

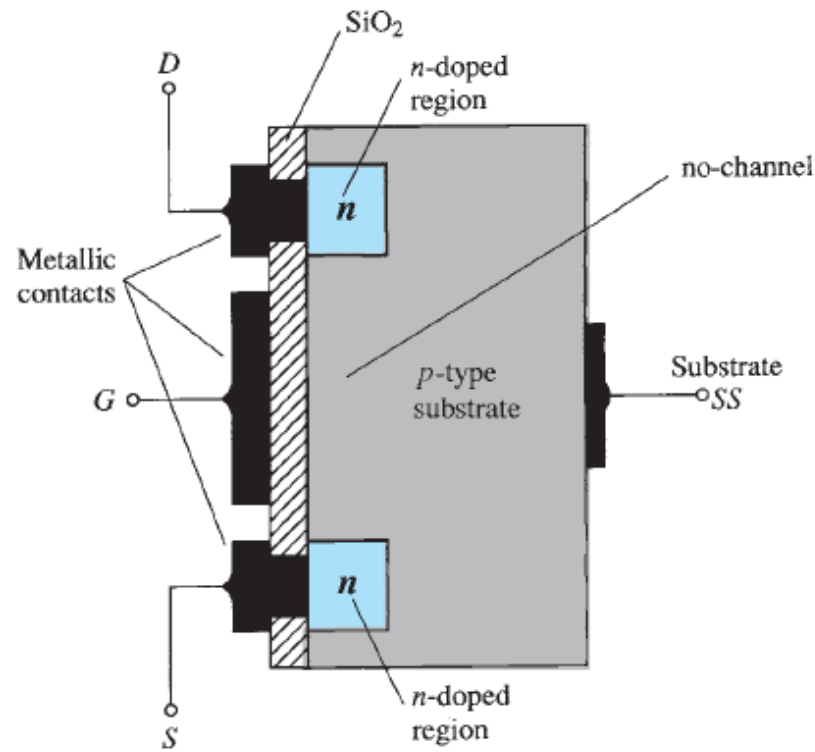
Elektronički Elementi i Sklopovi

Sadržaj predavanja:

1. MOSFET tranzistor obogaćenog tipa
2. CMOS
3. MESFET tranzistor
4. DC analiza FET tranzistora

Elektronički Elementi i Sklopovi

MOSFET tranzistor obogaćenog tipa



Konstrukcija MOSFET tranzistora obogaćenog tipa je različita od JFET tranzistora i MOSFET tranzistora osiromašenog tipa.

Za razliku od MOSFET tranzistora osiromašenog tipa, MOSFET tranzistor obogaćenog tipa nema kanal koji povezuje source (S) elektrodu i drain (D) elektrodu.

Posljedica toga je da prijenosna karakteristika nije opisana Shocklyevom jednačbom.

Također struja I_D ne teče sve dok napon V_{GS} ne postigne točno određen nivo.

Elektronički Elementi i Sklopovi

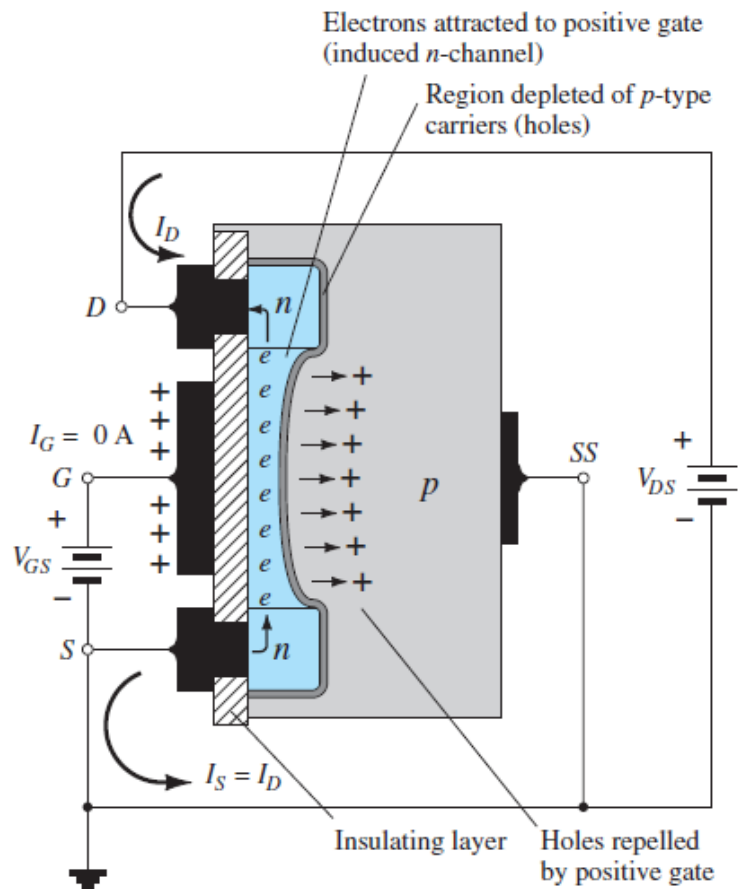
Operacija MOSFET tranzistora obogaćenog tipa kada je $V_{GS} = 0$

Budući da ne postoji kanal n-tipa kada je napon $V_{GS} = 0$ tada će kroz MOSFET obogaćenog tipa teći struja od 0A. Ovo svojstvo MOSFET tranzistora obogaćenog tipa čini ga različitim od MOSFET tranzistora osiromašenog tipa i od JFET tranzistora.

Kod MOSFET tranzistora osiromašenog tipa i kod JFET tranzistora imali smo da pri naponu $V_{GS} = 0$ kroz tranzistor teče struja $I_D = I_{DSS}$.

Kada pogledamo konstrukciju MOSFET-a osiromašenog tipa vidimo da imamo dva P-N spoja između dva područja N-tipa i substrata P-tipa. Kada je $V_{GS} = 0$ onda su oba P-N spoja nepropusno polarizirana (pod uvjetom da je $V_{DS} > 0$).

Elektronički Elementi i Sklopovi



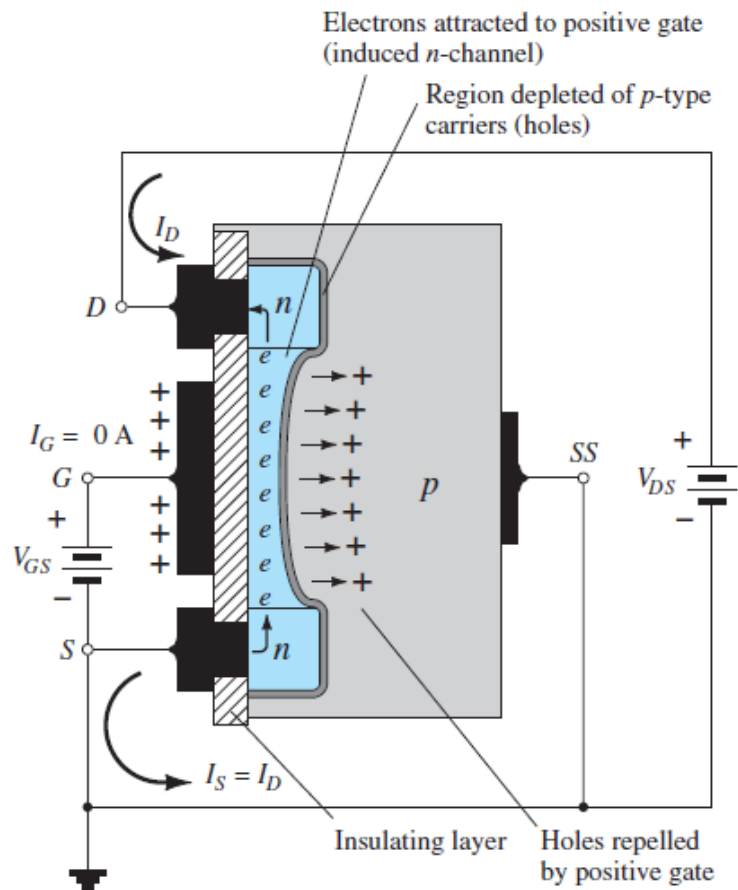
Na slici su sada oba napona $V_{DS} > 0$ i $V_{GS} > 0$ te sada i drain (D) i gate (G) elektroda imaju veći potencijal od source elektrode (S).

