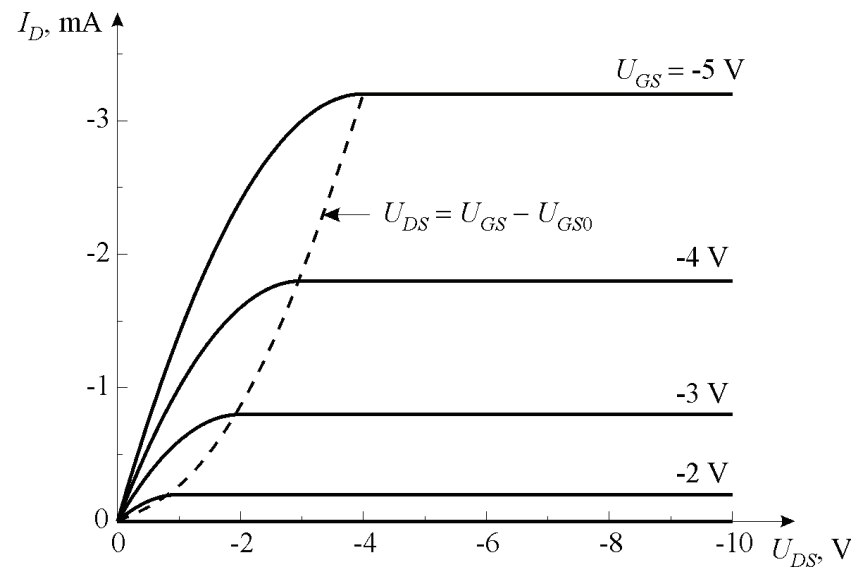
- b) Uz $U_{GS0} < 0 \rightarrow p$ -kanalni MOSFET je obogaćenog tipa; $K = -0,4 \text{ mA/V}^2$
triodno područje za $U_{DS} > U_{GS} - U_{GS0}$
područje zasićenja za $U_{DS} < U_{GS} - U_{GS0}$

U_{GS}, V	-1	-2	-3	-4	-5
$U_{GS} - U_{GS0}, \text{V}$	0	-1	-2	-3	-4
I_D, mA	0	-0,2	-0,8	-1,8	-3,2

Primjer 5.2 (3)

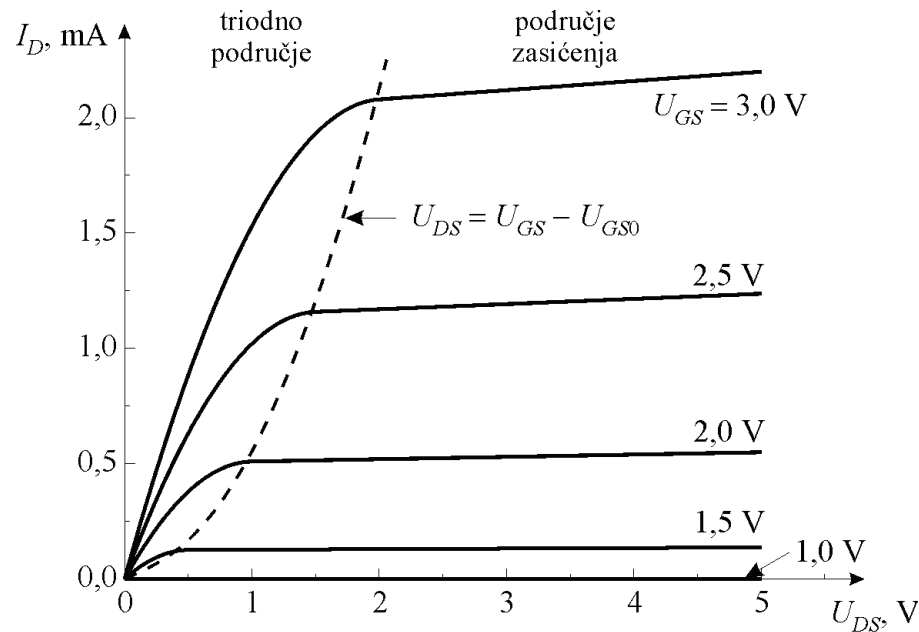


a)



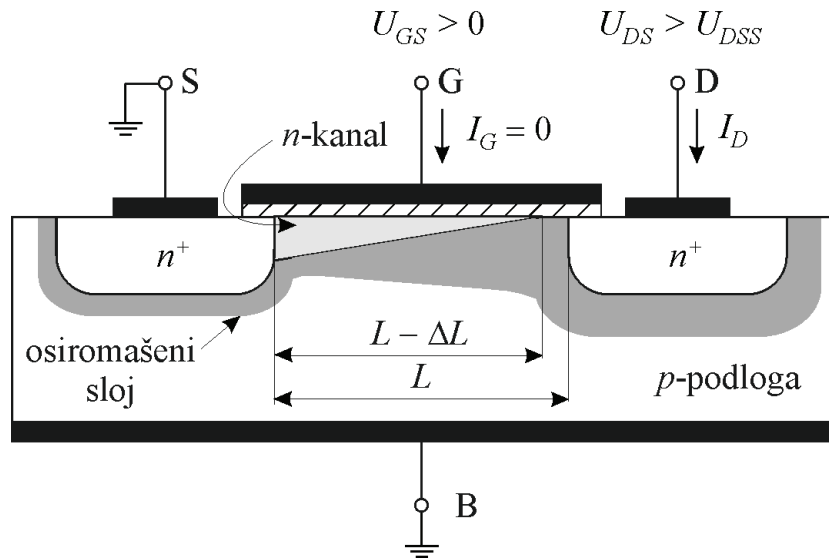
b)

