

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

Elektronika 1

Ž. Butković, J. Divković Pukšec, A. Barić

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

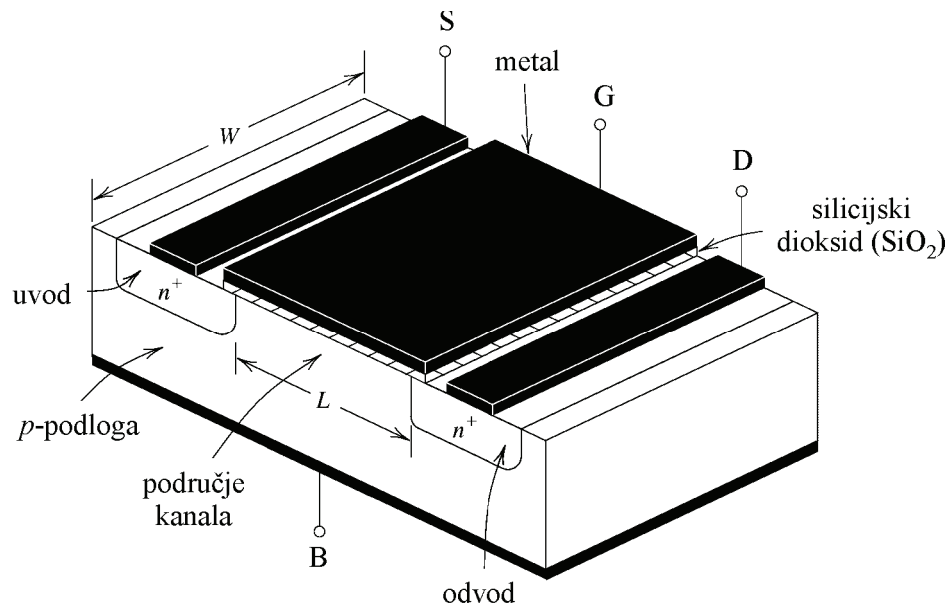
- ❑ unipolarni tranzistor – struju vodi samo jedan tip nosilaca
- ❑ tranzistor s efektom polja – električkim poljem (naponom) u ulaznom krugu modulira se poluvodički otpornik u izlaznom krugu
- ❑ FET – skraćenica engleskog naziva – Field Effect Transistor

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



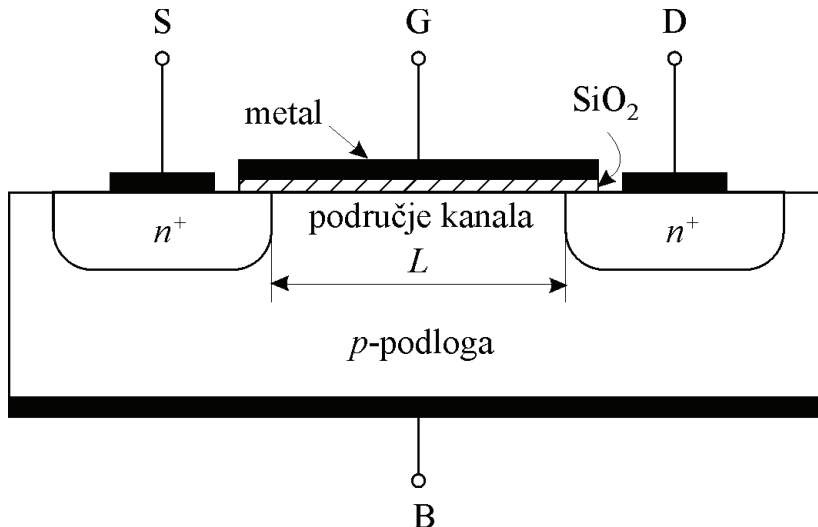
Priključci

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

Dimenzije budućeg kanala

- ☐ *L* → dužina
- ☐ *W* → širina

Struktura MOSFET-a (2)



za n -kanal $\rightarrow p$ -podloga

osnovni dio strukture - MOS

□ **M** – metal (engl. Metal)

□ **O** – oksid SiO_2
(engl. Oxide)

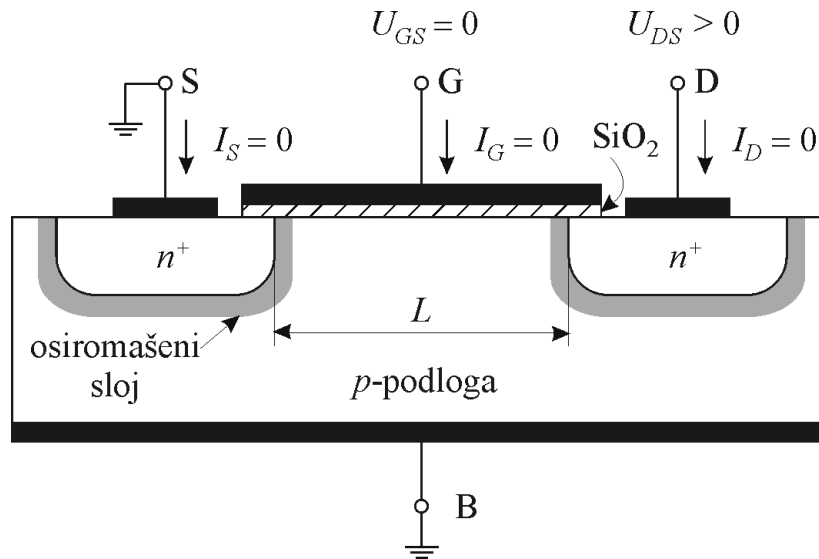
□ **S** – poluvodič
(engl. Semiconductor)

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}

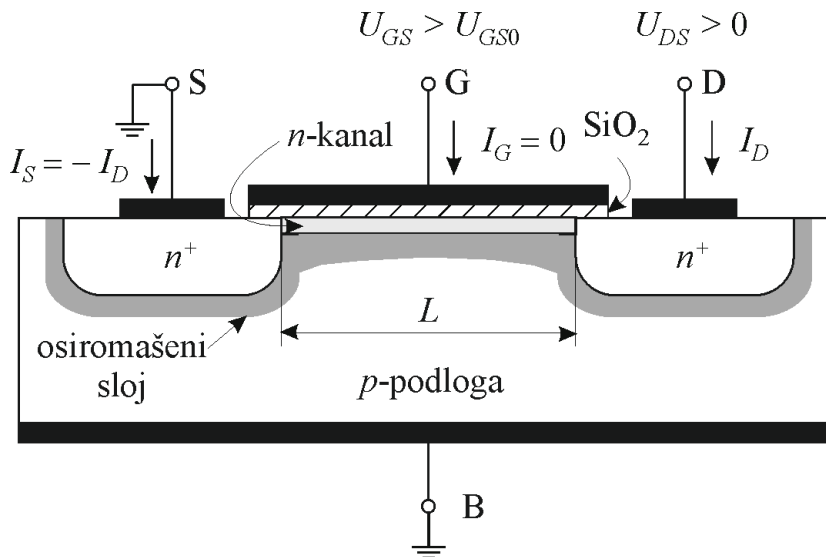


Napon $U_{DS} > 0 \rightarrow$ zaporno polarizira pn -spoj odvod-podloga

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} – formiranje kanala



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

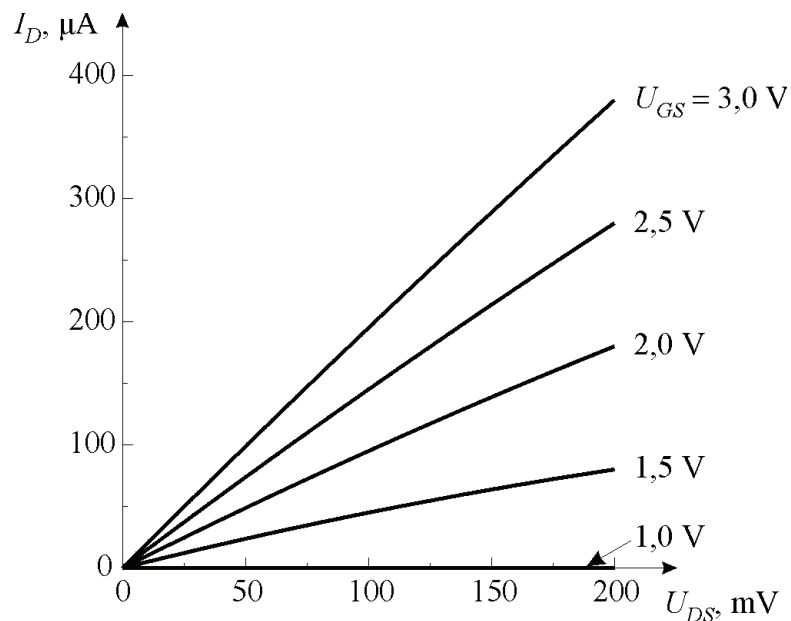
Uz dovoljno velik $U_{GS} > 0$ površina postaje n -tip → **inverzijski sloj – n -kanal**