Pozitivni potencijal na gate (G) elektrodi će djelovati tako da se šupljine iz substrata P tipa potisnu u unutrašnjost substrata (šupljine putuju prema desno na slici).

To rezultira pojavom osiromašenog pojasa u blizini izolacijskog SiO_2 sloja.

S druge strane, pozitivna gate (G) elektroda će privući elektrone (manjinske nosioce) iz substrata. Izolacijski sloj SiO_2 će spriječiti ove elektrone da prođu kroz gate (G) elektrodu. Na taj način se opet formira kanal između gate (G) i source (S) elektrode.

Elektronički Elementi i Sklopovi

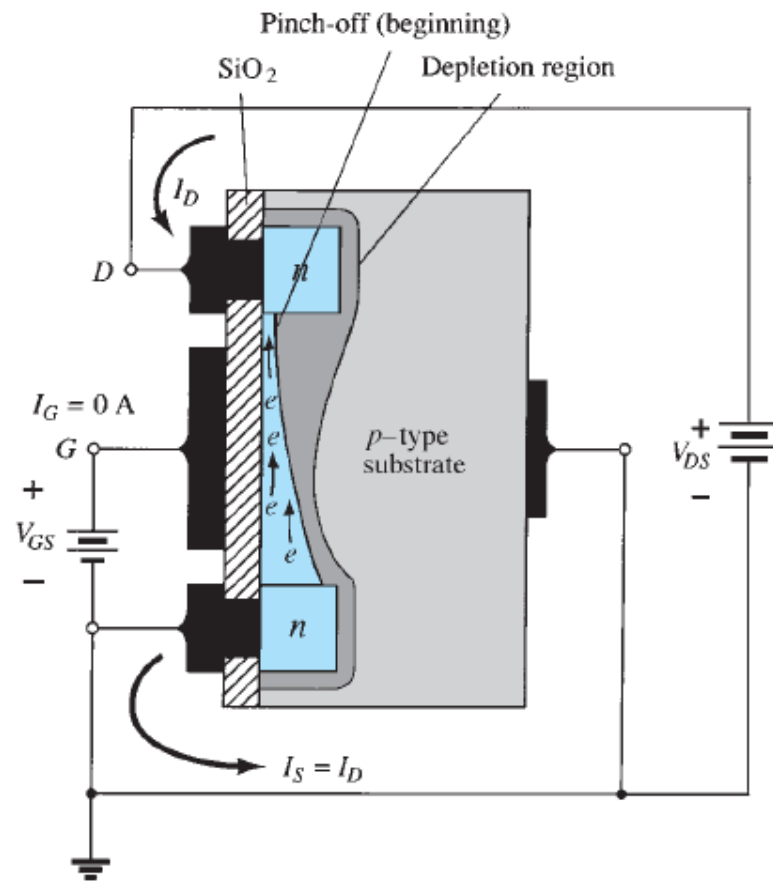


Kako se napon V_{GS} povećava tako se povećava i koncentracija elektrona u blizini SiO₂ izolacijskog sloja i kod određenog napona V_{GS} ćemo imati mjerljiv tok elektrona, tj. struju I_D .

Napon V_{GS} kod kojeg imamo mjerljivu struju I_D se naziva *threshold voltage* i označava se simbolom V_T . Kod specifikacija proizvođača napon V_T se obično označava oznakom $V_{GS(Th)}$.

Budući da kanal između elektroda drain (D) i source (S) ne postoji kod napona $V_{GS} = 0$ te budući da je tranzistor „obogaćen” kanalom kada je napon $V_{GS} > 0$ ova vrsta MOSFET tranzistora se naziva MOSFET tranzistorom obogaćenog tipa.

Elektronički Elementi i Sklopovi



Kako povećavamo napon V_{GS} iznad napona V_T tako se povećava broj slobodnih nosioca u kanalu. Međutim ako držimo napon V_{GS} konstantnim te ako povećavamo napon V_{DS} struja I_D će u jednom trenutku doseći struju saturacije I_{DSS} te se neće više povećavati sa porastom napona V_{DS} (slično kao i kod MOSFET tranzistora osiromašenog tipa i JFET tranzistora).

Razlog toj pojavi je u tome što se slično kao i kod JFET tranzistora kanal počinje sužavati zbog povećanog gradijenta potencijala (porast napona V_{DS}). Kod određenog napona $V_{DS} = V_{DS_{sat}}$ imamo *pinch-off* napon gdje kroz MOSFET transistor obogaćenog tipa teče struja saturacije $I_D = I_{DSS}$.

Elektronički Elementi i Sklopovi

Napon saturacije V_{DSsat} se može dovesti u vezu sa *threshol*d naponom V_T i naponom V_{GS} :

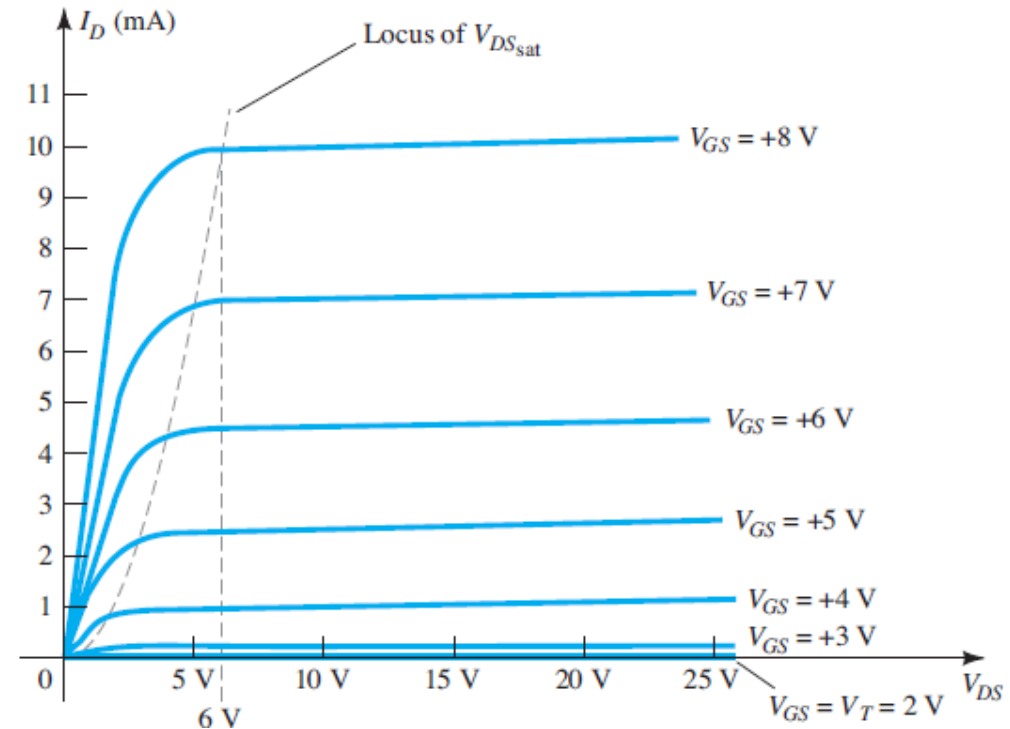
$$(1) V_{DSsat} = V_{GS} - V_T$$

Na slici je izlazna strujna karakteristika MOSFET tranzistora obogaćenog tipa.