Porast struje u zasićenju



n-kanalni MOSFET obogaćenog tipa →
 $U_{GS0} = 1 \text{ V}$

Modulacija dužine kanala



Točka dodira pomiče se prema uvodu

Kanal se skraćuje

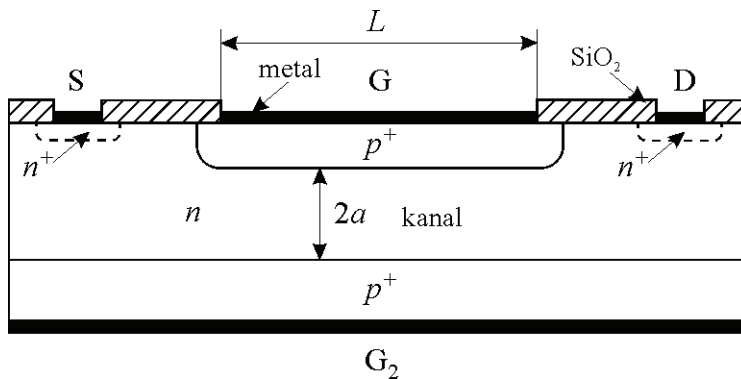
U kanalu elektroni se ubrzavaju naponom $U_{DS} = U_{DSS} = U_{GS} - U_{GS0}$

U području zasićenja struja I_D raste s naponom U_{DS}

$$I_D = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L - \Delta L} (U_{GS} - U_{GS0})^2 = I_{DS} \frac{1}{1 - (\Delta L / L)}$$

Struktura spojnog FET-a

Struktura n -kanalnog JFET-a



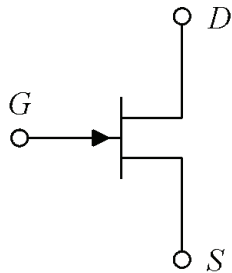
Priključci

- ☐ uvod – S
- ☐ odvod – D
- ☐ upravljačka elektroda – G
- ☐ druga upravljačka elektroda – G_2

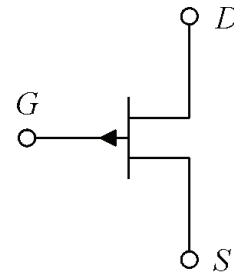
Kanal

- ☐ L – dužina
- ☐ W – širina
- ☐ $2a$ – tehnološka debljina

Električni simboli JFET-a



n-kanalni



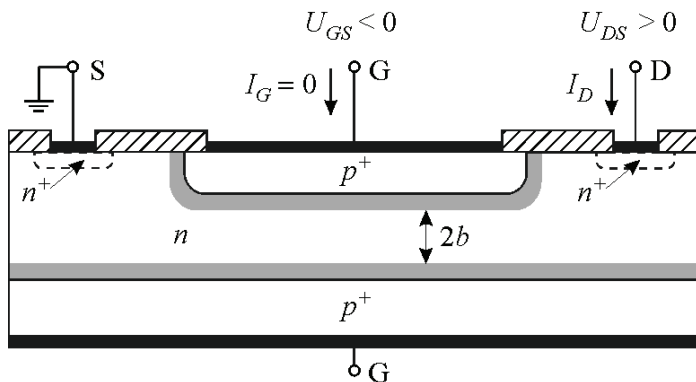
p-kanalni

strelica → od *p*-tipa prema *n*-tipu poluvodiča

za *n*-kanalni → od *p*-upravljačke elektrode prema *n*-kanalu

za *p*-kanalni → od *p*-kanala prema *n*-upravljačkoj elektrodi

Linearno područje rada



$U_{GS} < 0 \rightarrow$ zaporno polarizira pn -spoj
upravljačka elektroda-kanal

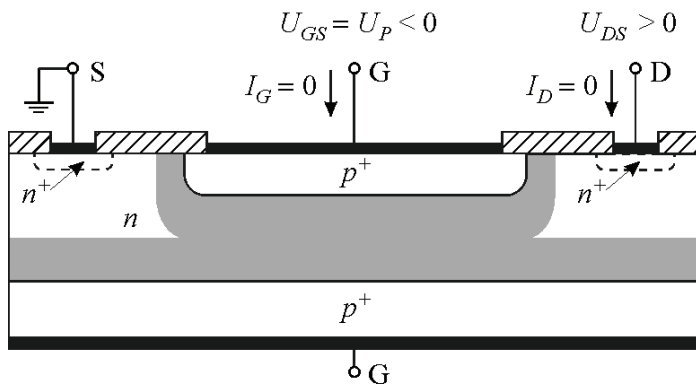
Uz mali $U_{DS} \rightarrow$ zanemariv pad napona u kanalu

Povećanjem iznosa $U_{GS} \rightarrow$ osiromašena
područja se šire; kanal se sužava

Za $U_{GS} = U_P \rightarrow$ kanal se zatvara

$U_P \equiv$ **napon dodira**

Za mali napon U_{DS} ; JFET je linearni otpornik

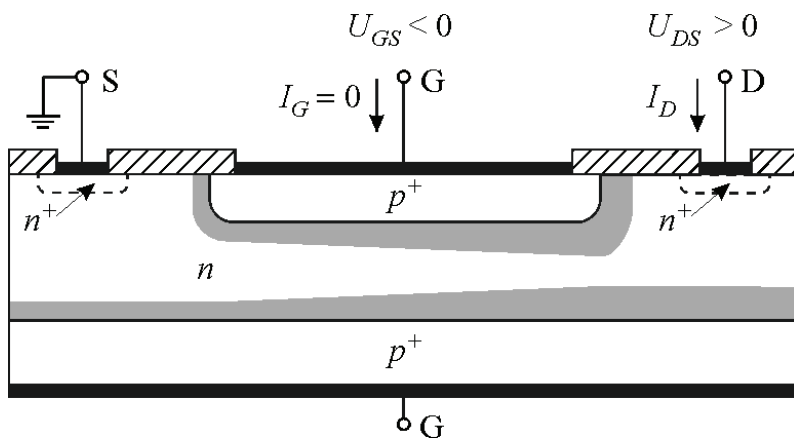


$$I_D = G_0 \left[1 - \left(\frac{U_K - U_{GS}}{U_K - U_P} \right)^{1/2} \right] U_{DS}$$

