

DISPOZITIVE ELECTRONICE ÎN ELECTRONICA APLICATĂ

Tema 5:

TRANZISTORUL CU EFECT DE CÂMP

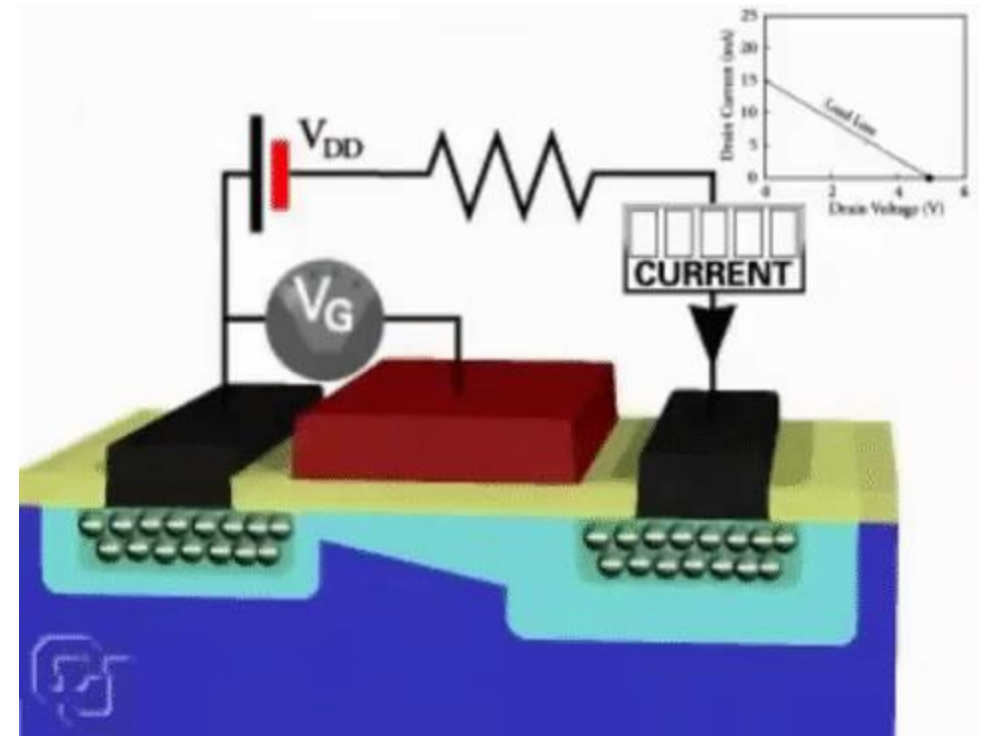
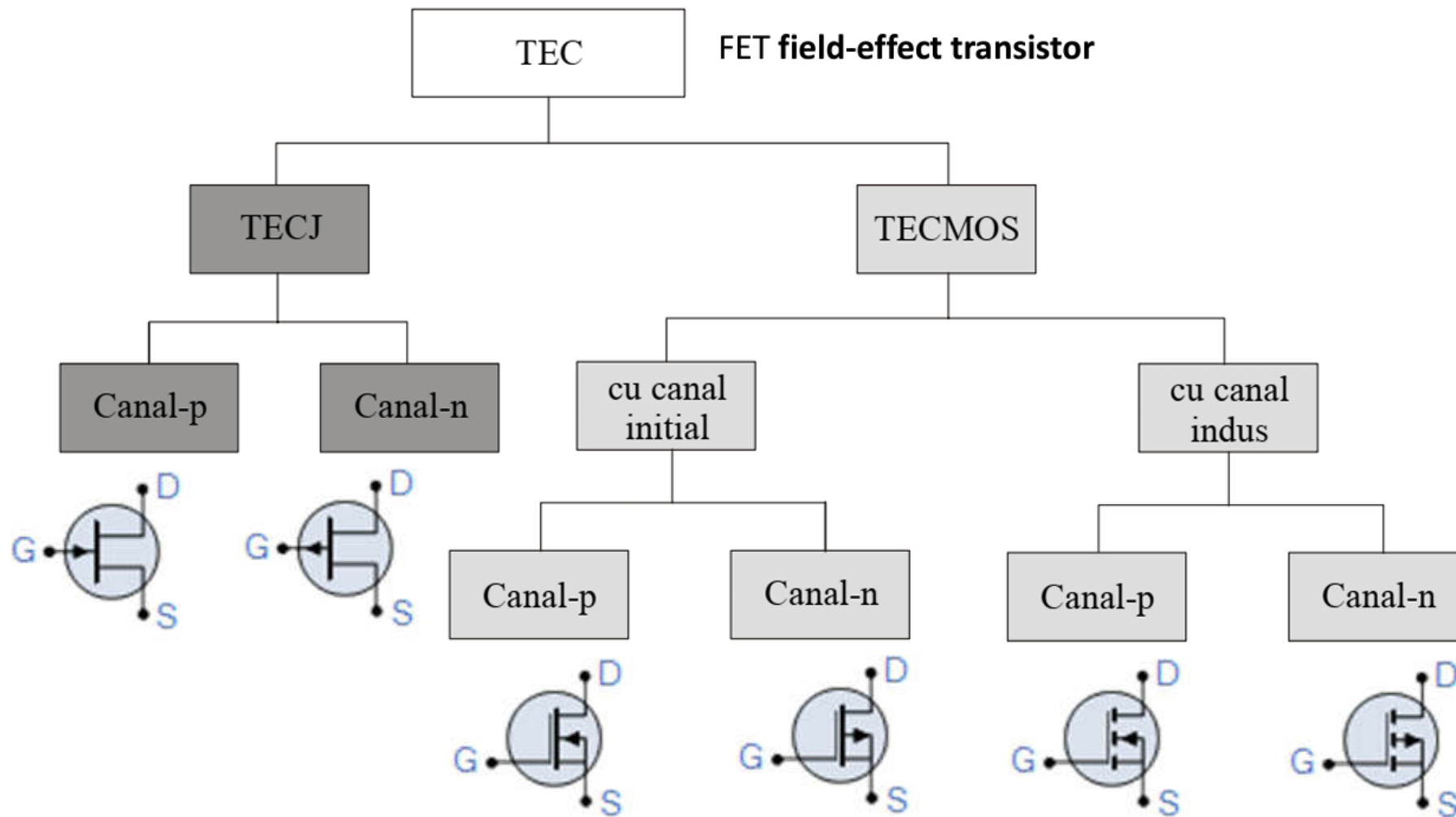