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} – sužavanje kanala

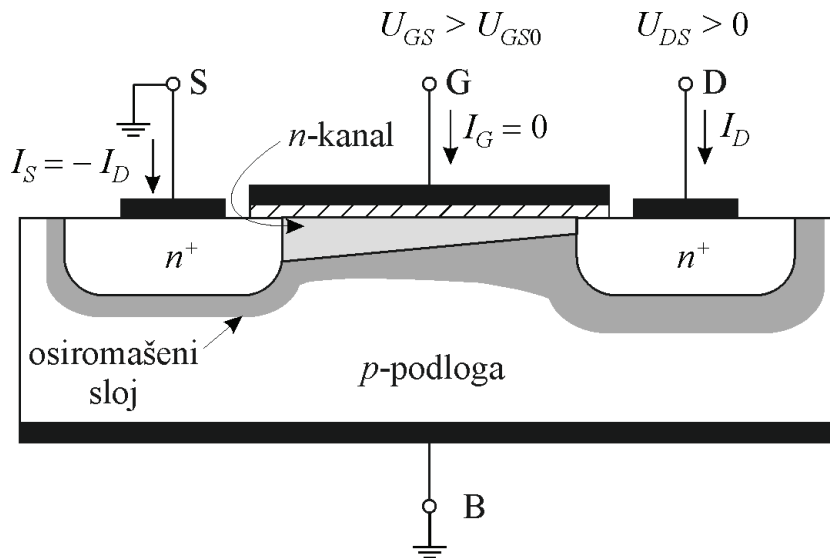
Povećanjem napona U_{DS} nastaje pad napona u kanalu

Koncentraciju elektrona u kanalu određuje:

na strani uvoda $\rightarrow U_{GS}$

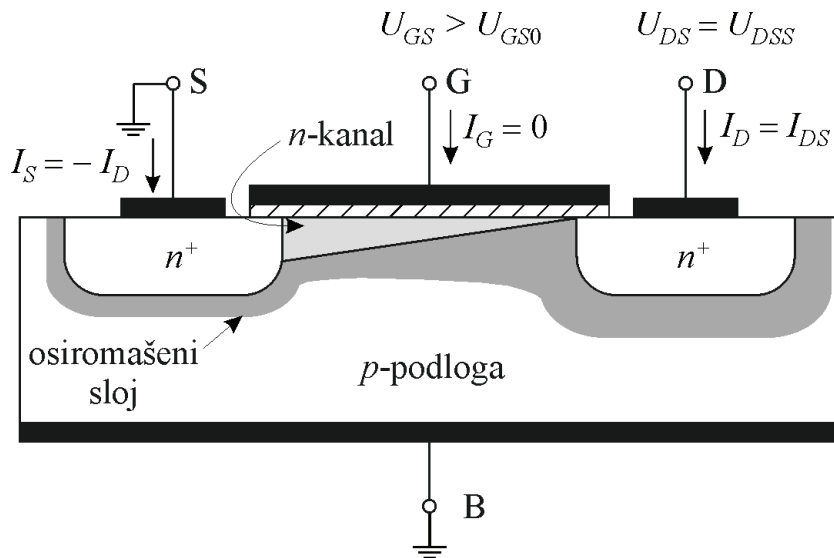
na strani odvoda $\rightarrow U_{GD} = U_{GS} - U_{DS}$

Kanal se prema odvodu sužava \rightarrow otpor kanala raste

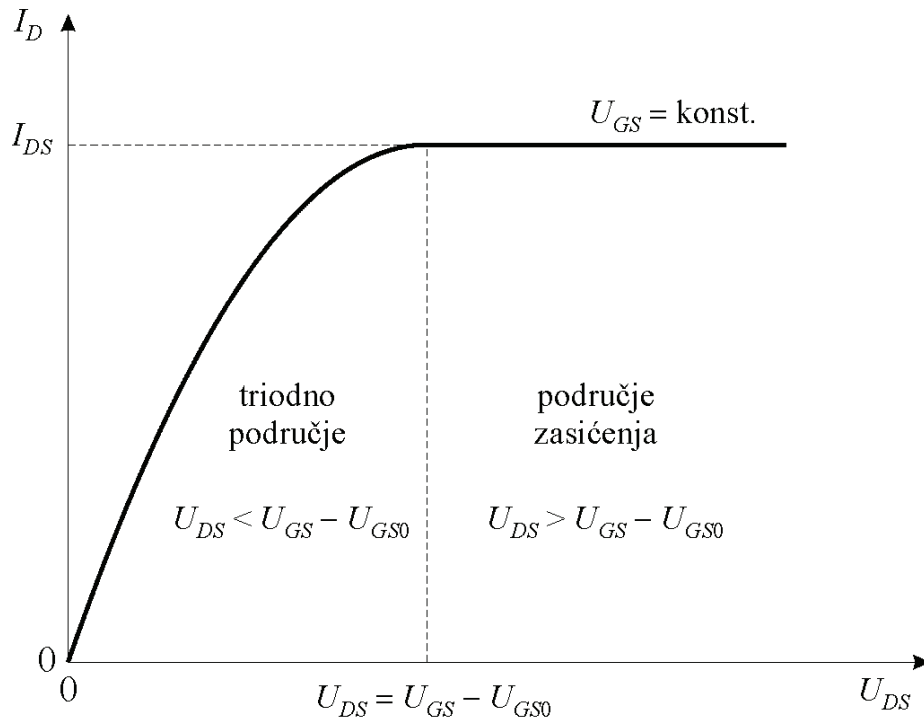


Rad uz veći napon U_{DS} – zatvaranje kanala

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

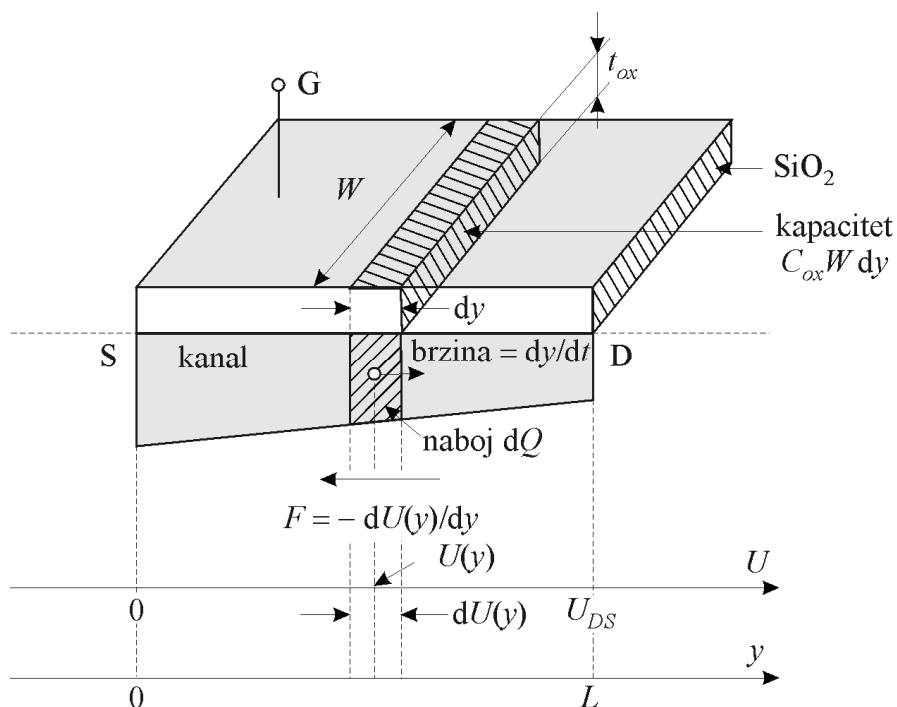
Za veće napone $U_{DS} < U_{GS} - U_{GS0} \rightarrow$ otpor kanala raste; struja I_D raste sporije s $U_{DS} \rightarrow$ **triодно područje**