$U_K \rightarrow$ kontaktni potencijal upravljačka
elektroda-kanal

$G_0 \rightarrow$ vodljivost potpuno otvorenog kanala

Rad uz veći napon U_{DS}



Povećanjem napona U_{DS} nastaje pad napona u kanalu

pn -spoj upravljačka elektroda-kanal jače se zaporno polarizira na strani odvoda

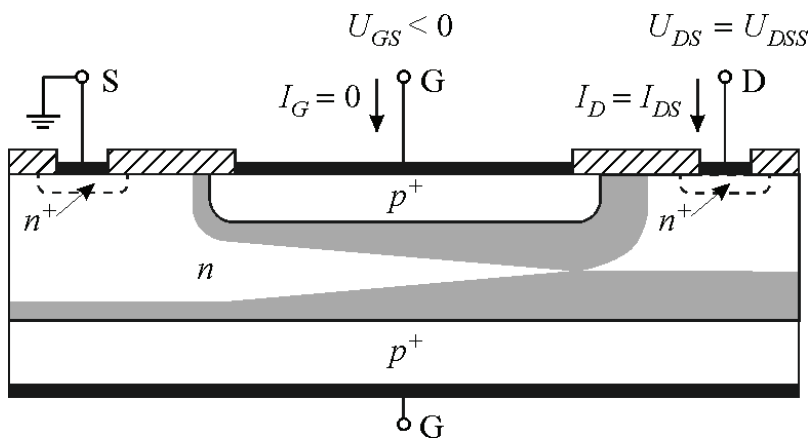
Kanal se prema odvodu sužava; otpor kanala raste

Struja I_D sve sporije raste s naponom $U_{DS} \rightarrow$ **triodno područje**

$$I_D = G_0 \frac{U_K - U_P}{3} \left\{ 3 \frac{U_{DS}}{U_K - U_P} - 2 \left[\left(\frac{U_K - U_{GS} + U_{DS}}{U_K - U_P} \right)^{3/2} - \left(\frac{U_K - U_{GS}}{U_K - U_P} \right)^{3/2} \right] \right\}$$

Struja I_D mijenja se s naponima U_{DS} i U_{GS}

Zatvaranje kanala



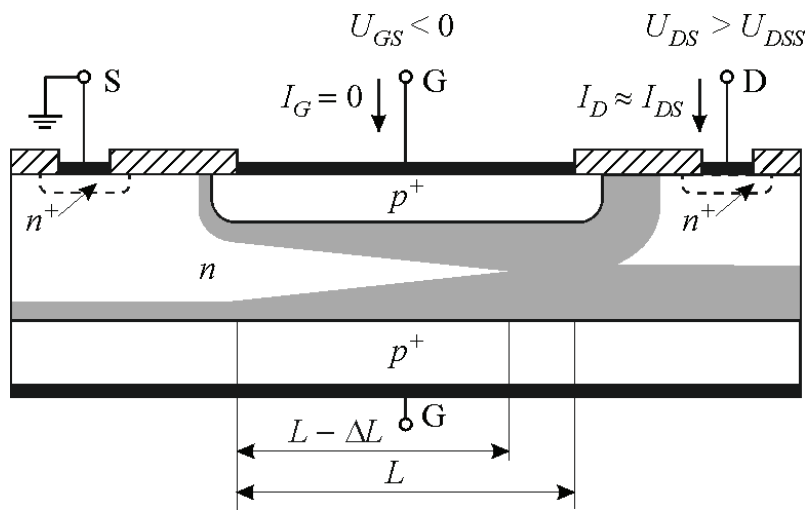
Za napon $U_{DSS} = U_{GS} - U_P \rightarrow U_{GD} = U_P$
 \rightarrow kanal se na strani odvoda
zatvara

Struja postiže maksimalnu vrijednost
 $I_D = I_{DS} \rightarrow$ područje zasićenja

$$I_D = I_{DS} = G_0 \frac{U_K - U_P}{3} \left[1 - 3 \frac{U_K - U_{GS}}{U_K - U_P} + 2 \left(\frac{U_K - U_{GS}}{U_K - U_P} \right)^{3/2} \right]$$