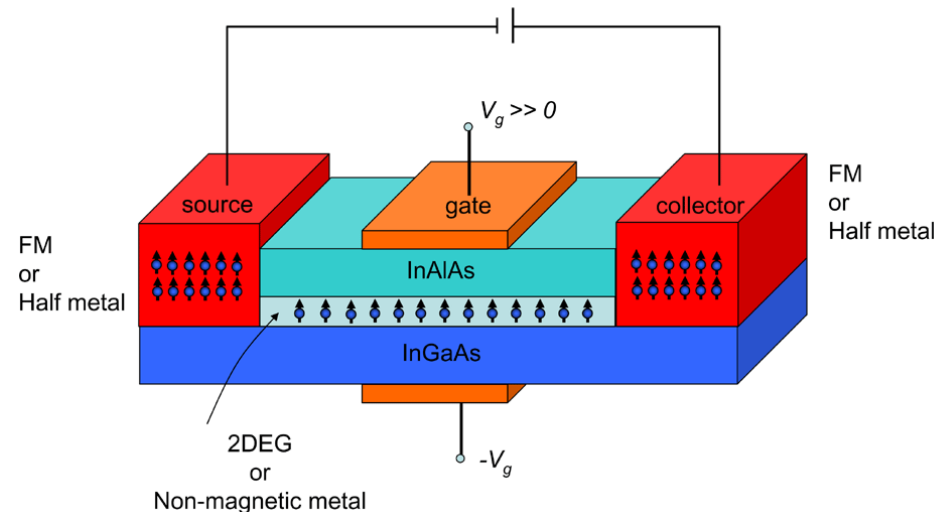
Diagrama tranzistorului cu efect de câmp



Polarizarea porții atât pentru tranzistorul cu efect de câmp cu jonctiune (JFET), cât și pentru tranzistorul cu efect de câmp metal-oxid-semiconductor (MOSFET):

Tranzistor cu efect de câmp cu joncțiune

- Tranzistorul cu efect de câmp cu joncțiune, sau JFET, este un dispozitiv semiconductor unipolar cu trei terminale, disponibil în configurații de canal-N și canal-P.
- În tutorialele *Tranzistor bipolar cu joncțiuni* am văzut cum curentul de colector de ieșire al tranzistorului este proporțional cu curentul de intrare care intră în terminalul Bază al dispozitivului, transformând astfel tranzistorul bipolar într-un dispozitiv operat în "CURENT" (model Beta) deoarece un curent mai mic poate fi utilizat pentru comutarea unui curent de sarcină mai mare.
- **Tranzistorul cu efect de câmp**, sau pur și simplu **FET**, utilizează tensiunea care este aplicată la terminalul lui de intrare, numit **Gate** (*poartă*) pentru a controla curentul care trece prin el, rezultând curentul de ieșire proporțional cu tensiunea de intrare. Deoarece funcționarea lor se bazează pe un câmp electric (de aici numele efect de câmp) generat de tensiunea de intrare a porții, acest lucru transformă **tranzistorul cu efect de câmp** într-un dispozitiv acționat în "TENSIUNE".



Tranzistor cu efect de câmp cu joncțiune

- **FET** este un dispozitiv semiconductor unipolar cu trei terminale, care are caracteristici foarte asemănătoare cu cele ale unui *tranzistor bipolar* omolog. De exemplu, eficiență ridicată, funcționare instantanee, robust și ieftin și poate fi utilizat în majoritatea aplicațiilor de circuite electronice pentru a înlocui tranzistoarele cu joncțiune bipolare (BJT) echivalente.
- FET poate fi făcut mult mai mic decât un tranzistor BJT echivalent și împreună cu consumul lor redus de putere și disiparea puterii le face ideale pentru utilizarea în circuite integrate, cum ar fi gama CMOS de cipuri logice digitale.
- FET este un dispozitiv cu trei terminale care este construit fără joncțiuni PN în calea principală de transport a curentului dintre terminalele **Drain** (drenă) și **Source** (sursă). Aceste terminale corespund, ca funcție, colectorului și respectiv emitorului tranzistorului bipolar. Calea curentului dintre aceste două terminale se numește "canal" care poate fi realizat fie dintr-un material semiconductor de tip P, fie dintr-unul de tip N.
- Controlul curentului care curge prin acest canal este obținut prin variația tensiunii aplicate porții. După cum sugerează și numele acestora, tranzistoarele bipolare sunt dispozitive "bipolare", deoarece funcționează cu ambele tipuri de purtători de sarcină, goluri și electroni. FET, pe de altă parte, este un dispozitiv "unipolar" care depinde doar de conducția electronilor (canal-N) sau a golurilor (canal P).
- **FET** are un avantaj major asupra tranzistorului bipolar standard, în sensul că impedanța lor de intrare (R_{in}) este foarte mare (mii de Ohmi), în timp ce la BJT este relativ scăzută. Această impedanță de intrare foarte mare le face foarte sensibile la semnalele de tensiune de intrare, dar prețul acestei sensibilități ridicate înseamnă, de asemenea, că pot fi ușor deteriorate de electricitatea statică.
- Există două tipuri principale de tranzistor cu efect de câmp, tranzistor cu efect de câmp cu **joncțiune** sau **JFET** și **tranzistor cu efect de câmp cu poartă-izolată** sau **IGFET**, care este cunoscut mai curând ca **tranzistor cu efect de câmp metal-oxid-semiconductor** sau **MOSFET**.