Iz karakteristike je vidljivo je da kada je $V_{GS} \leq V_T$ onda je struja $I_D = 0$.

Kada je $V_{GS} > V_T$ struja I_D ovisi o naponu V_{GS} nelinearno:

$$(2) I_D = k(V_{GS} - V_T)^2$$



Elektronički Elementi i Sklopovi

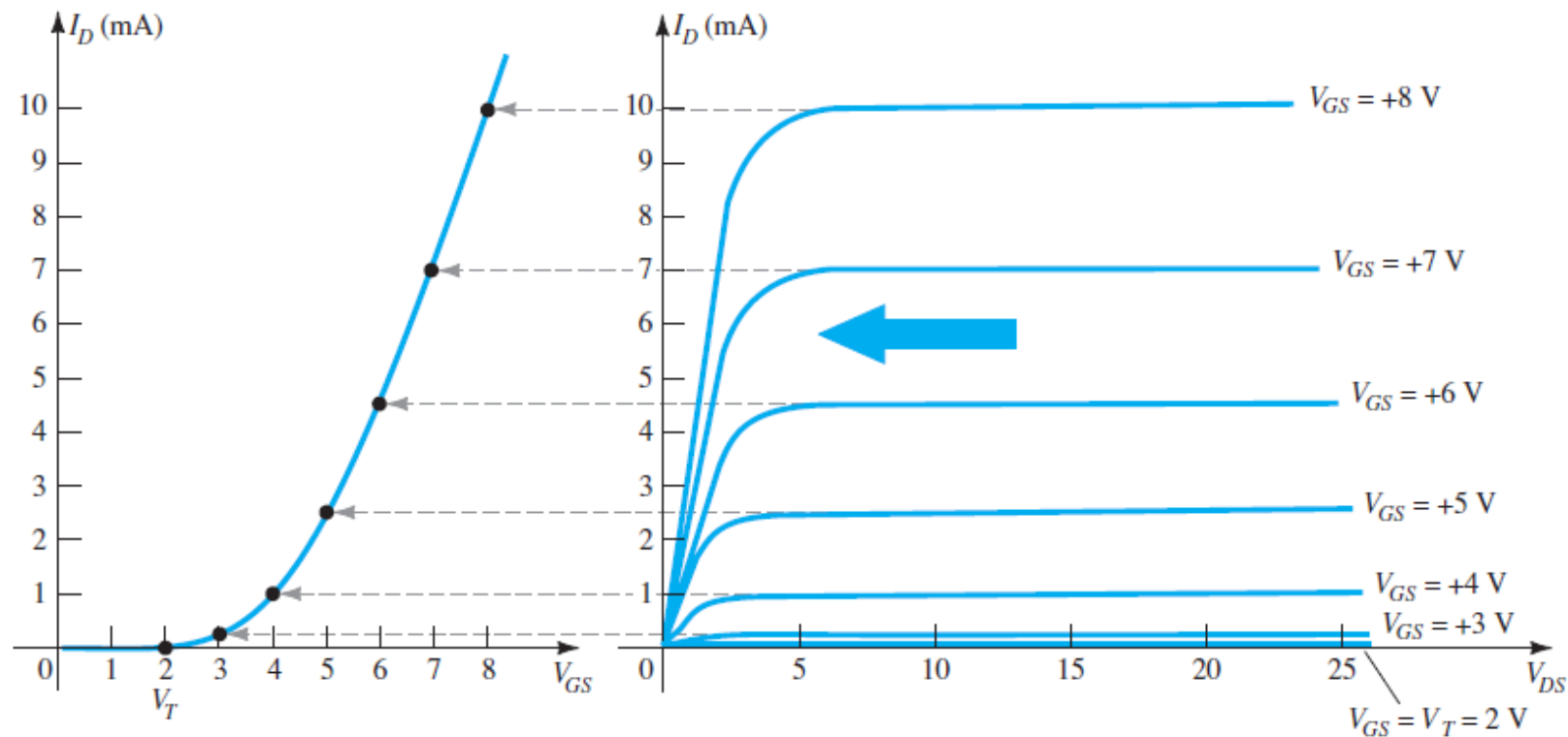
Član k u jednadžbi (2) je funkcija konstrukcije MOSFET-a obogaćenog tipa. Vrijednost k se može aproksimirati putem slijedeće jednadžbe:

$$(3) k = \frac{I_{D(on)}}{(V_{GS(on)} - V_T)^2}$$

gdje je struja $I_{D(on)}$ i napon $V_{GS(on)}$ uzeta sa karakteristike.

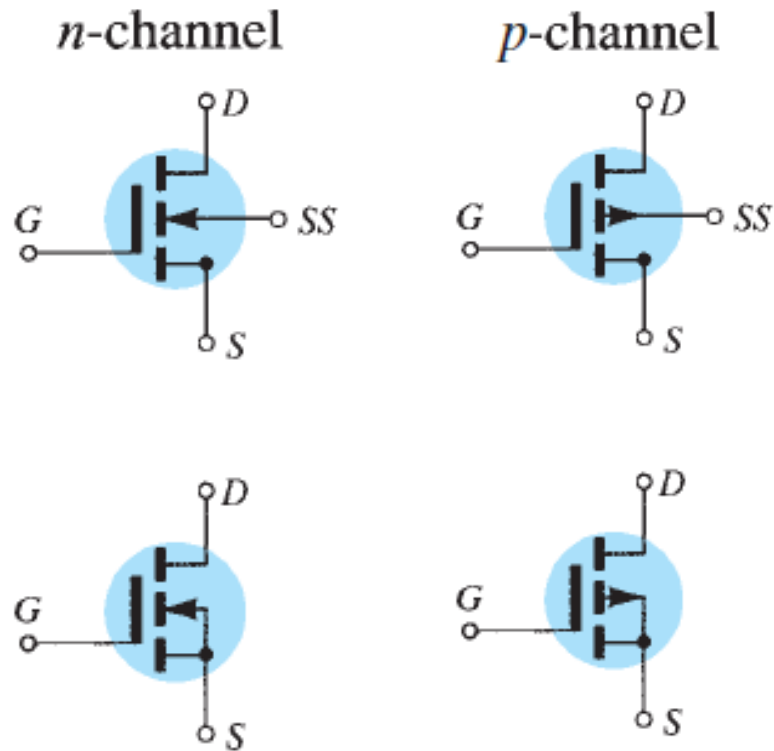
Elektronički Elementi i Sklopovi

Tipična prijenosna strujno-naponska karakteristika MOSFET tranzistora obogaćenog tipa.