Struja I_D mijenja se naponom U_{GS}

Modulacija dužine kanala



Točka dodira pomiče se prema uvodu

Kanal se skraćuje

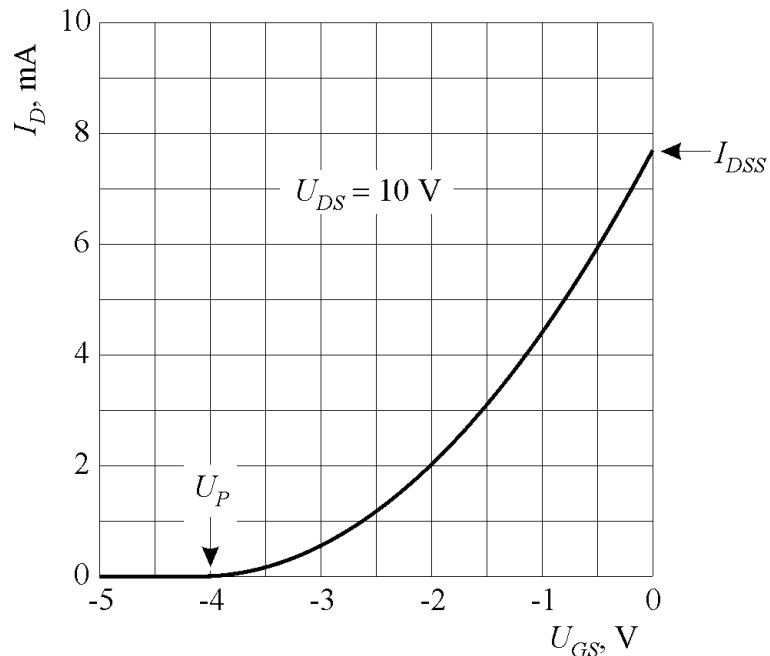
U kanalu elektroni se ubrzavaju

naponom $U_{DS} = U_{DSS} = U_{GS} - U_P$

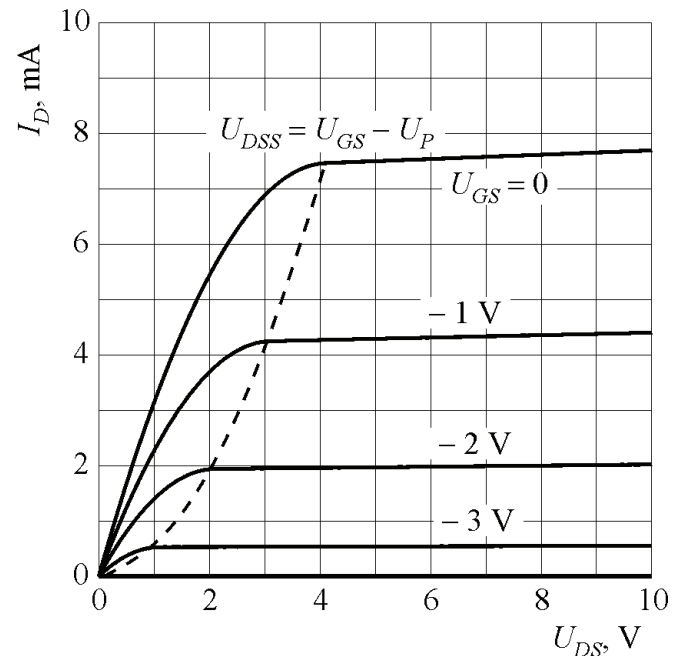
U području zasićenja struja I_D raste s naponom U_{DS}

$$I_D = I_{DS} \frac{L}{L - \Delta L}$$

Karakteristike JFET-a



prijenosna karakteristika



izlazne karakteristike

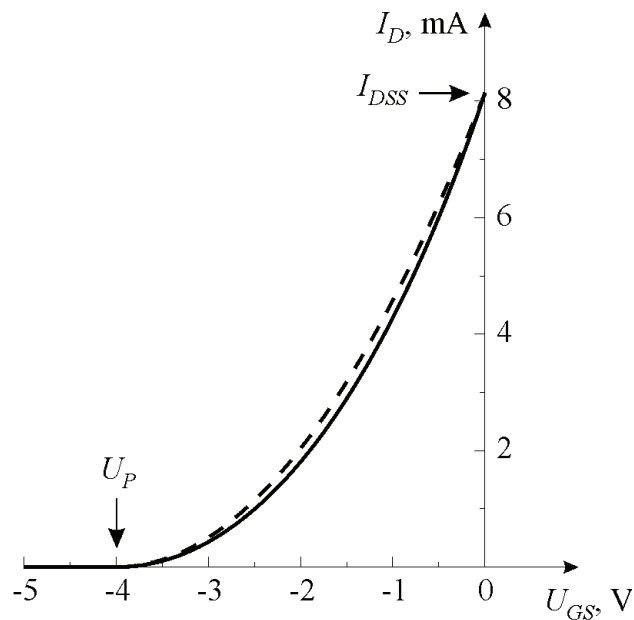
$I_{DSS} \rightarrow$ maksimalna struja JFET-a

za $U_{DS} = U_{DSS} < U_{GS} - U_P \rightarrow$ triodno područje

za $U_{DS} = U_{DSS} > U_{GS} - U_P \rightarrow$ područje zasićenja

JFET u području zasićenja

JFET se najviše koristi u pojačalima – radi u području zasićenja



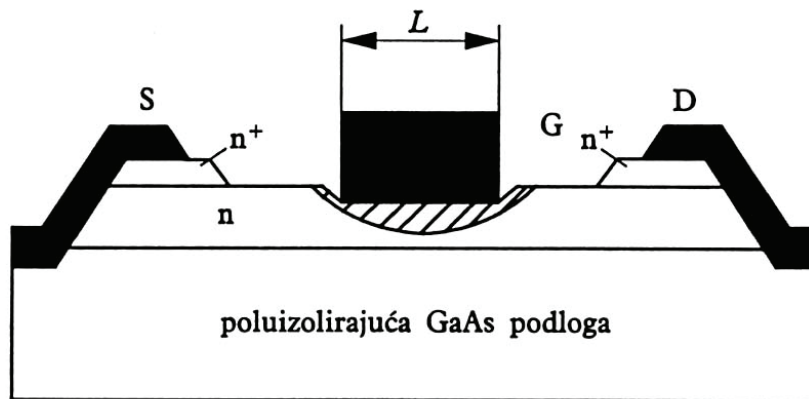
Umjesto točnog i nepraktičnog izraza u sklopovskoj analizi koristi se jednostavniji izraz

$$I_D = I_{DS} = I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_P} \right)^2$$

puna crta – točan izraz

crtkano – jednostavniji izraz

MESFET



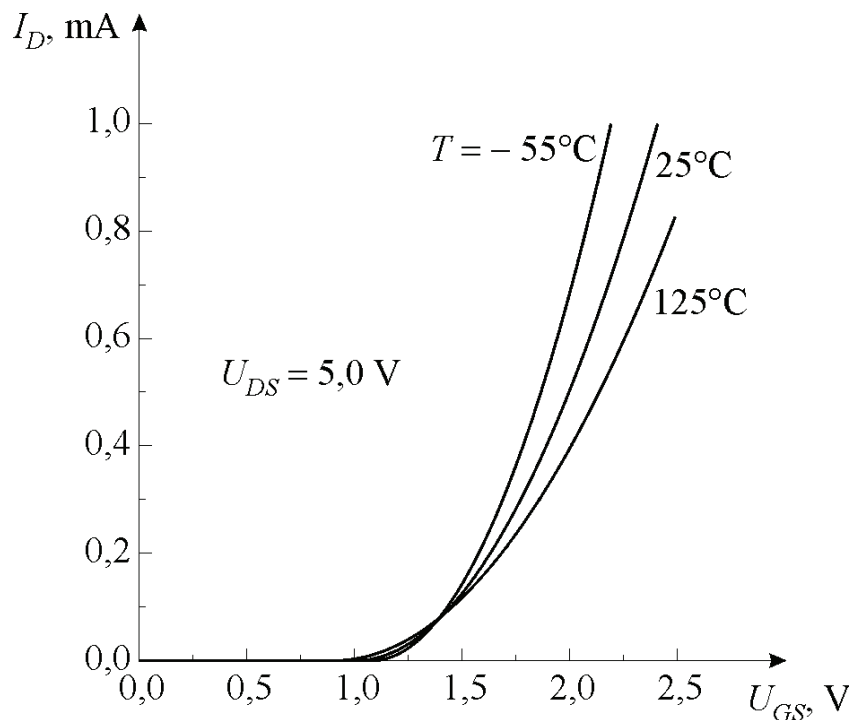
Radi se u galij-arsenidu – velika brzina rada