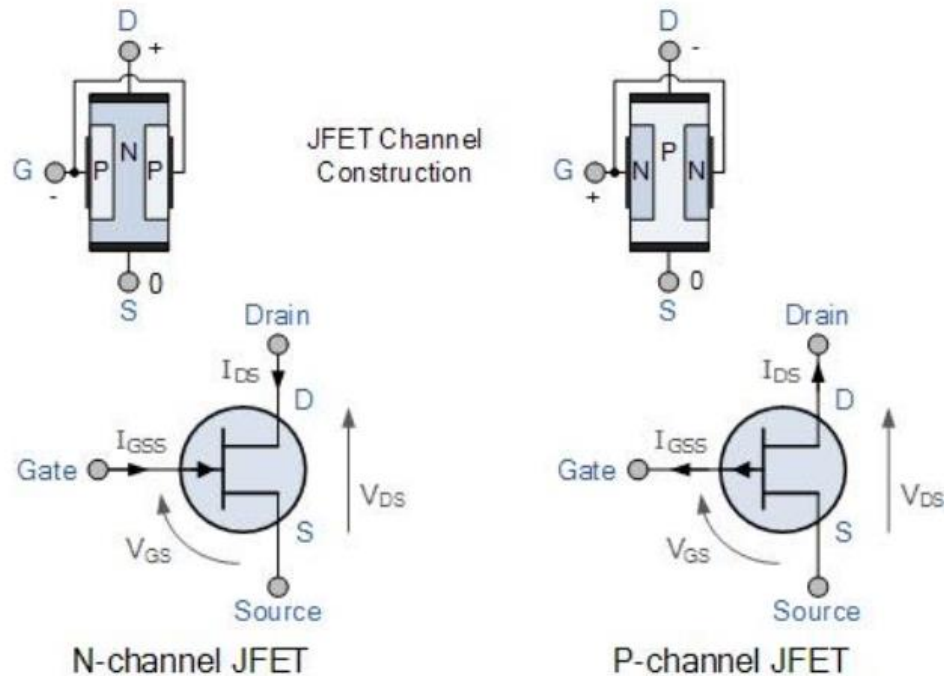


Tranzistor cu efect de câmp cu joncțiune

- Am văzut anterior că un tranzistor cu joncțiune bipolar este construit folosind două joncțiuni-PN în calea principală de transport a curentului între terminalele Emitor și Colector. **Tranzistorul cu efect de câmp cu joncțiune** (JUGFET sau JFET) nu are joncțiuni-PN ci are o bucată îngustă de material semiconductor de înaltă rezistivitate formând un „canal” de tip-N sau de tip-P de siliciu pentru ca purtătorii majoritari să curgă spre două conexiuni electrice ohmice la ambele capete, denumite în mod obișnuit **Drain** (drenă) și respectiv **Source** (sursă).
- Există două configurații de bază ale tranzistorului cu efect de câmp cu joncțiune, JFET cu canal-N și JFET cu canal-P. Canalul-N al JFET este dopat cu impurități donator, ceea ce înseamnă că fluxul de curent prin canal este negativ (de aici termenul canal-N) sub formă de electroni.
- De asemenea, canalul-P al JFET este dopat cu impurități acceptoare, ceea ce înseamnă că fluxul de curent prin canal este pozitiv (deci, termenul canal-P) sub formă de goluri. Canalul-N al JFET are o conductivitate mai mare (rezistență mai mică) decât tipul de canal-P echivalent, deoarece electronii au o mobilitate mai mare printr-un conductor în comparație cu golurile. Acest lucru face JFET-ul canal-N un conductor mai eficient în comparație cu omologul lui de canal P.
- Am spus anterior că există două conexiuni electrice ohmice la fiecare capăt al canalului numite Drenă și Sursă. Dar în cadrul acestui canal există o a treia conexiune electrică numită terminalul Poartă, iar aceasta poate fi de asemenea un material tip-P sau tip-N, care formează o joncțiune PN cu canalul principal.

Tranzistor bipolar (BJT)	Tranzistor cu efect de câmp (FET)
Emitor - (E) >> Sursă - (S)	
Bază - (B) >> Poartă - (G)	
Colector - (C) >> Drenă - (D)	

Tranzistor cu efect de câmp cu joncțiune



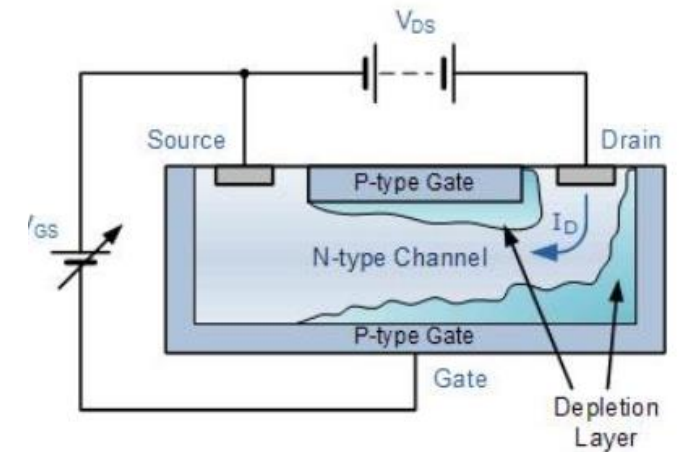
Tranzistor bipolar (BJT)	Tranzistor cu efect de câmp (FET)
	Emitor - (E) >> Sursă - (S)
	Bază - (B) >> Poartă - (G)
	Colector - (C) >> Drenă - (D)