Elektronički Elementi i Sklopovi

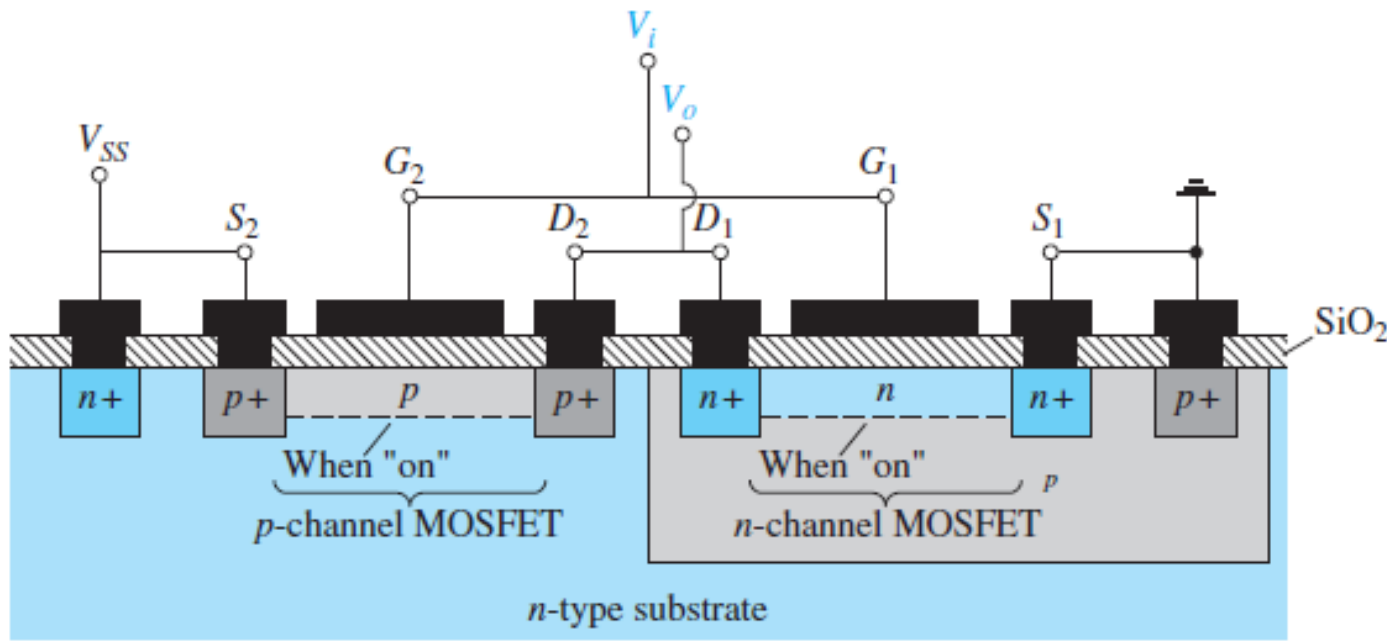
Simboli za MOSFET tranzistor obogaćenog tipa:



Elektronički Elementi i Sklopovi

CMOS tranzistor

CMOS tranzistor dobijemo ako na istom substratu proizvedemo n-kanalni i p-kanalni MOSFET.



Ovakva konfiguracija dvaju tranzistora se naziva *Complimentary* MOSFET tj. CMOS te ima brojne aplikacije kod dizajna logičkih sklopova.

Prednosti su visoka ulazna impedancija, velika brzina rada te niska potrošnja.

Sklop prikazan na slici je invertirajući sklop.

Elektronički Elementi i Sklopovi

MESFET tranzistor

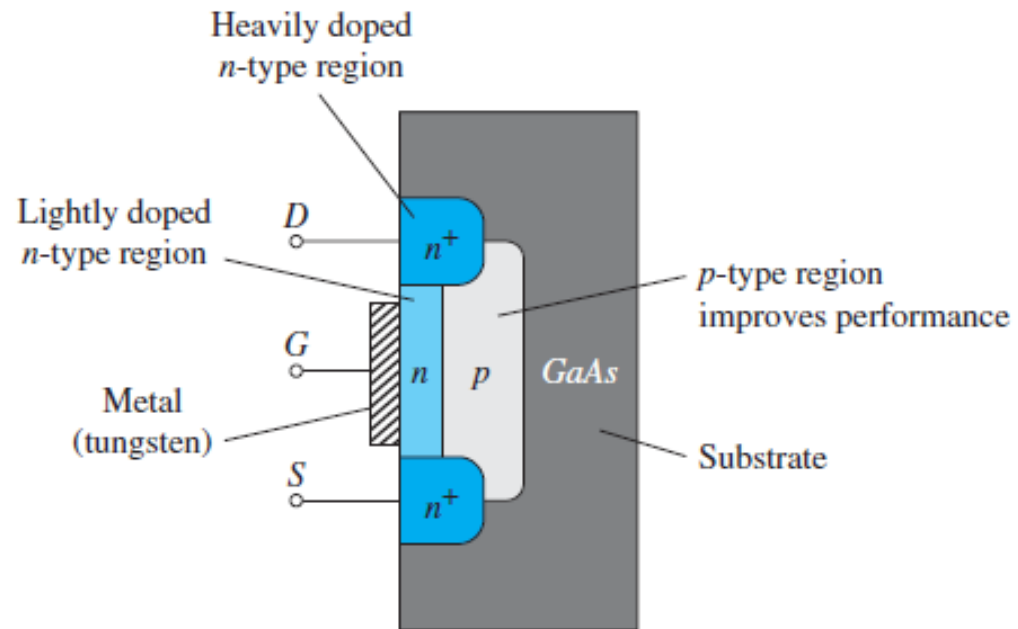
Poluvodički materijal za MESFET tranzistore je GaAs te ih odlikuje velika brzina rada. Razlog tome je što od poznatih poluvodičkih materijala GaAs ima najveću mobilnost slobodnih nosioca. Proizvodnja MESFET tranzistora je najzahtjevnija od svih vrsta tranzistora zbog problema kod difuzije nečistoća.

Glavna konstrukcijska razlika između MESFET i MOSFET tranzistora je u tome što MESFET tranzistori imaju dodanu Schottkyevu barijeru na substrat (GaAs).

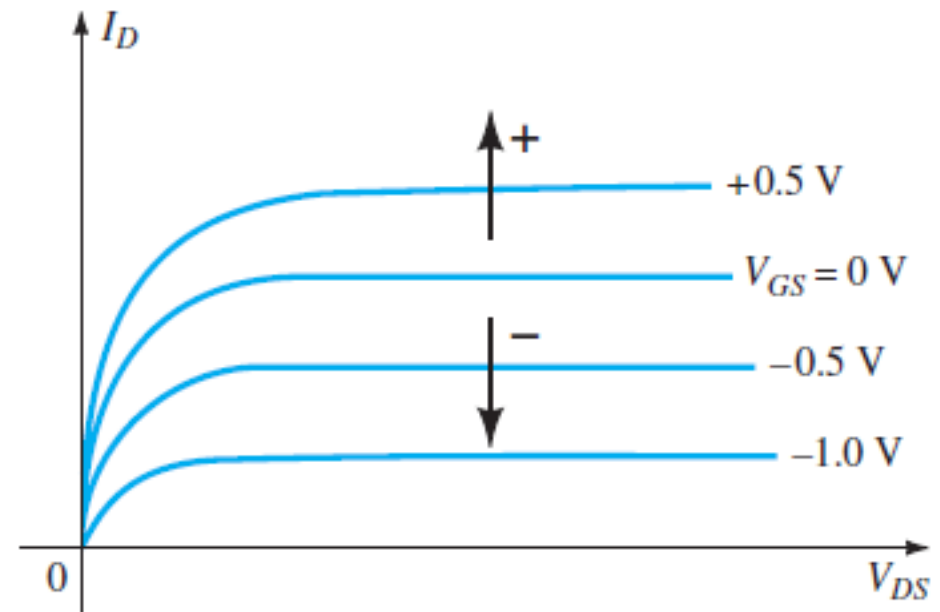
Schottkyeva barijera nastaje tako što se na substrat dodaje metal kao što je tungsten.