Sličan JFET-u

Upravljačka elektroda- kanal je ispravljački spoj metal-poluvodič

Za ispravan rad $\rightarrow U_{GS} < 0$

Temperaturna svojstva FET-ova



MOSFET – porastom temperature smanjuju se K i $U_{GS0} \rightarrow$

JFET - porastom temperature smanjuje se pokretljivost i sužavaju osiromašeni slojevi \rightarrow

Kod obje vrste FET-ova \rightarrow
porastom temperature pri manjim strujama struja I_D se povećava, a pri većim strujama se smanjuje

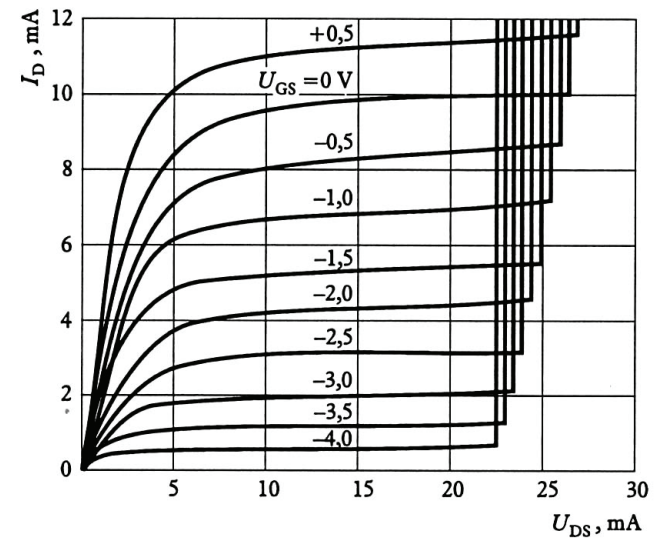
Proboji FET-ova

MOSFET

- ❑ lavinski proboj spoja odvod-podloga
- ❑ prohvati
- ❑ proboj oksida

JFET

- ❑ lavinski proboj spoja odvod-kanal;
uz probojni napon U_B proboj
nastupa uz $U_{DS} = U_B + U_{GS}$



Dinamički parametri FET-a

Opisuju odnose malih izmjeničnih veličina u režimu malog signala

Uz mali signal: $i_D = f(u_{GS}, u_{DS})$

$$di_D = \frac{\partial i_D}{\partial u_{GS}} du_{GS} + \frac{\partial i_D}{\partial u_{DS}} du_{DS} \rightarrow i_d = g_m u_{gs} + g_d u_{ds}$$

Dinamički parametri:

□ strmina

$$g_m = \left. \frac{di_D}{du_{GS}} \right|_{U_{DS} = \text{konst}} = \left. \frac{i_d}{u_{gs}} \right|_{u_{ds} = 0}$$

□ izlazna dinamička vodljivost

$$g_d = \left. \frac{di_D}{du_{DS}} \right|_{U_{GS} = \text{konst}} = \left. \frac{i_d}{u_{ds}} \right|_{u_{gs} = 0}$$

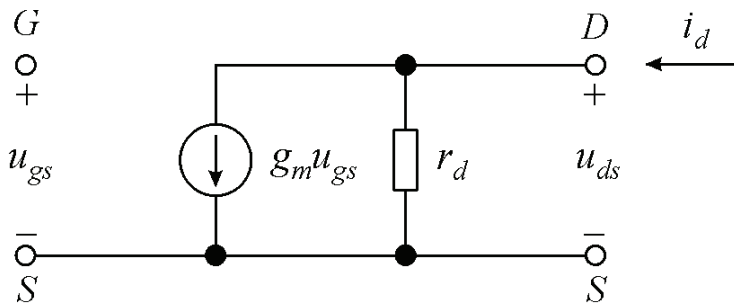
izlazni dinamički otpor

$$r_d = \frac{1}{g_d}$$

Model FET-a za mali signal

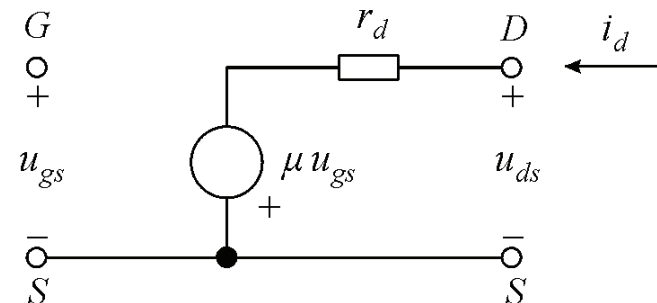
Koristi se u području zasićenja

Slijedi iz: $i_d = g_m u_{gs} + u_{ds}/r_d$



Drugi oblik

$$u_{ds} = -\mu u_{gs} + r_d i_d, \quad \mu = g_m r_d$$



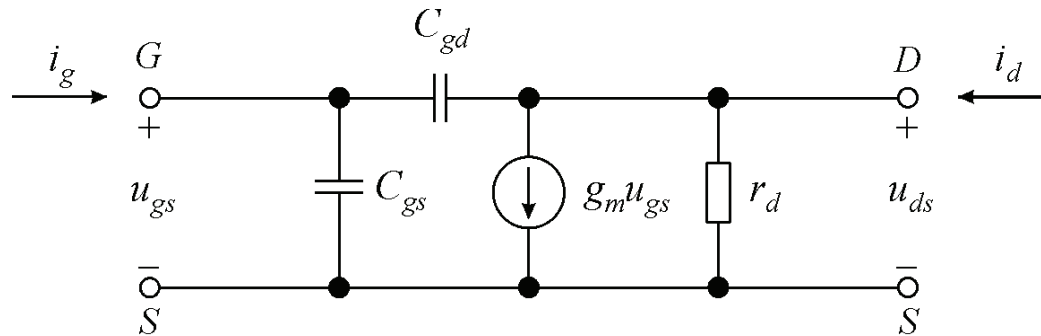
faktor naponskog pojačanja

$$\mu = - \left. \frac{du_{DS}}{du_{GS}} \right|_{I_D = \text{konst}} = - \left. \frac{u_{ds}}{u_{gs}} \right|_{u_{ds} = 0}$$