Tranzistor cu efect de câmp cu joncțiune

- "Canalul" semiconductor al **tranzistorului cu efect de câmp cu joncțiune** este o cale rezistivă prin care o tensiune VDS determină o circulație de curent I_D și astfel tranzistorul cu efect de câmp cu joncțiune poate conduce curent la fel de bine în ambele direcții. Deoarece canalul este rezistiv în natură, un gradient de tensiune este astfel format în lungul canalului, această tensiune devenind mai puțin pozitivă pe măsură ce trecem de la terminalul Drenă la terminalul Sursă.
- Rezultatul este că joncțiunea-PN are, prin urmare, o polarizare inversă ridicată la terminalul Drenă și o polarizare inversă mai mică la terminalul Sursă. Această polarizare determină formarea unui "strat de epuizare" în interiorul canalului a cărui lățime crește cu polarizarea.
- Amplitudinea curentului care circulă prin canal între terminalele Drenă și Sursă este controlată de o tensiune aplicată terminalului **Gate** (poartă), care este polarizată invers. Într-un JFET cu canal-N această tensiune de poartă este negativă, în timp ce pentru JFET cu canal-P, tensiunea de poartă este pozitivă.
- Diferența principală dintre dispozitivele JFET și BJT este că atunci când joncțiunea JFET este polarizată invers, curentul de poartă este practic zero, în timp ce curentul de bază al BJT este întotdeauna o valoare mai mare ca zero.

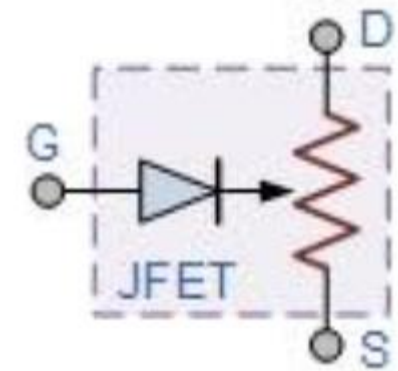
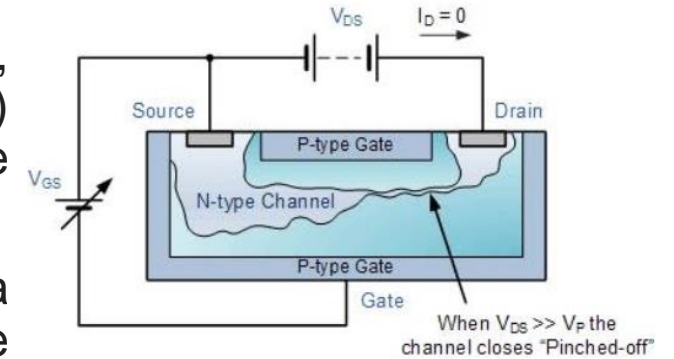
Polarizarea unui JFET cu canal-N

- Diagrama secțiunii transversale de mai sus prezintă un canal semiconductor de tip-N cu o regiune tip-P numită Poartă, difuzată în canalul tip-N care formează o jonctiune-PN polarizată invers și ea este jonctiunea care formează regiunea de epuizare din jurul zonei Porții când nu se aplică tensiuni externe. JFET-urile sunt, prin urmare, cunoscute ca dispozitive cu mod de epuizare.
- Această regiune de epuizare produce un gradient de potențial care are o grosime variabilă în jurul jonctiunii-PN și limitează curgerea curentului prin canal prin reducerea lățimii sale efective și astfel crescând rezistența globală a canalului însuși.
- Atunci, vedem că porțiunea cea mai epuizată a regiunii de epuizare se află între Poartă și Drenă, în timp ce zona cea mai puțin epuizată se află între Poartă și Sursă. Deci, canalul JFET-ului conduce cu tensiune de polarizare aplicată zero (adică, regiunea de epuizare are aproape lățime zero).
- Dacă nu există o tensiune externă a porții ($V_G = 0$) și o mică tensiune (V_{DS}) este aplicată între Drenă și Sursă, curentul de saturație maxim (I_{DSS}) va curge prin canal de la Drenă către Sursă limitat numai de zonă mică de epuizare din jurul jonctiunilor.
- În cazul în care o mică tensiune negativă ($-V_{GS}$) este acum aplicată la poartă, dimensiunea regiunii de epuizare începe să crească, reducând zona efectivă totală a canalului și reducând astfel curentul care curge prin acesta, un fel de efect de "strângere" are loc. Astfel, prin aplicarea unei tensiuni de polarizare inversă crește lățimea regiunii de epuizare, care, la rândul ei, reduce conducția canalului.
- Deoarece jonctiunea-PN este polarizată invers, un mic curent va curge în conexiunea porții. Pe măsură ce tensiunea de poartă ($-V_{GS}$) devine mai negativă, lățimea canalului scade până când nu mai curge curent între Drenă și Sursă, iar FET se spune că este "blocat" (similar cu regiunea cut-off pentru un BJT). Tensiunea la care canalul se închide este denumită "tensiune de blocare" (V_P -pinch-off voltage).