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:

$$I_{Fn} = \frac{dQ}{dt} = \frac{dQ}{dy} \frac{dy}{dt} = \frac{dQ}{dy} v_{dn}(y)$$

$$v_{dn}(y) = -\mu_n F(y) = \mu_n dU(y)/dy$$

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

Struja odvoda: $I_D = -I_{Fn}$

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 $U(L) = U_{DS}$

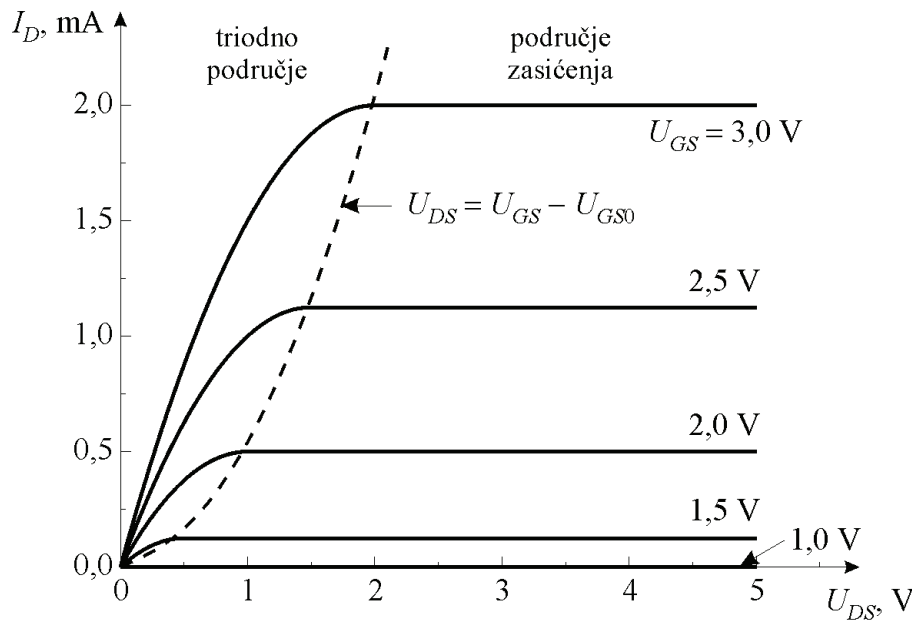
$$I_D = K \left[(U_{GS} - U_{GS0}) U_{DS} - \frac{U_{DS}^2}{2} \right] \rightarrow \text{struja } I_D \text{ u triodnom području}$$

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

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

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

Izlazne karakteristike



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

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

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

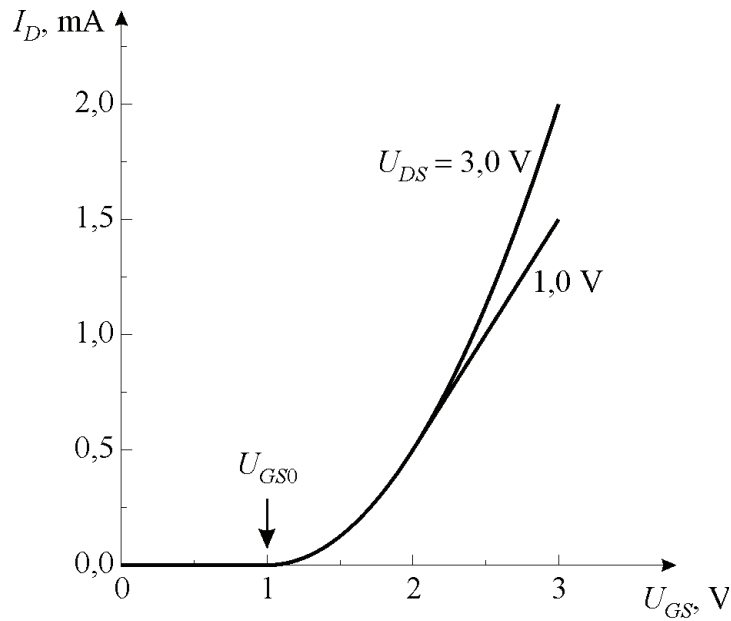
linearno područje za mali U_{DS}

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

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

$$I_D = 0$$

Prijenosne karakteristike



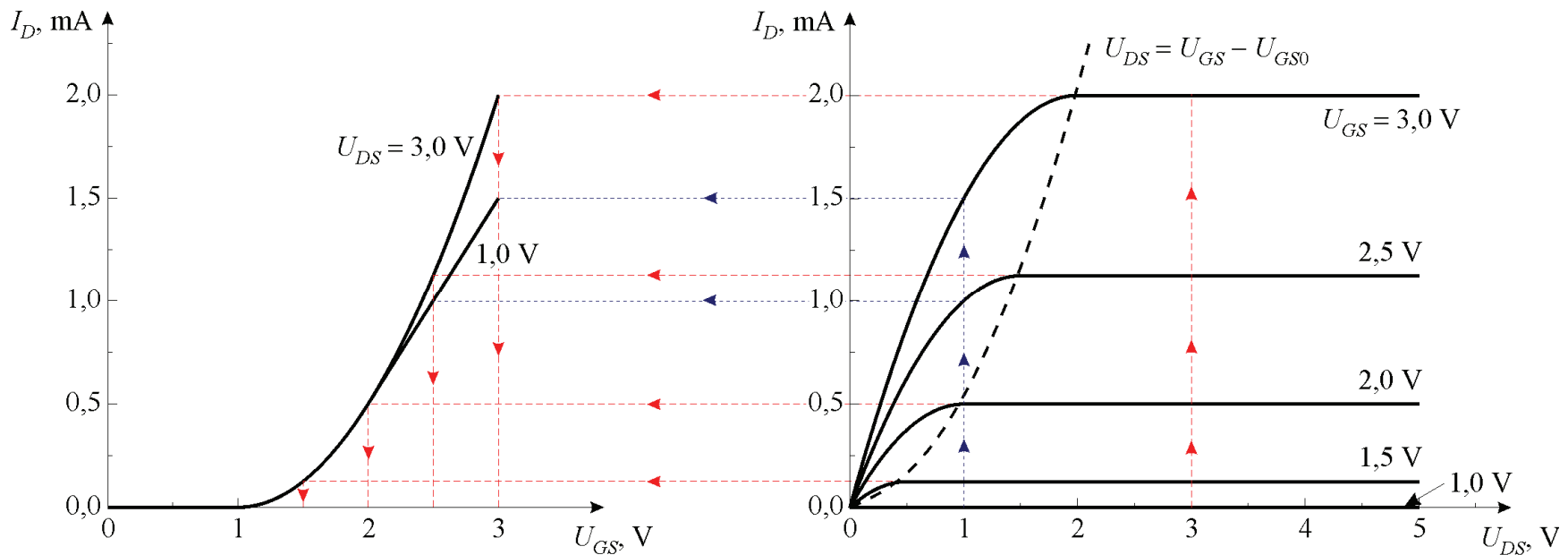
za $U_{DS} = 3$ V \rightarrow područje zasićenja

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

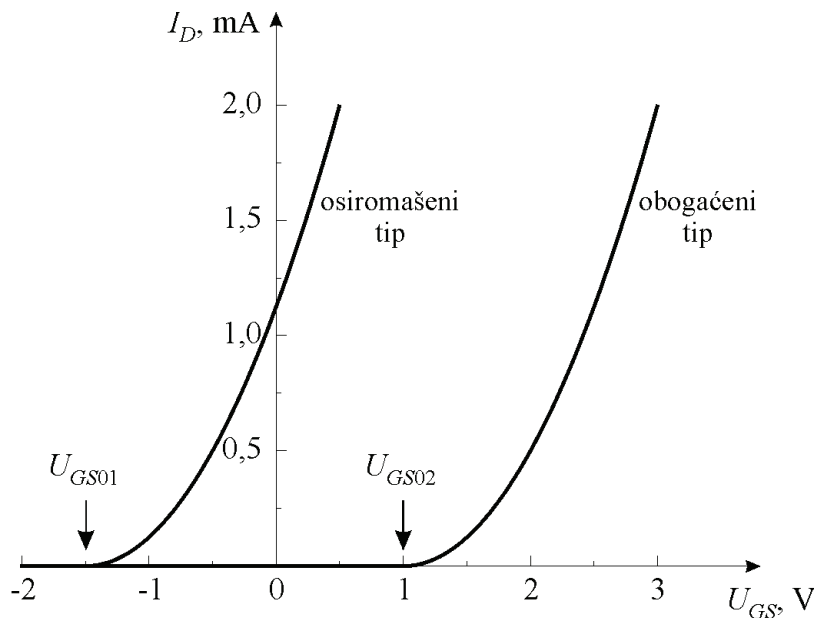
za područje zasićenja – nelinearna
prijenosna karakteristika \rightarrow
izlazne karakteristike nisu
ekvidistantne