Za neopterećen izlaz $\rightarrow i_d = 0$ $u_{ds} = -g_m r_d u_{gs} = -\mu u_{gs}$

maksimalno naponsko pojačanje FET- a

Model za visoke frekvencije



Kapaciteti C_{gs} i C_{gd} :

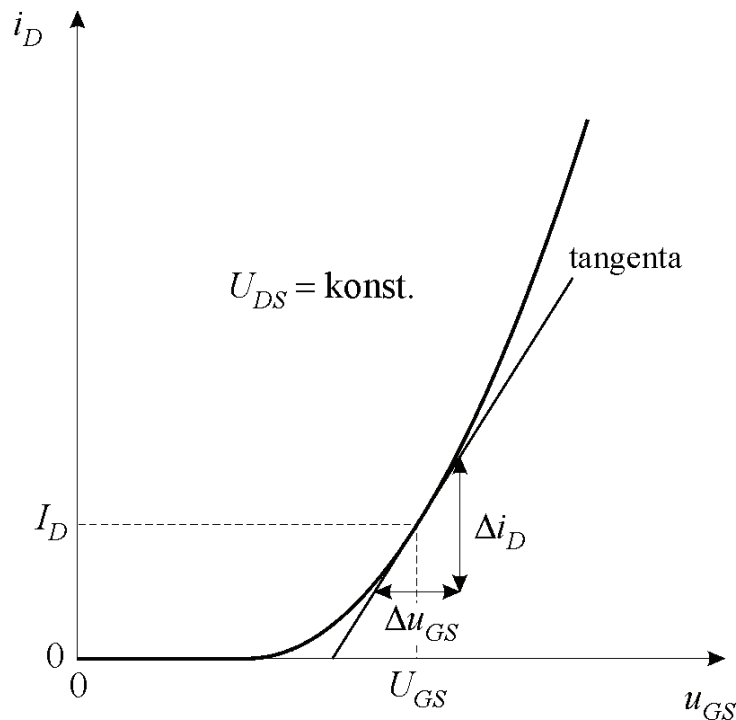
za MOSFET → kapacitet MOS strukture

za JFET → kapacitet zaporno polariziranih pn -spojeva

za MESFET → kapacitet zaporno polariziranog spoja metal-poluvodič

Grafičko određivanje dinamičkih parametara (1)

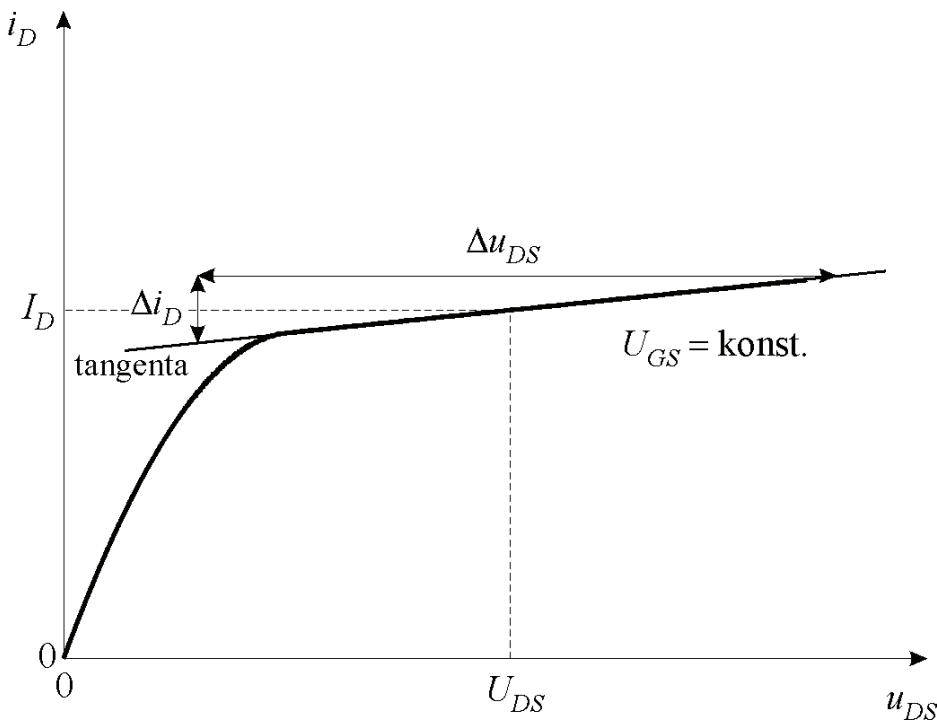
Strmina:



$$g_m = \left. \frac{\Delta i_D}{\Delta u_{GS}} \right|_{U_{DS} = \text{konst}}$$

Grafičko određivanje dinamičkih parametara (2)

Izlazni dinamički otpor:



$$r_d = \left. \frac{\Delta u_{DS}}{\Delta i_D} \right|_{U_{GS} = \text{konst}}$$

Analitičko određivanje dinamičkih parametara (1)

Strmina:

□ MOSFET

$$i_D = \frac{K}{2} (u_{GS} - U_{GS0})^2$$

$$g_m = \frac{di_D}{du_{GS}} = K (U_{GS} - U_{GS0}) = \sqrt{2K I_D}$$

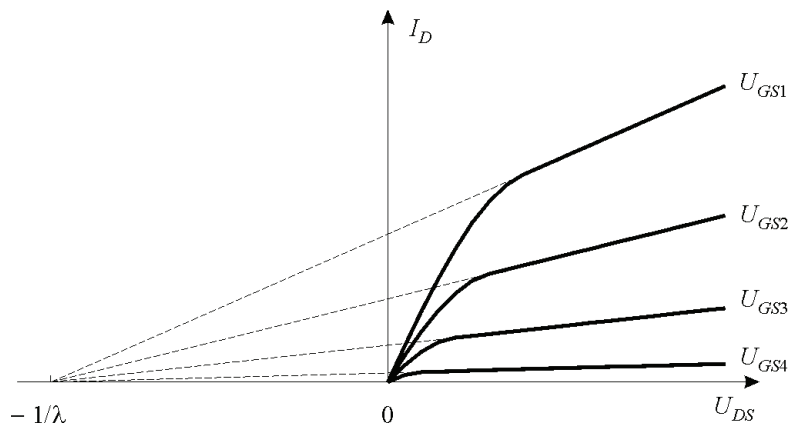
□ JFET

$$i_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{u_{GS}}{U_P} \right)^2$$

$$g_m = \frac{di_D}{du_{GS}} = \frac{2I_{DSS}}{-U_P} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_P} \right) = \frac{2}{-U_P} \sqrt{I_{DSS} I_D}$$