Blocarea canalului JFET

- Rezultatul este că FET acționează mai mult ca un rezistor controlat de tensiune, care are rezistență zero atunci când $V_{GS} = 0$ și rezistența maximă "ON" (R_{DS}) atunci când tensiunea Porții este foarte negativă. În condiții normale de funcționare, Poarta JFET este mereu negativă în raport cu Sursa.
- Este esențial ca tensiunea Porții să nu fie niciodată pozitivă, deoarece, dacă ea este, tot curentul din canal va curge la Poartă și nu la Sursă, rezultatul este deteriorarea JFET-ului.
- **Tranzistorul cu efect de câmp cu jonctiune canal-P** funcționează exact la fel ca și canalul-N de mai sus, cu următoarele excepții: 1). Curentul canalului este pozitiv datorită golurilor, 2). Polaritatea tensiunii de polarizare trebuie inversată.



Modelul JFET

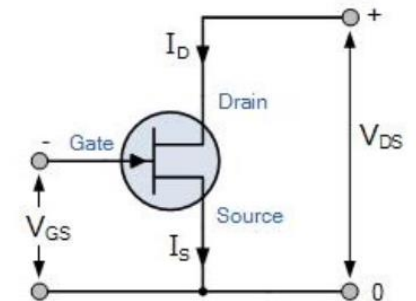
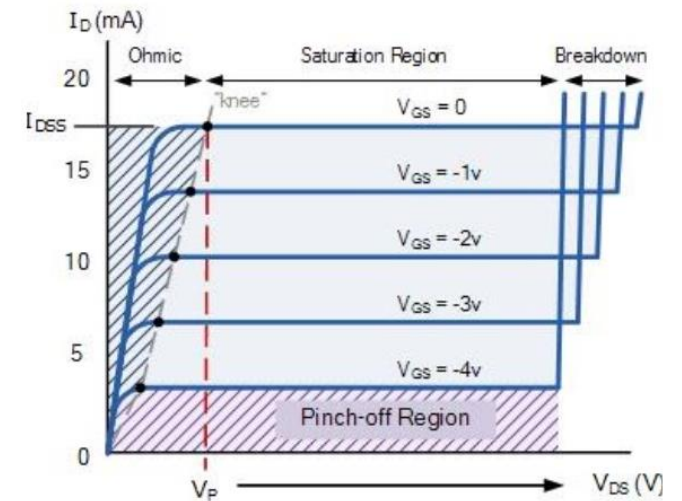
Curbele caracteristice de ieșire V-I ale unei joncțiuni tipice FET

Tensiunea V_{GS} aplicată la Poartă controlează curentul dintre terminalele Drenă și Sursă. V_{GS} se referă la tensiunea aplicată între Poartă și Sursă în timp ce V_{DS} se referă la tensiunea aplicată între Drenă și Sursă.

Deoarece un **tranzistor cu efect de câmp cu joncțiune** este un dispozitiv controlat de tensiune, "NU curge curent în poartă!" Atunci curentul de Sursă care iese din dispozitiv este egal cu curentul de Drenă care curge în el și deci $I_D = I_S$.

Exemplul curbelor caracteristice arătate mai sus, prezintă cele patru regiuni diferite de funcționare pentru un JFET și acestea sunt date de:

- *Regiunea ohmică* - Când $V_{GS} = 0$ stratul de epuizare al canalului este foarte mic și JFET acționează ca un rezistor controlat de tensiune.
- *Regiunea de tăiere cut-off* - Aceasta este cunoscută ca regiunea de blocare, unde tensiunea Porții V_{GS} este suficientă pentru a determina JFET să acționeze ca un circuit deschis, deoarece rezistența canalului este maximă.
- *Saturație sau regiunea activă* - JFET devine un bun conductor și este controlat de tensiunea **Gate-Source**, (V_{GS}), în timp ce tensiunea Drenă-Sursă (V_{DS}) are un efect redus sau de loc.
- *Regiunea de străpungere* - tensiunea între Drenă și Sursă (V_{DS}) este suficient de mare pentru a face canalul rezistiv al JFET să se străpungă și să treacă curentul maxim necontrolat.



Curentul de drenă în regiunea activă

- Curbele caracteristice pentru un tranzistor cu efect de câmp cu jonctiune canal-P sunt aceleași ca cele de mai sus, cu excepția curentului de Drenă I_D care scade cu creșterea tensiunii Poartă-Sursă pozitivă, V_{GS} .
- Curentul de Drenă este zero, atunci când $V_{GS} = V_P$. Pentru funcționarea normală, V_{GS} este polarizat să fie undeva între V_P și 0. Atunci putem calcula curentul de Drenă I_D pentru orice punct de polarizare dat în regiunea de saturație sau activă (

$$I_D = I_{DSS} \left[1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right]^2$$

Curentul de drenă în regiunea activă

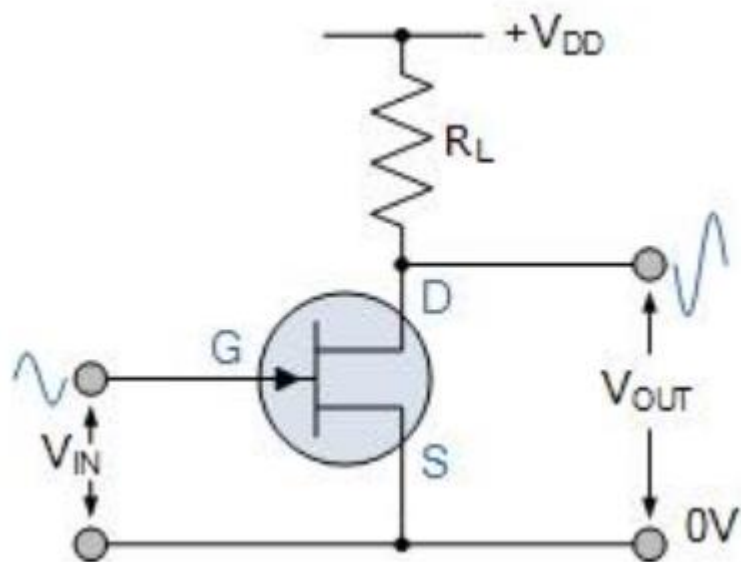
- Rețineți că valoarea curentului de Drenă va fi între zero (blocat) și I_{DSS} (curent maxim). Prin cunoașterea curentului de Drenă I_D și a tensiunii Drenă-Sursă V_{DS} , rezistența canalului este dată de:

$$R_{DS} = \frac{\Delta V_{DS}}{\Delta I_D} = \frac{1}{g_m}$$

unde: g_m este "câștigul de transconductanță" deoarece JFET este un dispozitiv controlat de tensiune, și reprezintă rata de schimbare a curentului de Drenă în raport cu variația tensiunii [Gate-Source](#).

Modele de FET

- Ca și tranzistorul cu joncțiune bipolar, tranzistorul cu efect de câmp este un dispozitiv cu trei terminale capabil de trei moduri diferite de funcționare și, prin urmare, poate fi conectat într-un circuit într-una din următoarele configurații.

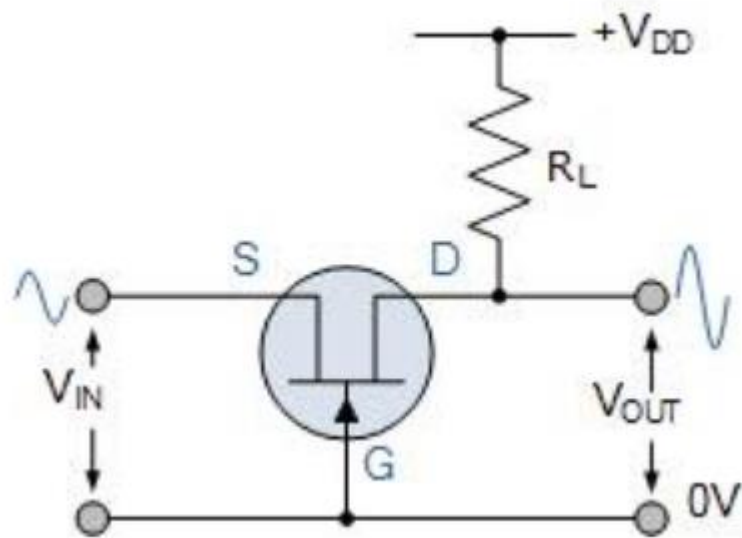


Configurația sursă comună (CS)

În configurația **Sursă-comună** (similară emitorului-comun), intrarea este aplicată Porții, iar ieșirea este preluată din Drenă așa cum este arătat. Acesta este modul cel mai obișnuit de funcționare a FET datorită impedanței sale mari de intrare și amplificării de tensiune bună, iar amplificatoarele cu Sursă comună sunt utilizate pe scară largă.

Modul Sursă-comună de conectare al FET este folosit, în general, în amplificatoare de frecvență audio și în preamplificatoare și etaje cu impedanță de intrare mare. Fiind un circuit de amplificare, semnalul de ieșire este "defazat" cu 180° de intrare.

Modele de FET

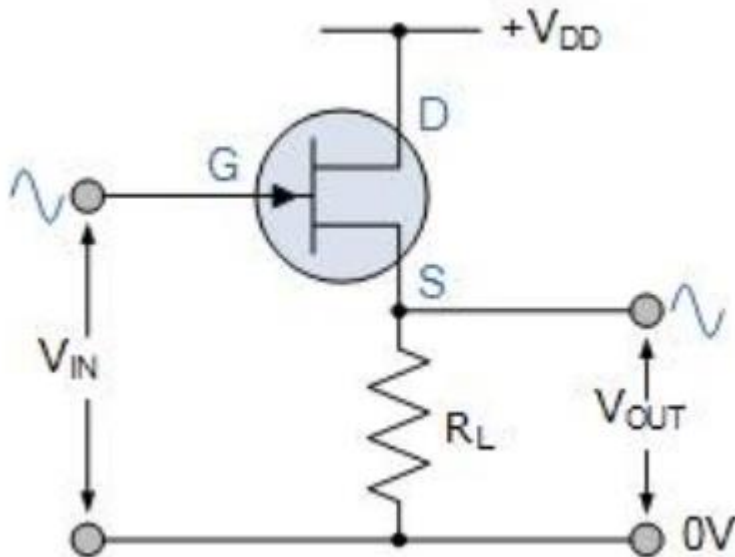


Configurația poartă comună (CG)

În configurația **Poartă-comună** (similară cu baza-comună), intrarea este aplicată Sursei și ieșirea este preluată din Drenă cu Poarta conectată direct la masă (0V) așa cum se arată. Caracteristica de impedanță ridicată de intrare a conexiunii anterioare este pierdută în această configurație, deoarece poarta comună are o impedanță redusă de intrare, dar o impedanță de ieșire mare.

Acest tip de configurație FET poate fi utilizat în circuite de înaltă frecvență sau în circuite de adaptare de impedanță unde o impedanță de intrare scăzută trebuie să fie adaptată la o impedanță de ieșire mare. Ieșirea este "în fază" cu intrarea.

Modele de FET



Configurația drenă comună (CD)

În configurația **Drenă-comună** (similară cu colector-comun), intrarea este aplicată Porții, iar ieșirea este preluată de la Sursă. Configurația drenă-comună sau "repetor pe Sursă" are o impedanță de intrare ridicată și o impedanță de ieșire scăzută și un câștig de tensiune aproape de unitate, deci este folosită în amplificatoarele buffer. Câștigul de tensiune al configurației repetorului pe sursă este mai mic decât unitatea, iar semnalul de ieșire este "în fază", 0° cu semnalul de intrare.