Veza prijenosnih i izlaznih karakteristika

Prijenosne karakteristike mogu se konstruirati iz izlaznih karakteristika



Tipovi *n*-kanalnog MOSFET-a

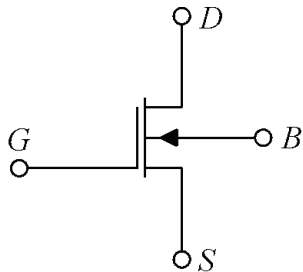


obogaćeni tip → kanal se stvara pozitivnim naponom $U_{GS} = U_{GS0}$

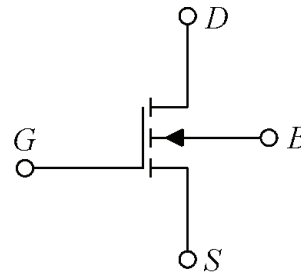
osiromašeni tip → vodi struju uz $U_{GS} = 0$ V; kanal se zatvara negativnim naponom $U_{GS} = U_{GS0}$

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 $U_{GS} = 0 \text{ V}$

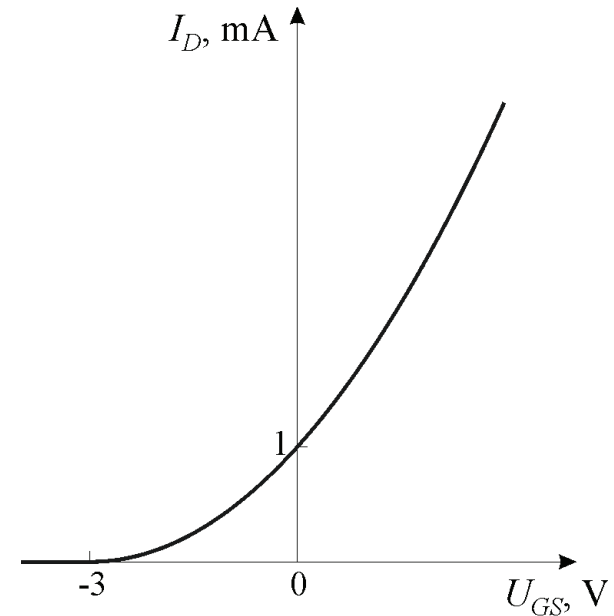
isprekidana crta između uvoda i odvoda → izostanak kanala uz $U_{GS} = 0 \text{ V}$

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

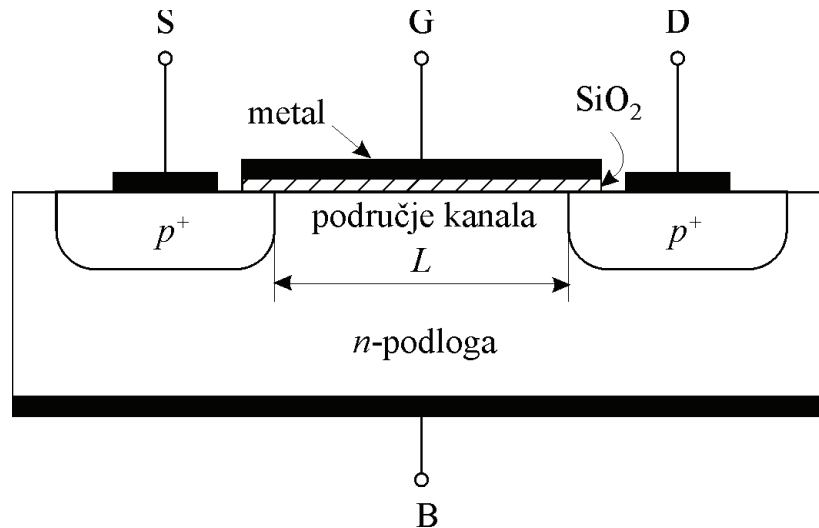
Primjer 5.1

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 $C_G \leq 20 \text{ fF}$?



***p*-kanalni MOSFET**

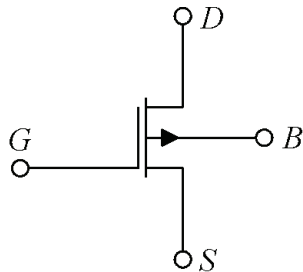


tehnološki presjek → jednak
presjeku n -kanalnog
MOSFET-a uz zamjenu
tipova primjesa