Analitičko određivanje dinamičkih parametara (2)

Izlazni dinamički otpor:
model nagiba izlaznih
karakteristika u području zasićenja



$$r_d = \frac{1}{g_d} \approx \frac{1}{\lambda I_D}$$

□ MOSFET

$$i_D = \frac{K}{2} (u_{GS} - U_{GS0})^2 (1 + \lambda u_{DS})$$
$$g_d = \frac{di_D}{du_{DS}} = \lambda \frac{K}{2} (U_{GS} - U_{GS0})^2 \approx \lambda I_D$$

□ JFET

$$i_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{u_{GS}}{U_P} \right)^2 (1 + \lambda u_{DS})$$
$$g_d = \frac{di_D}{du_{DS}} = \lambda I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_P} \right)^2 \approx \lambda I_D$$

Primjer 5.3 (1)

Parametri n -kanalnog MOSFET-a su konstanta $K = 80 \mu\text{A}/\text{V}^2$, napon praga $U_{GS0} = 2 \text{ V}$ i faktor modulacije dužine kanala $\lambda = 0,005 \text{ V}^{-1}$. FET radi s naponom $U_{GS} = 5 \text{ V}$. Izračunati struju odvoda I_D , strminu g_m , izlazni dinamički otpor r_d i faktor naponskog pojačanja μ uz:

- a) $U_{DS1} = (U_{GS} - U_{GS0})/2$,
- b) $U_{DS2} = 2(U_{GS} - U_{GS0})$.

Rješenje:

- a) $U_{DS1} < (U_{GS} - U_{GS0}) \rightarrow$ triodno područje

$$i_D = K \left[(u_{GS} - U_{GS0})u_{DS} - \frac{u_{DS}^2}{2} \right]$$

$$g_m = \left. \frac{di_D}{du_{GS}} \right|_{U_{DS1}} = K U_{DS1} \quad g_d = \frac{1}{r_d} = \left. \frac{di_D}{du_{DS}} \right|_{U_{GS}} = K (U_{GS} - U_{GS0} - U_{DS1})$$

Primjer 5.3 (2)

$$\mu = g_m r_d = \frac{U_{DS1}}{U_{GS} - U_{GS0} - U_{DS1}}$$

U statičkoj točki

$$U_{DS1} = (U_{GS} - U_{GS0}) / 2 = 1,5 \text{ V} \quad I_{D1} = K \left[(U_{GS} - U_{GS0}) U_{DS1} - \frac{U_{DS1}^2}{2} \right] = 0,27 \text{ mA}$$

$$g_{m1} = K U_{DS1} = 0,12 \text{ mA/V} \quad r_{d1} = \frac{1}{K (U_{GS} - U_{GS0} - U_{DS1})} = 8,33 \text{ k}\Omega$$

$$\mu_1 = \frac{U_{DS1}}{U_{GS} - U_{GS0} - U_{DS1}} = 1$$

b) $U_{DS1} > (U_{GS} - U_{GS0}) \rightarrow$ područje zasićenja

$$i_D = \frac{K}{2} (u_{GS} - U_{GS0})^2 (1 + \lambda u_{DS})$$

$$g_m = \left. \frac{di_D}{du_{GS}} \right|_{U_{DS2}} = K (U_{GS} - U_{GS0}) (1 + \lambda U_{DS2}) \quad g_d = \frac{1}{r_d} = \left. \frac{di_D}{du_{DS}} \right|_{U_{GS}} = \lambda \frac{K}{2} (U_{GS} - U_{GS0})^2$$

Primjer 5.3 (3)

$$g_d = \frac{1}{r_d} = \left. \frac{di_D}{du_{DS}} \right|_{U_{GS}} = \lambda \frac{K}{2} (U_{GS} - U_{GS0})^2 = \frac{I_{D2}}{U_{DS2} + 1/\lambda} \quad \mu = g_m r_d$$

U statičkoj točki

$$U_{DS2} = 2(U_{GS} - U_{GS0}) = 6 \text{ V} \quad I_{D2} = \frac{K}{2} (U_{GS} - U_{GS0})^2 (1 + \lambda U_{DS2}) = 0,37 \text{ mA}$$

$$g_{m2} = K (U_{GS} - U_{GS0}) (1 + \lambda U_{DS2}) = 0,24 \text{ mA/V}$$

$$r_{d2} = \frac{U_{DS2} + 1/\lambda}{I_{D2}} = 557 \text{ k}\Omega \quad \mu_2 = g_{m2} r_{d2} = 134$$

Uz pretpostavku da je $(1 + \lambda U_{DS2}) \approx 1 \rightarrow$

$$I_{D2} = 0,36 \text{ mA} \quad g_{m2} = 0,24 \text{ mA/V} \quad r_{d2} = 556 \text{ k}\Omega \quad \mu_2 = 133$$

Dinamički parametri mogu se računati i za triodno područja rada FET-a.

U pojačalima FET treba raditi u području zasićenja, jer jedino u tom području osigurava veće naponsko pojačanje.

Primjer 5.4

Napon praga p -kanalnog MOSFET-a je $U_{GS0} = -1,5$ V. Kada MOSFET radi u području zasićenja pri naponu $U_{GS} = -4$ V vodi struju od 1 mA. Koliki su napon U_{GS} i strmina g_m tog FET-a u području zasićenja uz struju od 4 mA? Zanemariti porast struje odvoda u području zasićenja.