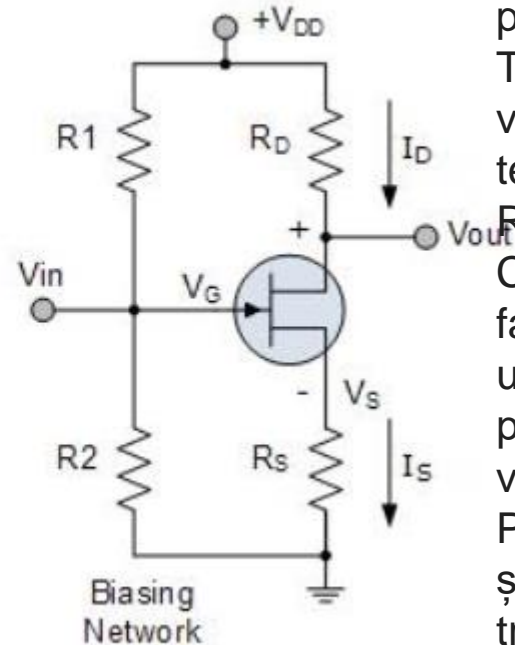
Acest tip de configurație este denumit "Drenă-comună" deoarece nu există semnal disponibil la conexiunea Drenă, tensiunea prezentă $+V_{DD}$ oferă doar o polarizare. Ieșirea este în fază cu intrarea.

Amplificator JFET

La fel ca și tranzistorul cu joncțiune bipolar, JFET pot fi folosit pentru a realiza circuite amplificatoare de clasă A cu un singur etaj cu amplificator JFET cu Sursă-comună, caracteristicile fiind foarte asemănătoare circuitului BJT cu emitor comun. Amplificatoarele JFET au ca avantaj principal, față de amplificatoarele BJT, impedanța lor ridicată de intrare, care este controlată de rețeaua rezistivă de polarizare a porții, formată de R1 și R2 așa cum se arată.

Polarizarea unui amplificator JFET

$$V_S = I_D R_S = \frac{V_{DD}}{4}$$
$$V_S = V_G - V_{GS}$$
$$V_G = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) V_{DD}$$
$$I_D = \frac{V_S}{R_S} = \frac{V_G - V_{GS}}{R_S}$$



Acest circuit amplificator cu Sursă-comună (CS) este polarizat în modul de clasă "A" de rețeaua divizoare de tensiune formată de rezistențele R1 și R2. Tensiunea pe rezistorul sursei R_S este în general stabilită să fie aproximativ un sfert din V_{DD} , ($V_{DD}/4$), dar poate fi orice valoare rezonabilă.

Tensiunea necesară de poartă poate fi apoi calculată din această valoare R_S . Deoarece curentul porții este zero ($I_G = 0$) putem seta tensiunea statică DC dorită prin selectarea corectă a rezistoarelor R1 și R2.

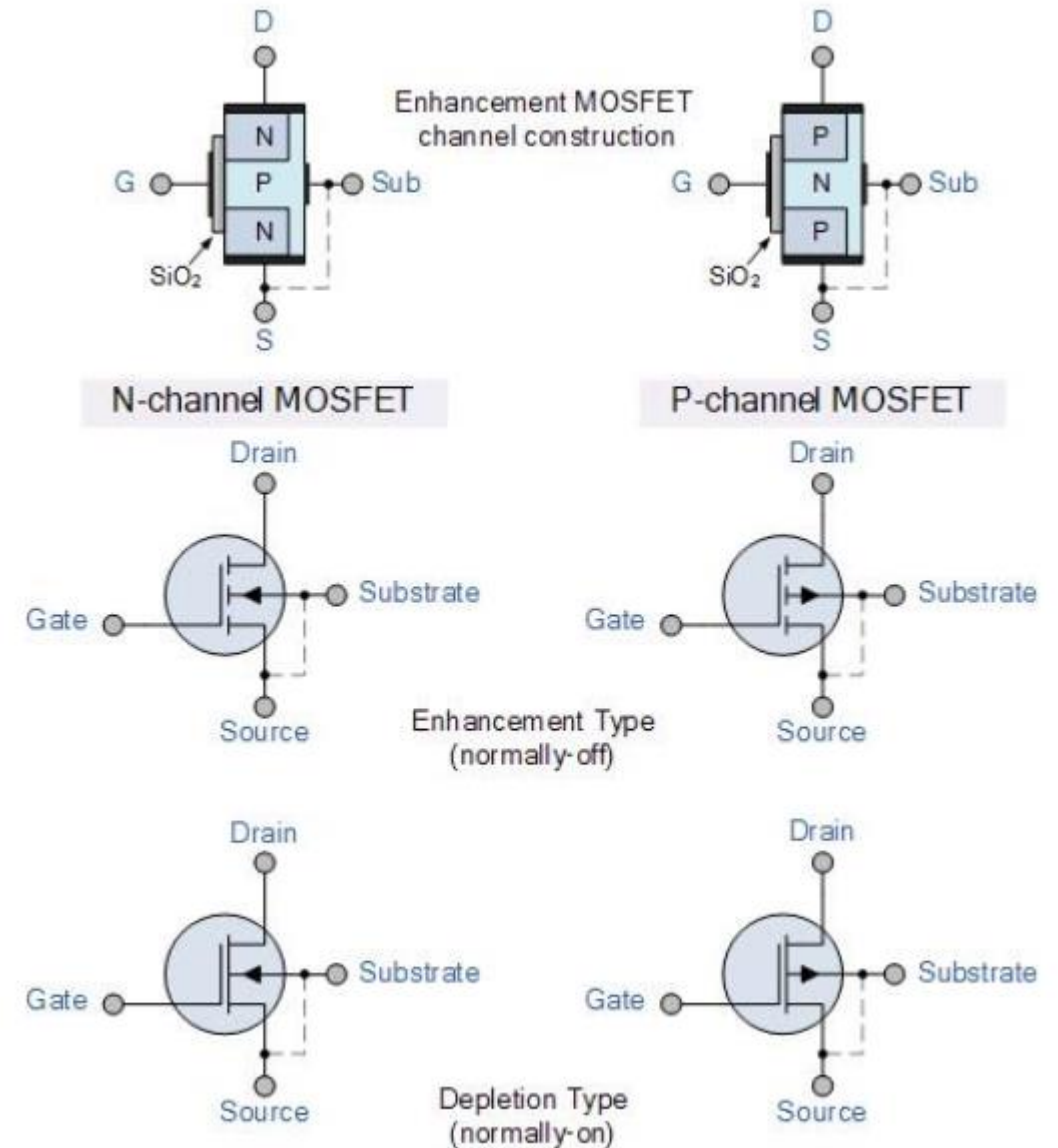
Controlul curentului de Drenă printr-un potențial negativ al porții face ca **tranzistorul cu efect de câmp cu joncțiune** să fie util ca un comutator și este esențial ca tensiunea porții să nu fie niciodată pozitivă pentru un JFET cu canal-N, deoarece curentul din canal va curge către poartă și nu la Drenă, ducând la deteriorarea JFET. Principiile de operare pentru un JFET cu canal-P sunt aceleași ca și pentru JFET cu canal-N, cu excepția că polaritatea tensiunilor trebuie inversată.