Još jedna konstrukcijska razlika je u tome što MESFET nema izolacijski sloj SiO_2 . Zbog toga MESFET tranzistor ima manju kapacitivnost. Efekt smanjenog kapaciteta dolazi do izražaja na višim frekvencijama (nema kratkog spoja) što još više povećava brzinu MESFET uređaja.

Elektronički Elementi i Sklopovi



Konstrukcija MESFET tranzistora



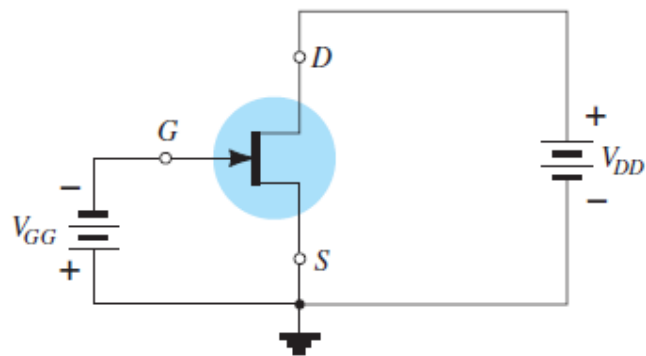
Strujno-naponska karakteristika MESFET tranzistora

Elektronički Elementi i Sklopovi

Prisutnost metalno-poluvodičkog spoja je razlog zašto se ova vrsta FET tranzistora naziva MESFET. Naziv na engleskom jeziku jest *Metal-Semiconductor Field-Effect Transistor* – MESFET.

Kada na gate (G) elektrodu MESFET uređaja dovedemo negativan napon, on će privući negativne nosioce iz kanala na metalnu elektrodu te će na taj način smanjiti broj slobodnih nosioca u kanalu. Rezultat je smanjena struja I_D na strujno naponskoj karakteristici (prethodna slika).

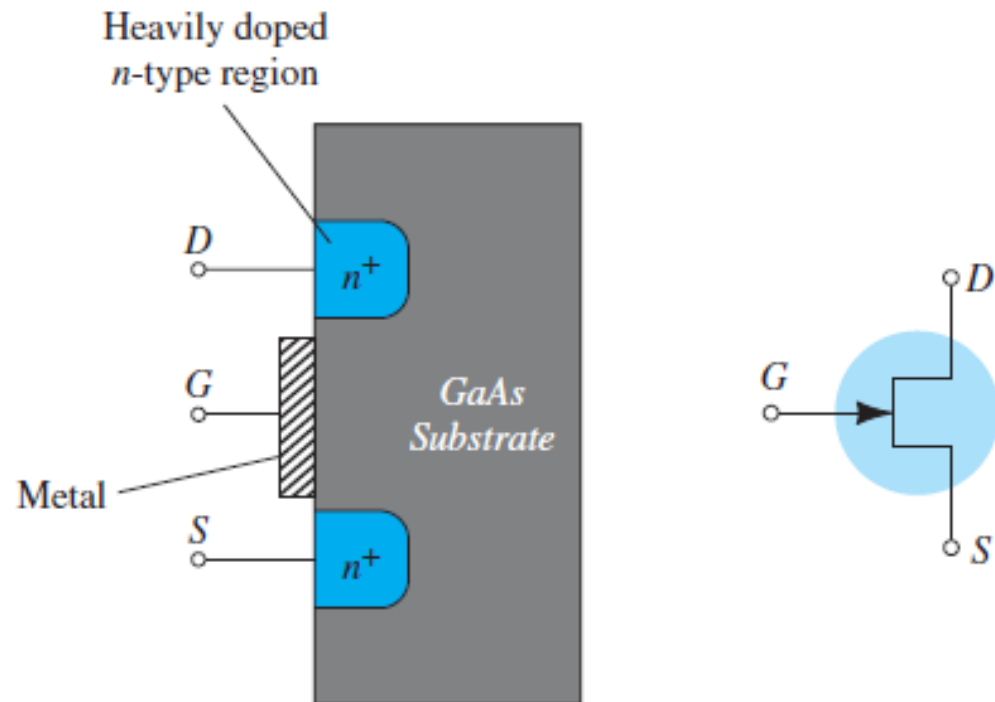
Ako se na gate (G) elektrodu MESFET tranzistora dovede pozitivan napon to će rezultirati povećanjem slobodnih nosioca u kanalu te će se povećati struja I_D .



Simbol MESFET tranzistora te naponi napajanja.

Elektronički Elementi i Sklopovi

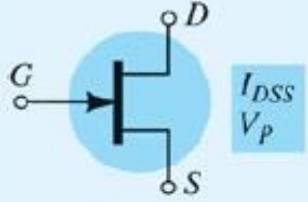
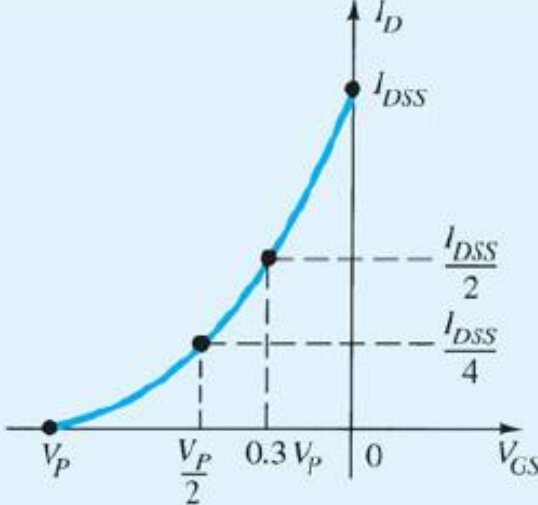
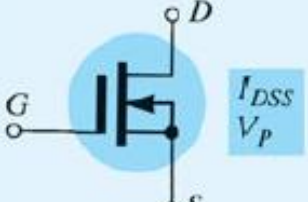
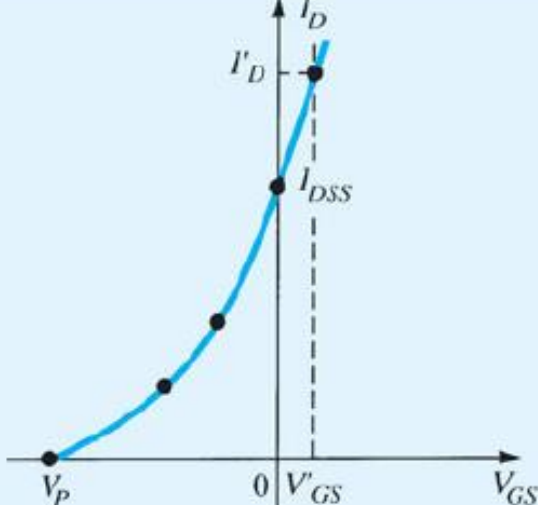
MESFET tranzistor obogaćenog tipa