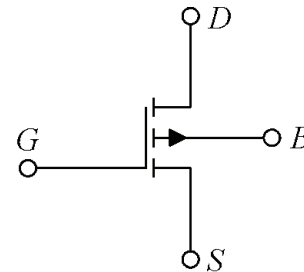
za p -kanal → n -podloga

n^+ područja – kontakti uvoda i
odvoda

Električki simboli *p*-kanalnog MOSFET-a



osiromašeni tip



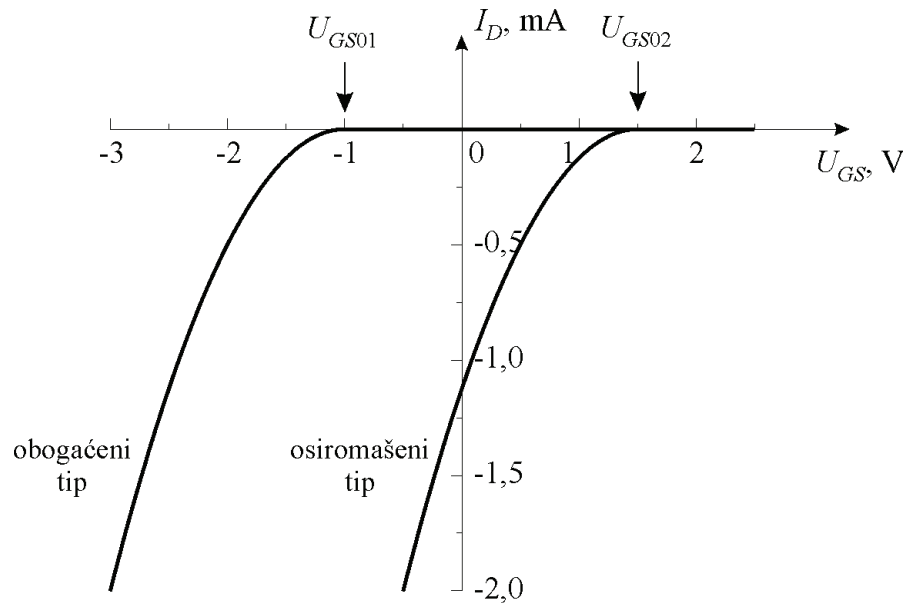
obogaćeni tip

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



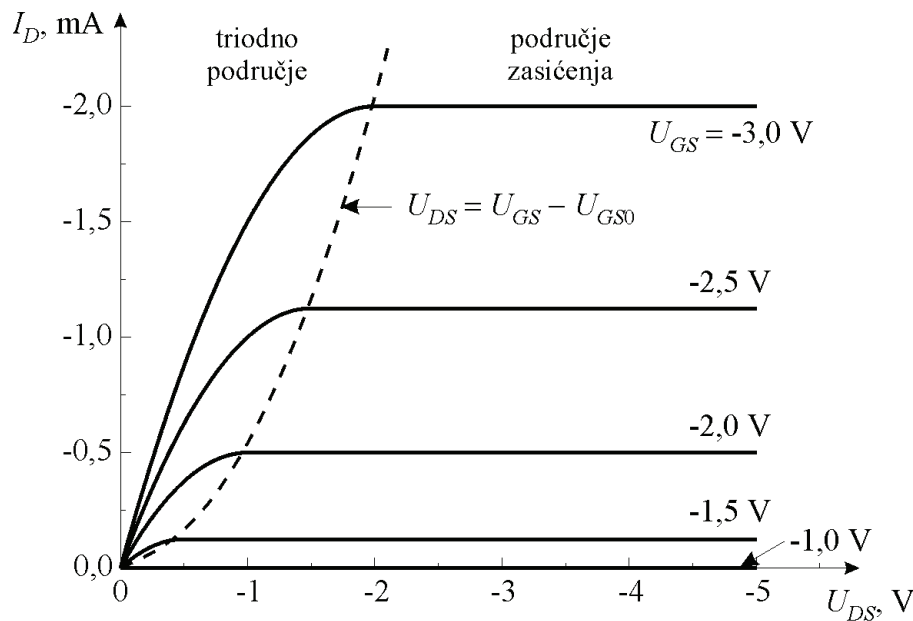
struja je I_D negativna

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



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

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

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

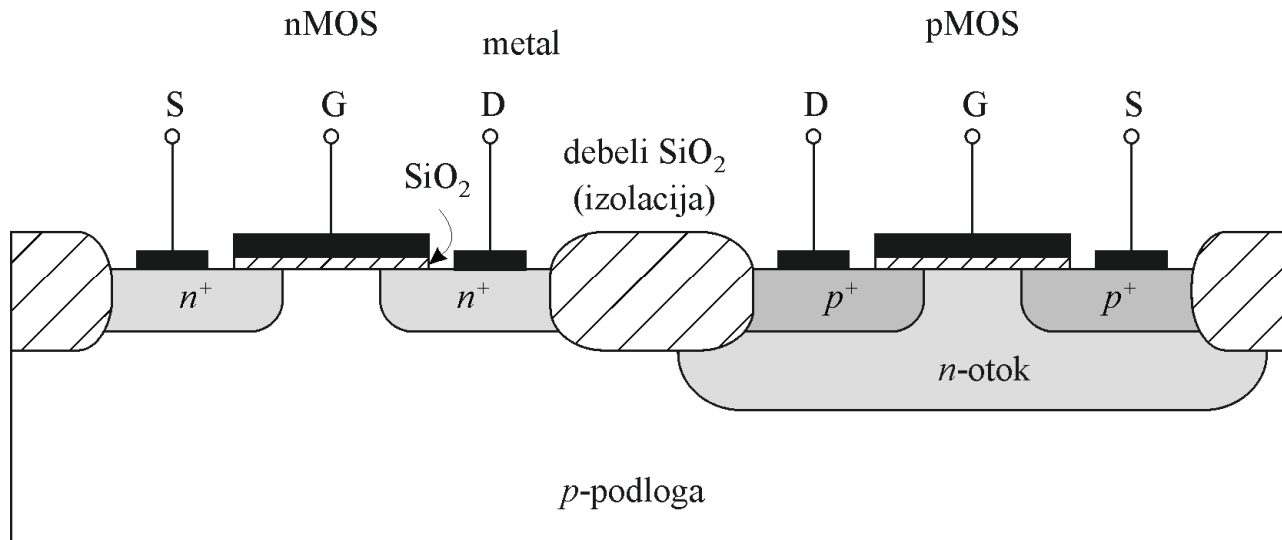
koeficijent struje

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

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

$$I_D = 0$$

CMOS struktura



nMOS \rightarrow na p -podlozi

pMOS \rightarrow u zasebnom n -otoku

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

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.

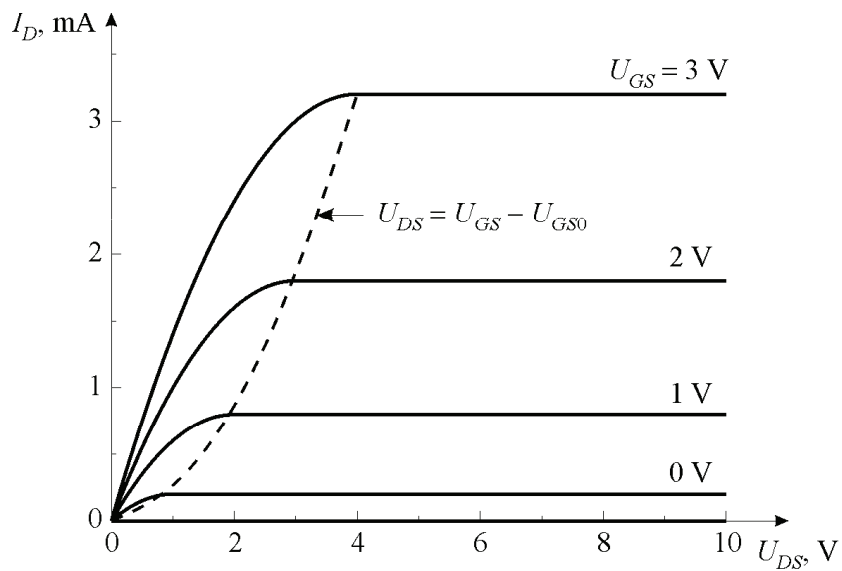
a)

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

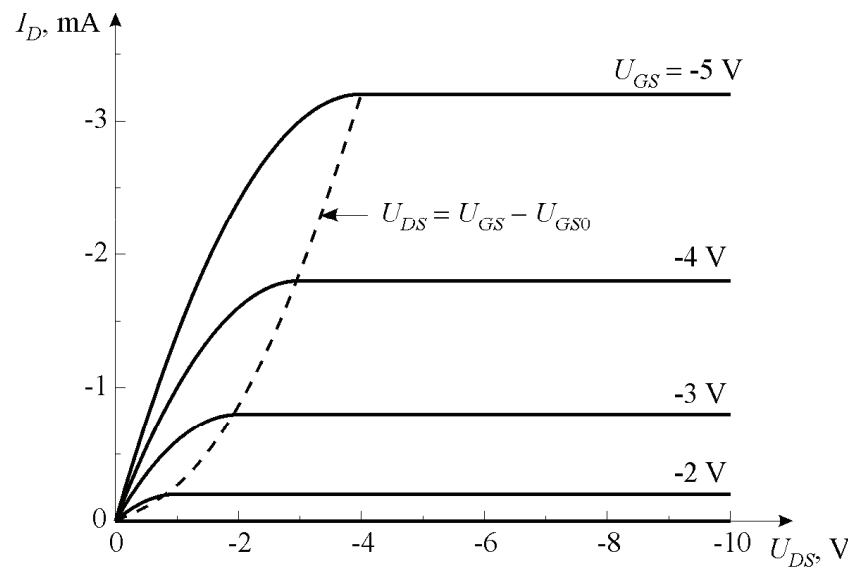
b)

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 (2)

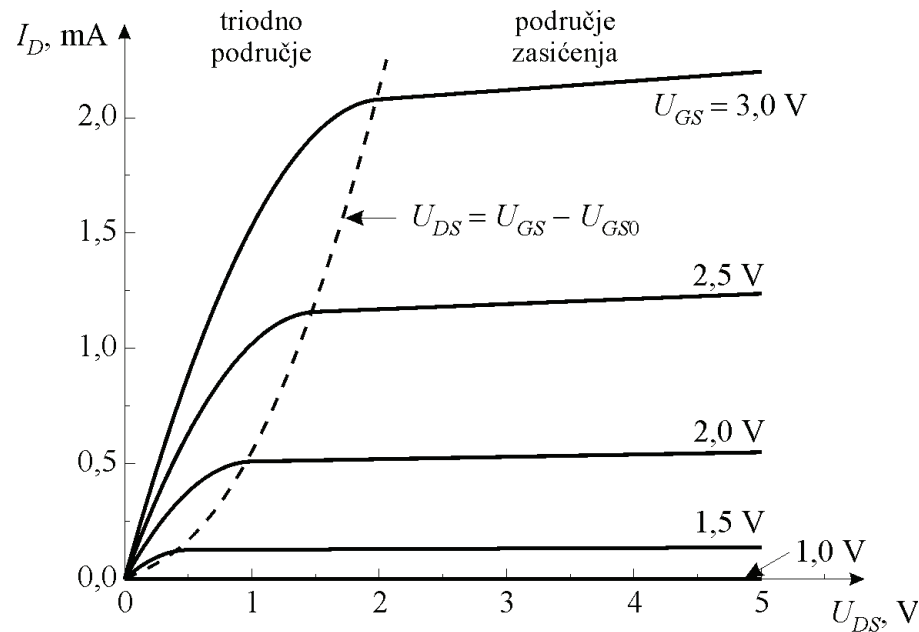


a)



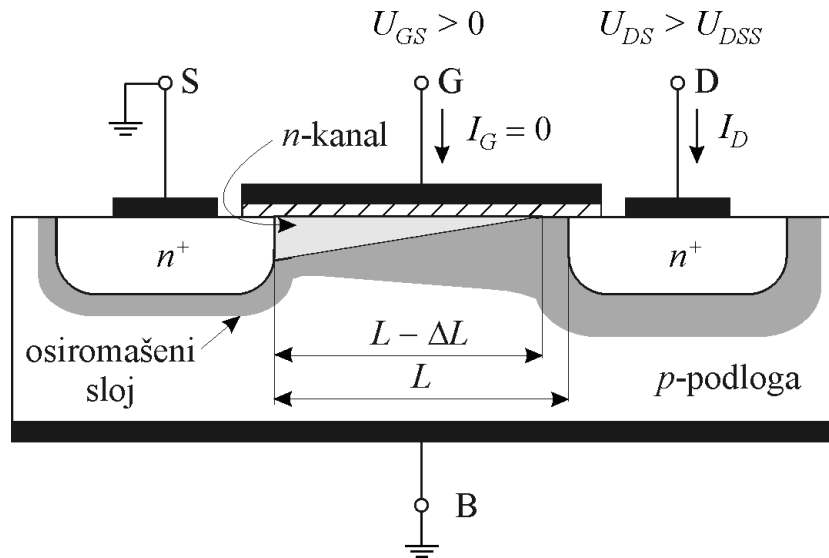
b)