Rješenje:

U području zasićenja: $i_D = \frac{K}{2}(u_{GS} - U_{GS0})^2$

$$K = \frac{2I_{D1}}{(U_{GS1} - U_{GS0})^2} = \frac{2 \cdot (-1 \cdot 10^{-3})}{(-4 + 1,5)^2} = -320 \mu\text{A/V}^2$$

$$g_m = K(u_{GS} - U_{GS0}) = \sqrt{2KI_D}$$

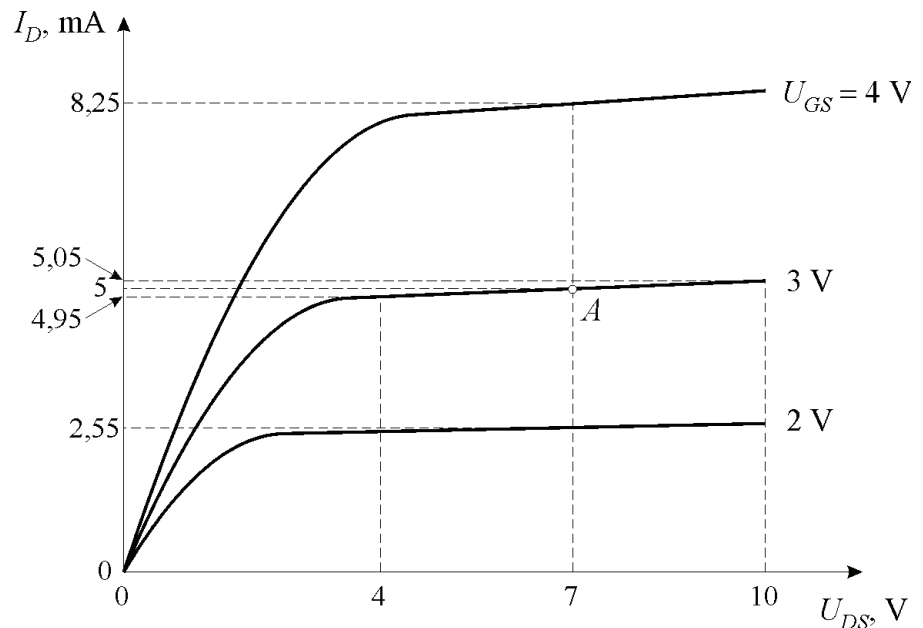
$$g_{m2} = \sqrt{2KI_{D2}} = \sqrt{2 \cdot (-320 \cdot 10^{-6}) \cdot (-4 \cdot 10^{-3})} = 1,6 \text{ mA/V}$$

$$U_{GS2} = \frac{g_{m2}}{K} + U_{GS0} = \frac{1,6 \cdot 10^{-3}}{-320 \cdot 10^{-6}} - 1,5 = -5 - 1,5 = -6,5 \text{ V}$$

Primjer 5.5 (1)

Izlazne karakteristike nekog realnog MOSFET-a, dobivene mjerenjem, prikazane su na slici.

- a) U radnoj točki A odrediti dinamičke parametre: strminu g_m , izlazni dinamički otpor r_d i faktor naponskog pojačanja μ .
- b) Odrediti parametar modulacije dužine kanala λ koji aproksimira nagib izlaznih karakteristika u području zasićenja.
- c) Korištenjem parametra λ izračunati izlazni dinamički otpor za $U_{DS} = 7 \text{ V}$ i za sva tri napona U_{GS} sa slike.



Primjer 5.5 (2)

Rješenje:

a) U točki A: $U_{GSA} = 3 \text{ V}$, $U_{DSA} = 7 \text{ V}$, $I_{DA} = 5 \text{ mA}$

Strmina:

$$g_m = \left. \frac{\Delta i_D}{\Delta u_{GS}} \right|_{U_{DS} = \text{konst}}$$

Uz $U_{DSA} = 7 \text{ V} \rightarrow I_{D1} = 2,55 \text{ mA}$ za $U_{GS1} = 2 \text{ V}$ i $I_{D2} = 8,25 \text{ mA}$ za $U_{GS2} = 4 \text{ V}$

$$g_m = \frac{I_{D2} - I_{D1}}{U_{GS2} - U_{GS1}} = \frac{8,25 - 2,55}{4 - 2} \cdot 10^{-3} = 2,85 \text{ mA/V}$$

Izlazni dinamički otpor:

$$r_d = \left. \frac{\Delta u_{DS}}{\Delta i_D} \right|_{U_{GS} = \text{konst}}$$

Uz $U_{GSA} = 3 \text{ V} \rightarrow I_{D3} = 4,95 \text{ mA}$ za $U_{DS3} = 4 \text{ V}$ i $I_{D4} = 5,05 \text{ mA}$ za $U_{DS4} = 10 \text{ V}$

$$r_d = \frac{U_{DS4} - U_{DS3}}{I_{D4} - I_{D3}} = \frac{10 - 4}{5,05 - 4,95} \cdot 10^3 = 60 \text{ k}\Omega \quad \mu = g_m r_d = 2,85 \cdot 60 = 171$$

Primjer 5.5 (3)

b) Primjenom modela za modulaciju dužine kanala

$$I_{D3} = \frac{K}{2}(U_{GS4} - U_{GS0})^2 (1 + \lambda U_{DS3}) \quad I_{D4} = \frac{K}{2}(U_{GS4} - U_{GS0})^2 (1 + \lambda U_{DS4})$$

$$\lambda = \frac{I_{D4} - I_{D3}}{I_{D3} U_{DS4} - I_{D2} U_{DS1}} = \frac{5,05 - 4,95}{4,95 \cdot 10 - 5,05 \cdot 4} = 3,41 \cdot 10^{-3} \text{ V}^{-1}$$

c) Izlazni dinamički otpor $r_d = \frac{1}{\lambda I_D}$

$$\text{za } U_{GS1} = 2 \text{ V} \rightarrow r_{d1} = \frac{1}{\lambda I_{D1}} = \frac{1}{3,41 \cdot 10^{-3} \cdot 2,55} = 115 \text{ k}\Omega$$

$$\text{za } U_{GS4} = 3 \text{ V} \rightarrow r_{d4} = \frac{1}{\lambda I_{D4}} = \frac{1}{3,41 \cdot 10^{-3} \cdot 5} = 58,7 \text{ k}\Omega$$

$$\text{za } U_{GS2} = 4 \text{ V} \rightarrow r_{d2} = \frac{1}{\lambda I_{D2}} = \frac{1}{3,41 \cdot 10^{-3} \cdot 8,25} = 35,6 \text{ k}\Omega$$