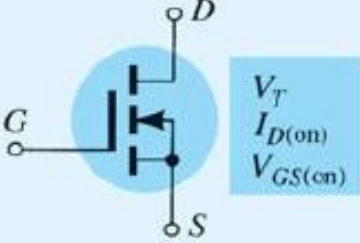
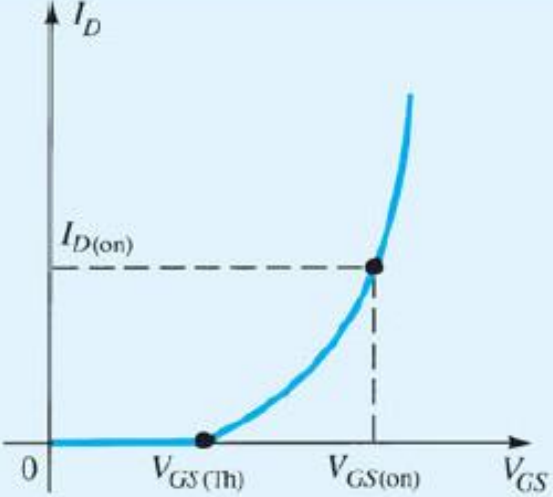
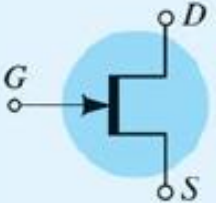
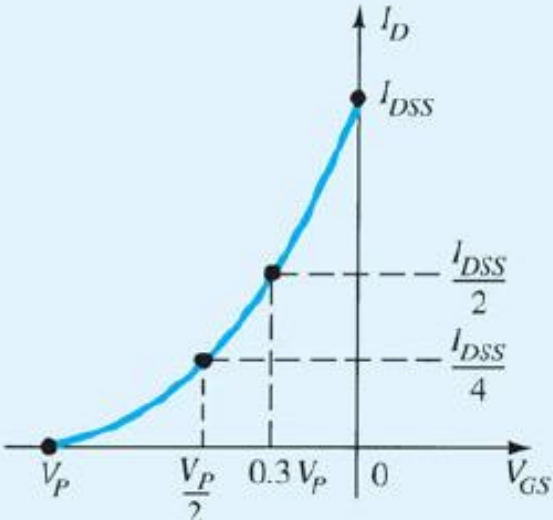


Kao što postoji MOSFET tranzistor obogaćenog tipa tako postoji i MESFET tranzistor obogaćenog tipa.

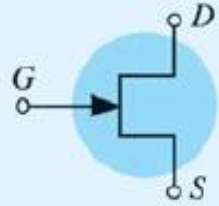
Razlika između MESFET tranzistora obogaćenog tipa i MESFET tranzistora osiromašenog tipa je u tome što MESFET tranzistor obogaćenog tipa inicijalno nema kanal (slično kao i kod MOSFET tranzistora obogaćenog tipa).

Također, zbog tehnoloških ograničenja postoje MESFET tranzistori samo n-tipa jer je mobilnost šupljina kod GaAs bitno manja od mobilnosti elektrona.

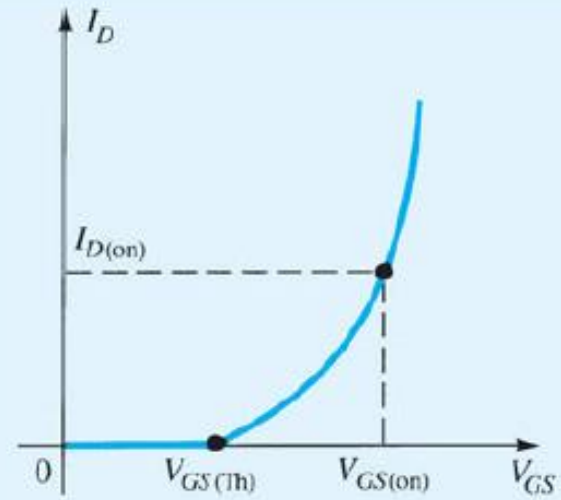
Type	Symbol and Basic Relationships	Transfer Curve	Input Resistance and Capacitance
JFET (<i>n</i> -channel)	$I_G = 0 \text{ A}, I_D = I_S$  $I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2$		$R_i > 100 \text{ M}\Omega$ $C_i: (1 - 10) \text{ pF}$
MOSFET depletion type (<i>n</i> -channel)	$I_G = 0 \text{ A}, I_D = I_S$  $I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2$		$R_i > 10^{10} \Omega$ $C_i: (1 - 10) \text{ pF}$

<p>MOSFET enhancement type (<i>n</i>-channel)</p>	<p>$I_G = 0 \text{ A}, I_D = I_S$</p>  <p>$I_D = k (V_{GS} - V_{GS(Th)})^2$</p> $k = \frac{I_{D(on)}}{(V_{GS(on)} - V_{GS(Th)})^2}$		<p>$R_i > 10^{10} \Omega$ $C_i: (1 - 10) \text{ pF}$</p>
<p>MESFET depletion type (<i>n</i>-channel)</p>	<p>$I_G = 0 \text{ A}, I_D = I_S$</p>  <p>$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2$</p> <p>$I_G = 0 \text{ A}, I_D = I_S$</p>		<p>$R_i > 10^{12} \Omega$ $C_i: (1 - 5) \text{ pF}$</p>

MESFET
enhancement type
(*n*-channel)



$$I_D = k (V_{GS} - V_{GS(Th)})^2$$
$$k = \frac{I_{D(on)}}{(V_{GS(on)} - V_{GS(Th)})^2}$$



$R_i > 10^{12} \Omega$
 $C_i: (1 - 5) \text{ pF}$

Elektronički Elementi i Sklopovi

DC analiza rada FET tranzistora

Kod BJT tranzistora koristili smo aproksimativne jednačbe $V_{BE} = 0.7 V$, $I_C = \beta I_B$ i $I_C \cong I_E$.

Veza između izlaznog i ulaznog kruga BJT tranzistora mogla se naći korištenjem strujnog pojačanja β za koje smo pretpostavljali da je fiksnog iznosa. Taj fiksni iznos strujnog pojačanja β je omogućio da imamo linearnu zavisnost $I_C = \beta I_B$.

Kode FET tranzistora veza između ulaznih i izlaznih veličina je nelinearna zbog kvadratnog člana u Schocklyevoj jednačbi.

Nelinearna veza između struje I_D i napona V_{GS} komplicira DC analizu sklopova sa FET tranzistorima. Zbog toga ćemo kod analize FET tranzistora koristiti grafičku metodu rješavanja. Takva metoda ima ograničenu točnost ali opet dovoljno dobru za praktičnu primjenu.

Elektronički Elementi i Sklopovi

Aproksimativne jednađbe koje ćemo koristiti kod DC analize sklopova sa FET tranzistorima su:

$$(4) I_G \cong 0 A$$

$$(5) I_D = I_S$$

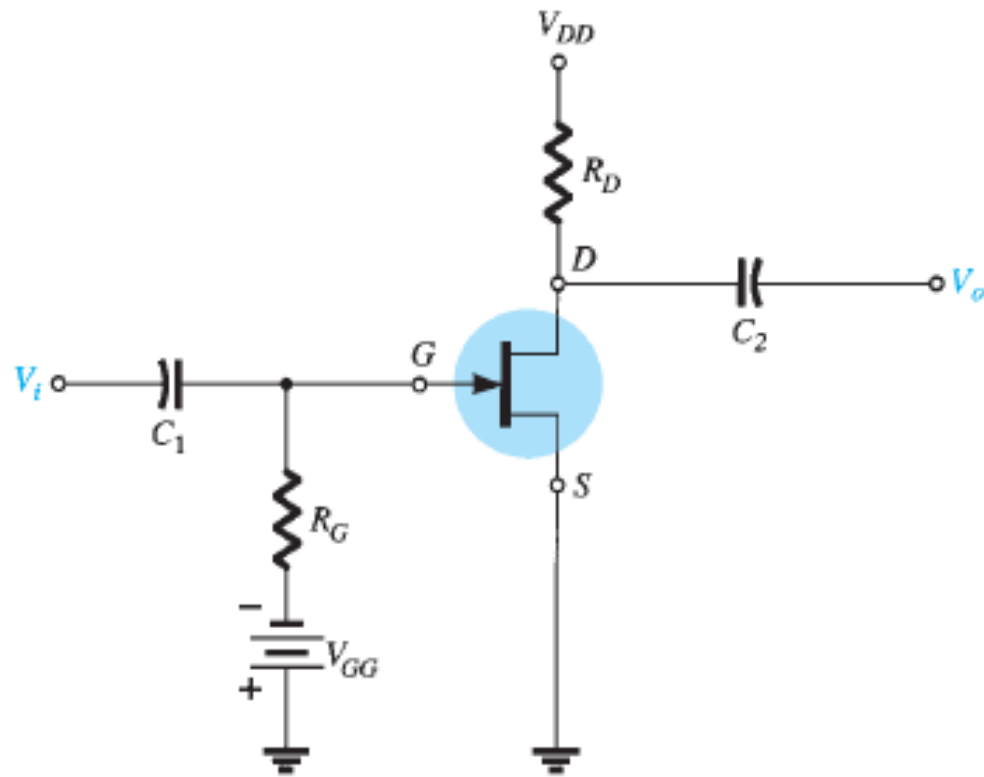
Za JFET tranzistore, MOSFET tranzistore osiromašenog tipa i MESFET tranzistore osiromašenog tipa vrijedi Schockleyeva jednađba:

$$(6) I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2$$

Za MOSFET i MESFET tranzistore obogaćenog tipa vrijedi:

$$(7) I_D = k(V_{GS} - V_T)^2$$

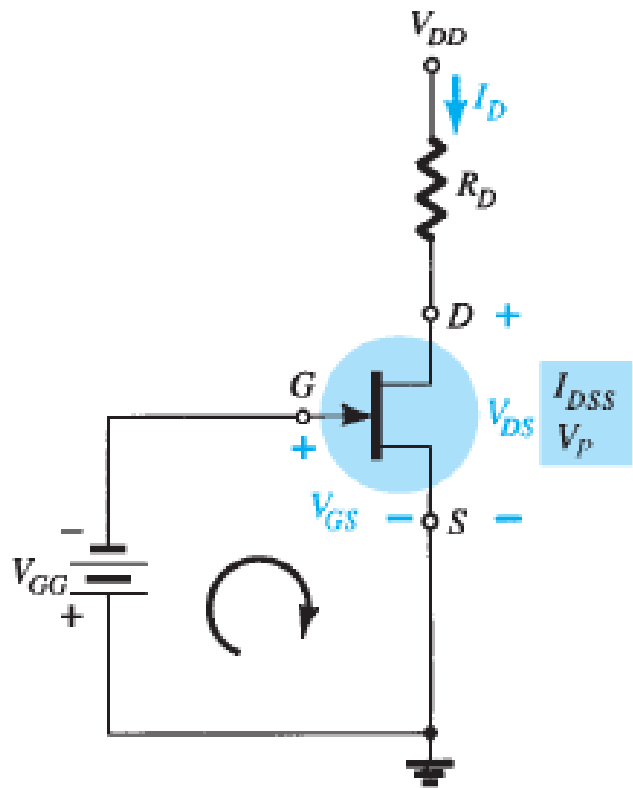
Elektronički Elementi i Sklopovi



Najjednostavnija konfiguracija pojačala sa JFET tranzistorom se nalazi na slici. Ovakva konfiguracija je jedna od rijetkih konfiguracija sa FET tranzistorima koja se može riješiti analitički i grafički.

Kod DC analize kratko spojimo kondenzatore C_1 i C_2 .

Elektronički Elementi i Sklopovi



Kada kratko spojimo kondenzatore C_1 i C_2 dobije se električna mreža kao na slici. Za struju I_G vrijedi:

$$(8) I_G \cong 0 \text{ A}$$

Budući da je struja $I_G = 0$ tada nema pada napona na otporu R_G (prethodna shema) te zbog toga imamo ekvivalentnu shemu kao na slici. U tom slučaju vrijedi Kirchoffov zakon za napone:

$$(9) -V_{GG} - V_{GS} = 0$$

Iz jednadžbe (9) slijedi:

$$(10) V_{GS} = -V_{GG}$$

Elektronički Elementi i Sklopovi

Struja I_D se može dobiti iz Shockleyeve jednadžbe:

$$(11) I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2$$

Budući da je V_{GS} fiksna veličina u ovoj konfiguraciji magnituda struje I_D može se dobiti jednostavno uvrštavanjem $V_{GS} = -V_{GG}$ u jednadžbu (11).

Elektronički Elementi i Sklopovi

Kod grafičke metode rješavanja treba prvo nacrtati ovisnost struje I_D o naponu V_{GS} . To se može postići korištenjem jednadžbe (11). Ako postavimo da je $V_{GS} = V_P/2$ onda imamo da je struja I_D :

$$(12) I_D = \frac{I_{DSS}}{4} \Big|_{V_{GS}=V_P/2}$$

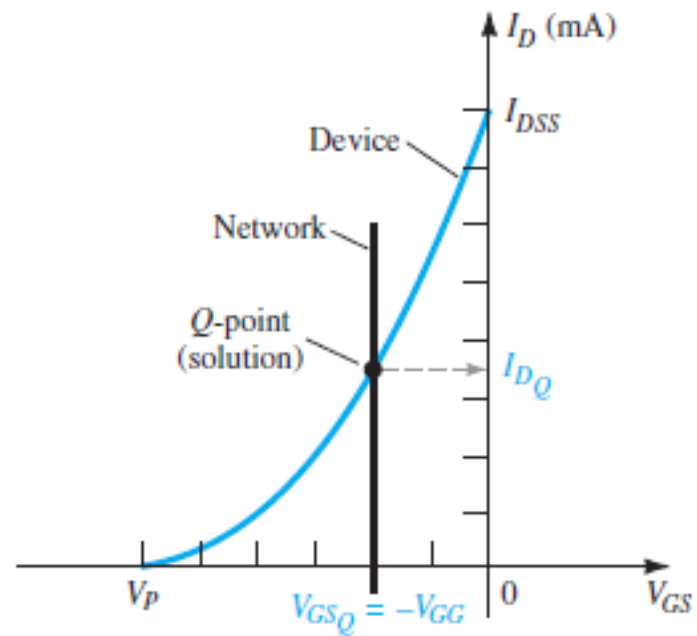
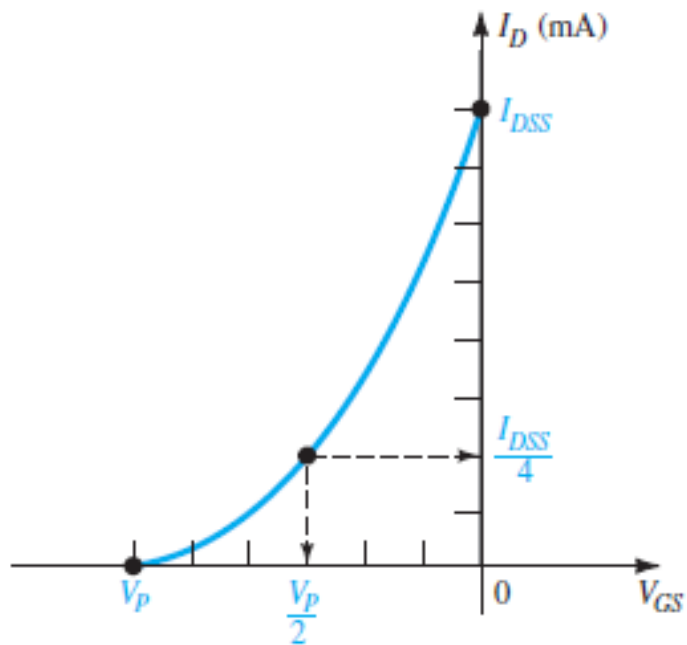
Treću točku dobijemo ako postavimo da je $V_{GS} = 0$. Iz jednadžbe (11) tada slijedi:

$$(13) I_D = I_{DSS} \Big|_{V_{GS}=0}$$

Iz tri točke ($V_{GS} = V_P$, $V_{GS} = V_P/2$, $V_{GS} = 0$) mogu se dobiti tri točke na ulaznoj strujno-naponskoj karakteristici.