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

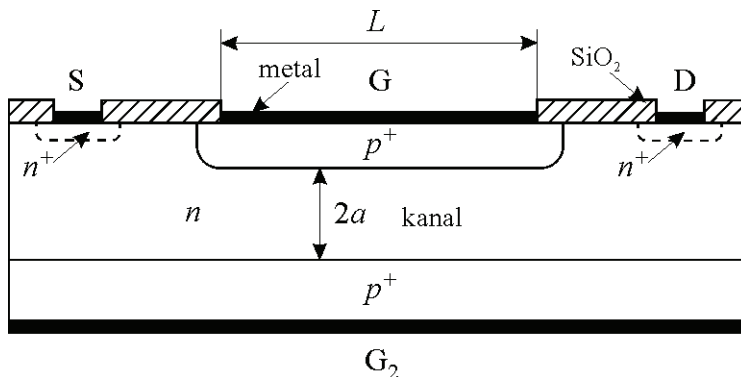
U kanalu elektroni se ubrzavaju naponom $U_{DS} = U_{DSS} = U_{GS} - U_{GS0}$

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



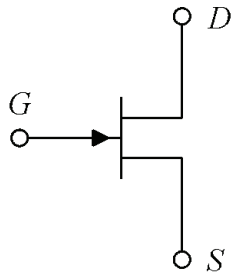
Priključci

- ☐ **uvod – S**
- ☐ **odvod – D**
- ☐ **upravljачka elektroda – G**
- ☐ **druga upravljачka elektroda – G_2**

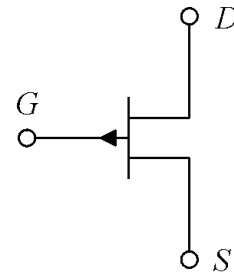
Kanal

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

Električni simboli JFET-a



n-kanalni



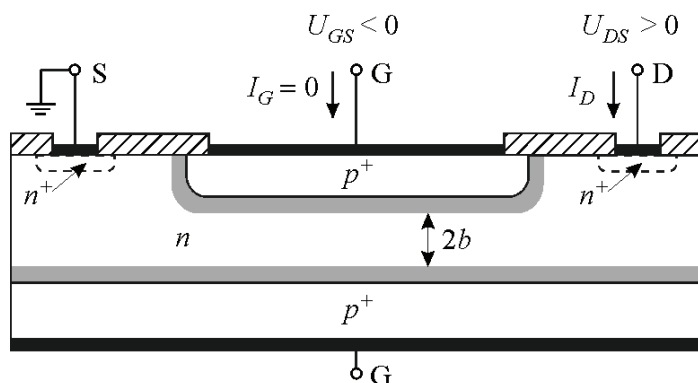
p-kanalni

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

Napon dodira i linearno područje rada



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

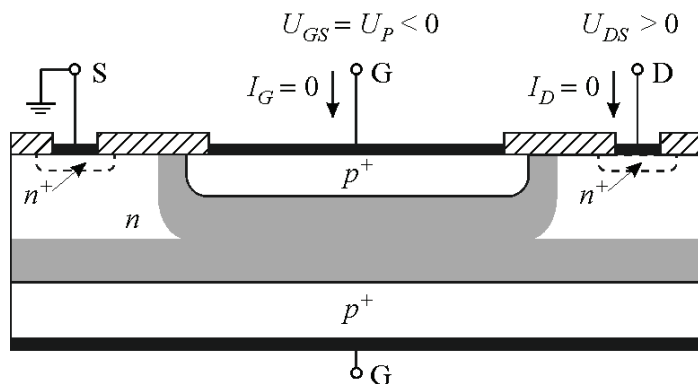
Uz mali $U_{DS} \rightarrow$ zanemariv pad napona u kanalu

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

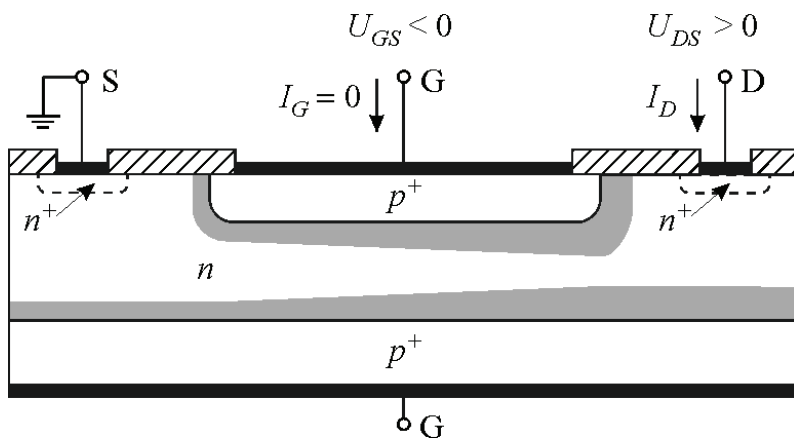


$$I_D = G_0 \left[1 - \left(\frac{U_K - U_{GS}}{U_K - U_P} \right)^{1/2} \right] U_{DS}$$

$U_K \rightarrow$ 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

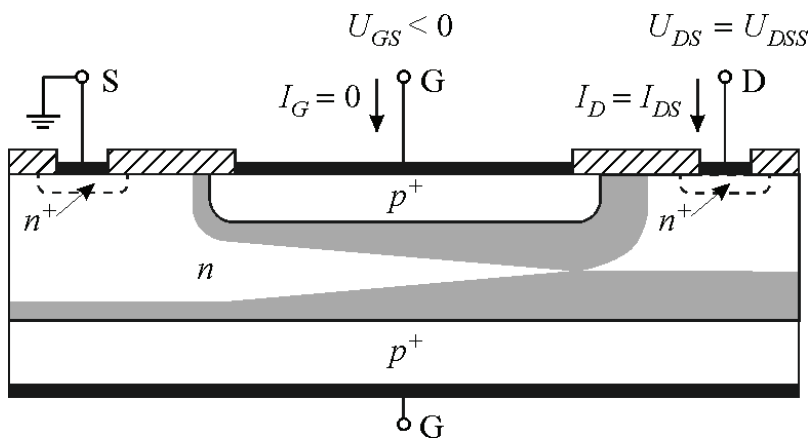
Kanal se prema odvodu sužava \rightarrow otpor kanala raste

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



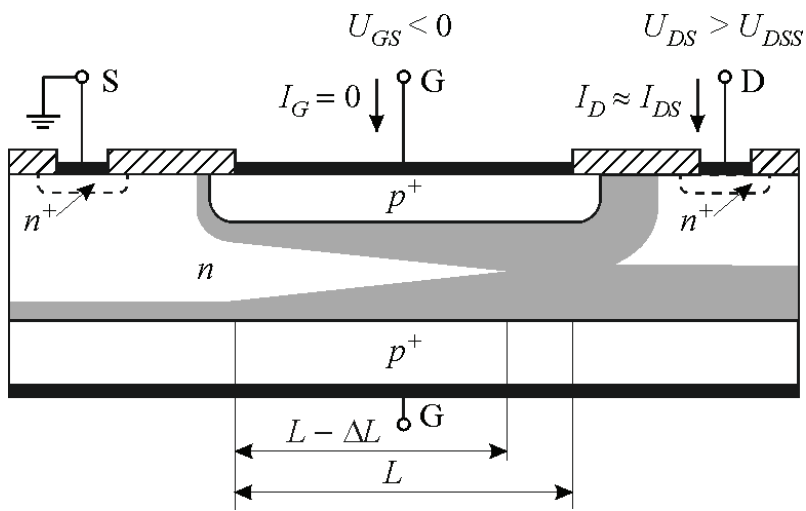
Za napon $U_{DSS} = U_{GS} - U_P \rightarrow U_{GD} = U_P$
 \rightarrow kanal se na strani odvoda
zatvara

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 samo s naponom U_{GS}

Modulacija dužine kanala



Točka dodira pomiče se prema uvodu

Kanal se skraćuje

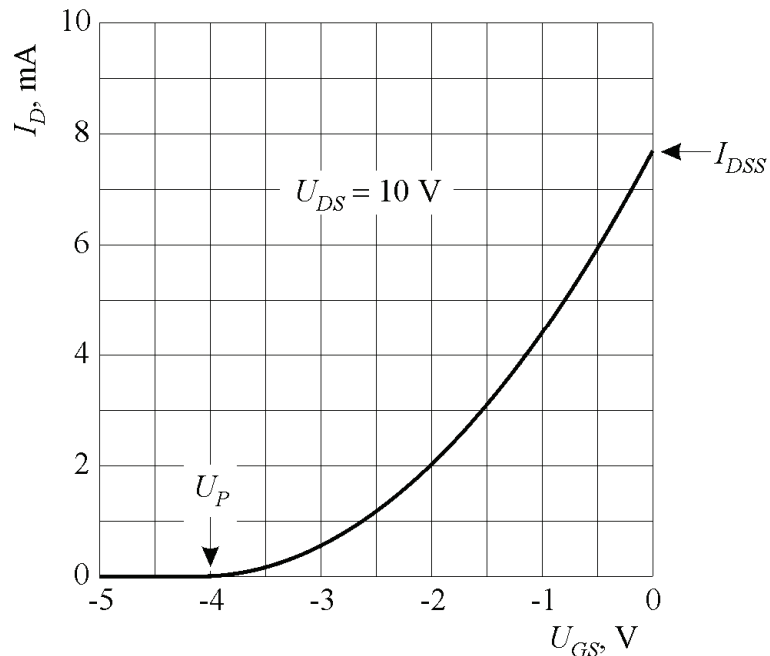
U kanalu elektroni se ubrzavaju

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

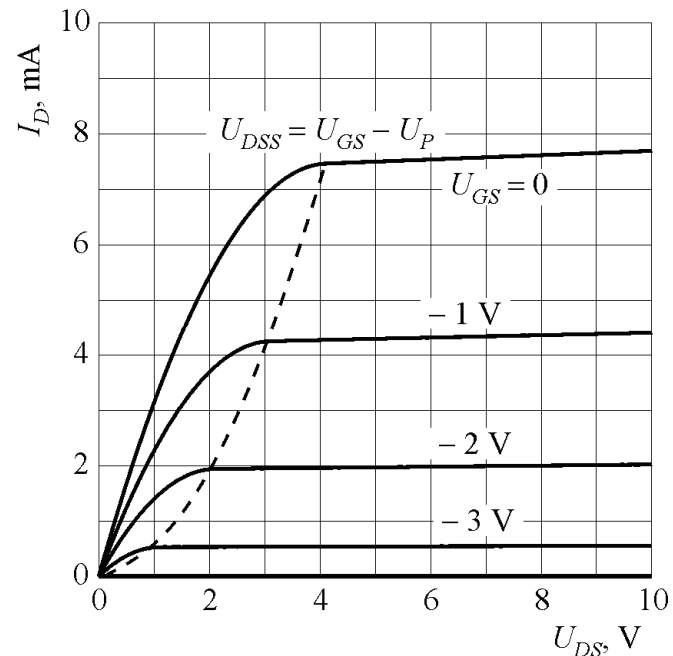
U području zasićenja struja I_D raste s naponom U_{DS}

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

Karakteristike JFET-a



prijenosna karakteristika



izlazne karakteristike

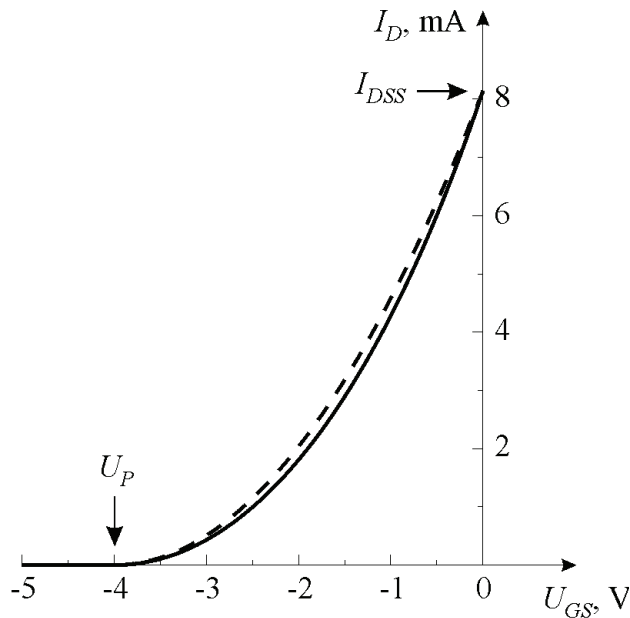
$I_{DSS} \rightarrow$ maksimalna struja JFET-a

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



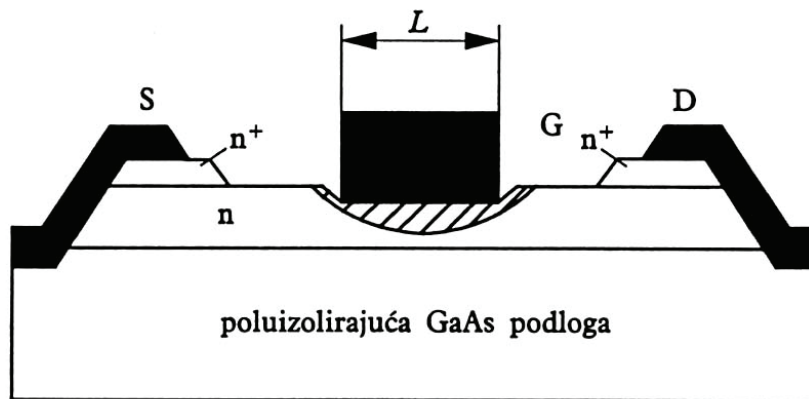
Umjesto točnog i nepraktičnog izraza u sklopovskoj analizi koristi se jednostavniji izraz

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

puna crta – točan izraz

crtkano – jednostavniji izraz

MESFET



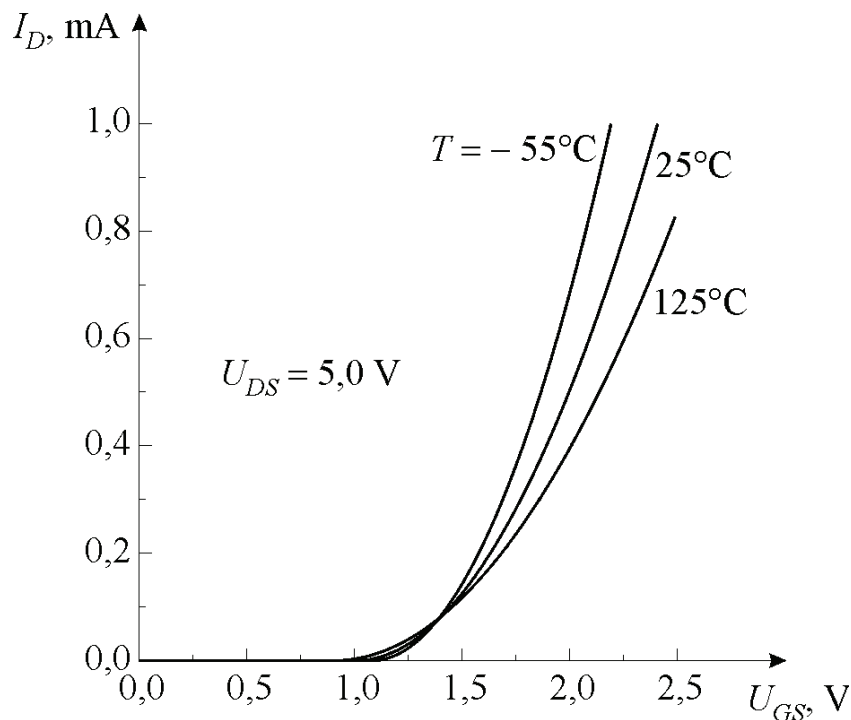
Radi se u galij-arsenidu – velika brzina rada

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}

JFET - porastom temperature smanjuje se pokretljivost i sužavaju osiromašeni slojevi