Elektronički Elementi i Sklopovi

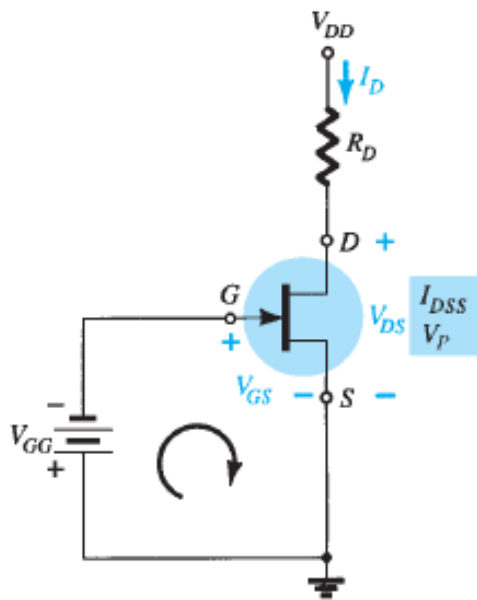
S druge strane korištenjem izraza (10) ($V_{GS} = -V_{GG}$) dobije se vertikalni pravac:



Elektronički Elementi i Sklopovi

Vrijednost struje I_D u statičkoj radnoj točki Q ovog sklopa označava se oznakom I_{DQ} . Točka Q dobije se presjekom krivulje (11) nacrtane iz prethodne 3 točke i vertikalnog pravca $V_{GS} = -V_{GG}$.

Nakon što smo odredili struju I_{DQ} treba odrediti napon V_{DS} u statičkoj radnoj točki.



Za izlazni napon V_{DS} može se postaviti jednačba iz Kirchhoffovog zakona za napone:

$$(14) V_{DS} = V_{DD} - I_D R_D$$

Budući da smo odredili struju I_{DQ} tada je napon $V_{DS} = V_{DSQ}$ u statičkoj radnoj točki Q jednak:

$$(15) V_{DSQ} = V_{DD} - I_{DQ} R_D$$

Elektronički Elementi i Sklopovi

PRIMJER 1. Za mrežu na slici treba naći slijedeće vrijednosti:

A) V_{GSQ}

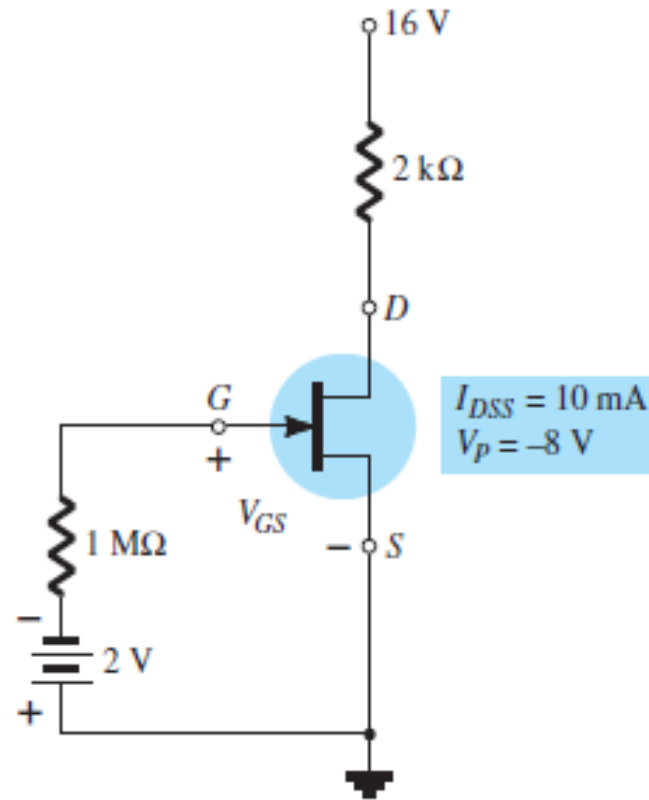
B) I_{DQ}

C) V_{DSQ}

D) V_D

E) V_G

F) V_S



Elektronički Elementi i Sklopovi

Rješenje:

Matematički pristup:

$$A) V_{GSQ} = -V_{GG} = -2V$$

$$B) I_{DQ} = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2 = 10 \text{ mA} \left(1 - \frac{-2V}{-8V}\right)^2 = 5.625 \text{ mA}$$

$$C) V_{DS} = V_{DSQ} = V_{DD} - I_{DQ} R_D = 16V - 5.625 \text{ mA} \cdot 2 \text{ k}\Omega = 4.75V$$

$$D) V_D = V_{DS} = 4.75 \text{ V}$$

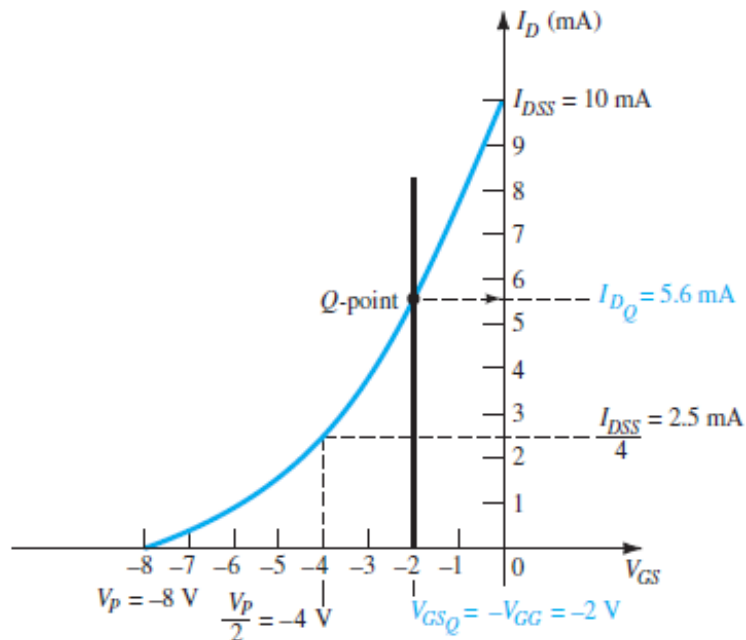
$$E) V_G = V_{GS} = -2V$$

$$F) V_S = 0V$$

Elektronički Elementi i Sklopovi

Grafički pristup:

Shockleyevu jednadžbu možemo nacrtati pomoću tri točke ($V_{GS} = V_P$, $V_{GS} = V_P/2$, $V_{GS} = 0$) te se struja I_{DQ} može naći iz presjeka grafa Shockleyeve jednadžbe i pravca $V_{GS} = -V_{GG}$.



Na taj način grafički odredimo struju I_{DQ} iz sjecišta krivulja:

B) $I_{DQ} = 5.6\text{ mA}$

Ostale veličine možemo odrediti iz jednadžbi:

C) $V_{DS} = V_{DD} - I_D R_D = 16\text{ V} - 5.6\text{ mA} \cdot 2\text{ k}\Omega = 4.8\text{ V}$

D) $V_D = V_{DS} = 4.8\text{ V}$

Elektronički Elementi i Sklopovi

E) $V_G = V_{GS} = -2 V$

F) $V_S = 0V$