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

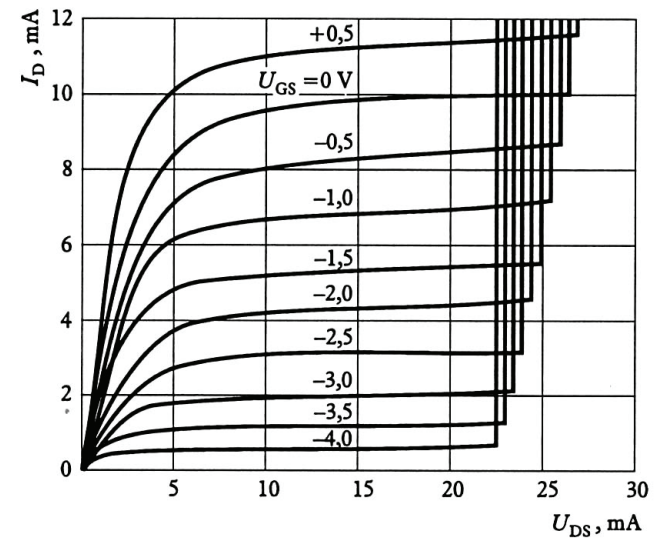
Proboji FET-ova

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

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

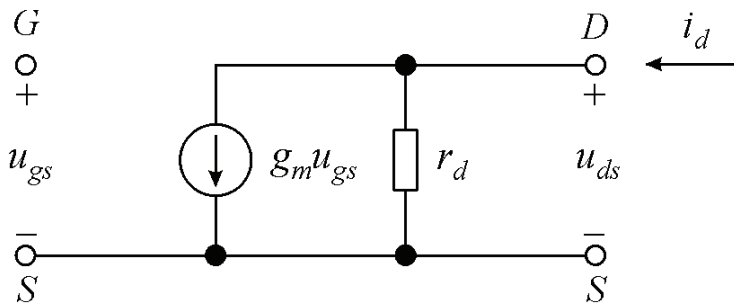
izlazni dinamički otpor

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

Model FET-a za mali signal

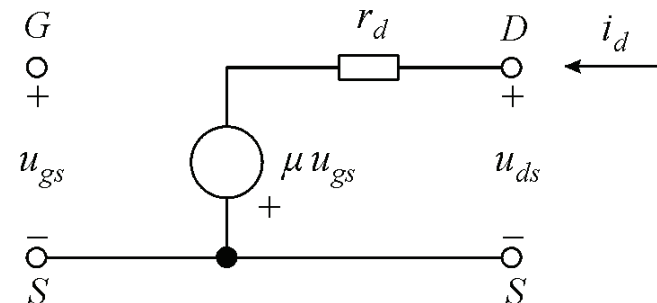
Koristi se u području zasićenja

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



Drugi oblik

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



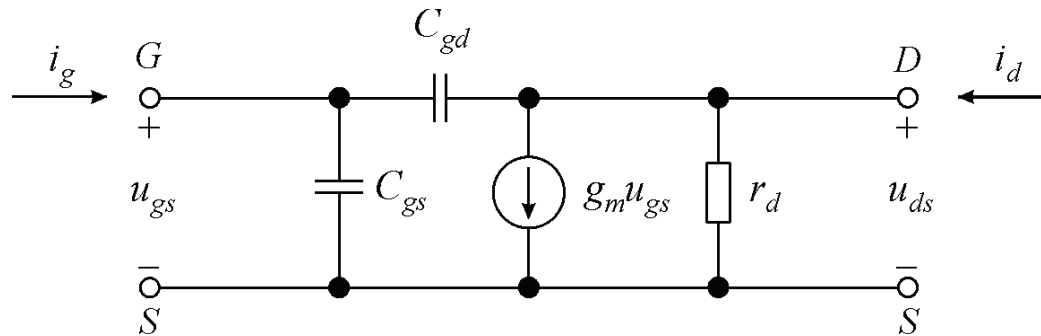
faktor naponskog pojačanja

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

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} :

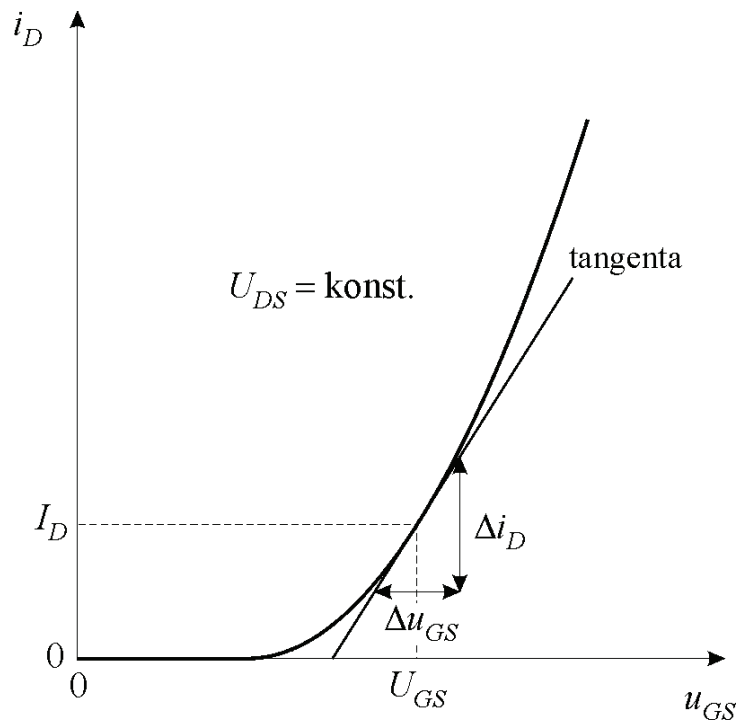
za MOSFET → kapacitet MOS strukture

za JFET → kapacitet zaporno polariziranih pn -spojeva

za MESFET → kapacitet zaporno polariziranog spoja metal-poluvodič

Grafičko određivanje dinamičkih parametara (1)

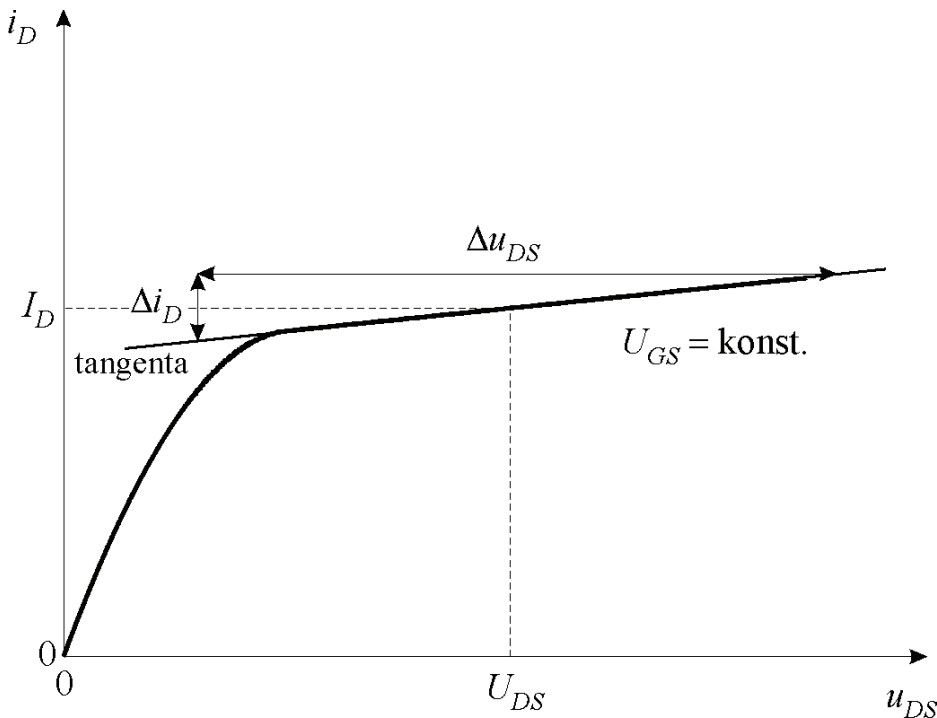
Strmina:



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

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

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

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

□ JFET

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

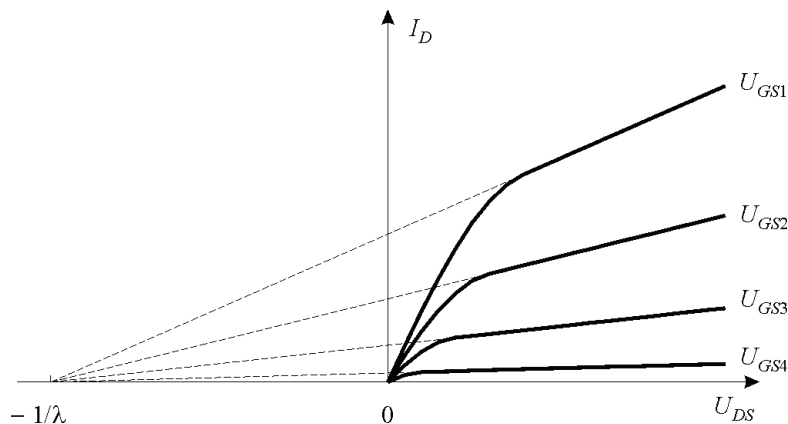
$$g_m = \frac{di_D}{du_{GS}} = \frac{2 I_{DSS}}{-U_P} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_P} \right) = \frac{2}{-U_P} \sqrt{I_{DSS} I_D}$$

Analitičko određivanje dinamičkih parametara (2)

Izlazni dinamički otpor:

model nagiba izlaznih

karakteristika u području zasićenja



□ MOSFET

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

$$g_d = \frac{di_D}{du_{DS}} = \lambda \frac{K}{2} (U_{GS} - U_{GS0})^2$$

□ JFET

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

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

za oba FET-a

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

Primjer 5.3

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) $U_{DS2} = 2(U_{GS} - U_{GS0})$.

Primjer 5.4

Napon praga p -kanalnog MOSFET-a je $U_{GS0} = -1,5 \text{ V}$. Kada MOSFET radi u području zasićenja pri naponu $U_{GS} = -4 \text{ V}$ 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.

Primjer 5.5

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.