MOSFET

- Pe lângă tranzistorul cu efect de câmp cu joncțiune (JFET), există un alt tip de FET, a cărui intrare (**Gate**) este izolat electric de canalul principal de transport al curentului și, prin urmare, este denumit **tranzistor cu efect de câmp cu poartă izolată**.
- Cel mai obișnuit tip de FET cu poartă izolată, utilizat în multe tipuri diferite de circuite electronice se numește **Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor** sau **MOSFET** pe scurt.
- **IGFET** sau **MOSFET** este un tranzistor cu efect de câmp controlat în tensiune, care diferă de la un JFET prin aceea că acesta are un electrod poartă „metal-oxid“ care este izolat electric de canalul principal semiconductor n sau p printr-un strat foarte subțire de material izolant de obicei dioxid de siliciu, cunoscut sub numele de sticlă.
- Acest electrod de poartă din metal ultra-subțire izolat poate fi considerat ca o singură placă a unui condensator. Izolarea porții de control face rezistența de intrare a **MOSFET** extrem de mare, până în regiunea Megohmilor ($M\Omega$), făcând-o aproape infinită.
- Deoarece terminalul Gate este izolat electric de canalul de transport principal al curentului dintre Drenă și Sursă "Nici-un curent nu curge în poartă" și la fel ca JFET, MOSFET acționează ca un rezistor controlat de tensiune unde curentul care curge prin canalul principal între Drenă și Sursa este proporțional cu tensiunea de intrare. Ca și JFET, rezistența de intrare a MOSFET, foarte mare, poate cu ușurință să acumuleze cantități mari de sarcină statică, rezultând că MOSFET va deveni ușor de deteriorat dacă nu este manevrat cu grijă sau protejat.

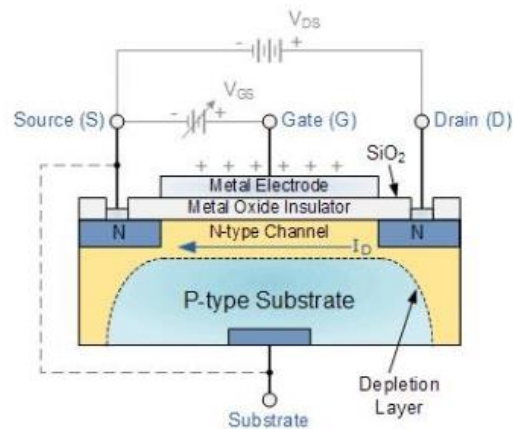
MOSFET

- Ca și tutorialul precedent JFET, MOSFET-urile sunt dispozitive cu trei terminale **Gate**, **Drain** și **Source** și sunt valabile ambele MOSFET-uri cu canal-P (PMOS) și canal-N (NMOS). Principala diferență de data aceasta este că MOSFET-urile sunt disponibile în două forme de bază:
- Tip *epuizare* (sărăcire) - tranzistorul necesită tensiunea **Gate-Source** (VGS) pentru a comuta dispozitivul "OFF". Modul de epuizare MOSFET este echivalent cu un comutator "normal închis".
- Tip *îmbunătățire* - tranzistorul necesită o tensiune **Gate-Source** (VGS) pentru a comuta dispozitivul "ON". Modul de îmbunătățire MOSFET este echivalent cu un comutator "normal deschis".
- Cele patru simboluri MOSFET de mai sus prezintă un terminal suplimentar numit Substrat și nu este folosit în mod obișnuit ca o conexiune de intrare sau de ieșire, ci este utilizat pentru împământarea substratului. Se conectează la canalul semiconductor principal printr-o joncțiune diodă pe carcasa metalică sau pe capul metalic al MOSFET-ului.
- De obicei, în MOSFET-uri de tip discret, acest cablu de substrat este conectat intern la terminalul Sursă. În acest caz, ca și în cazul tipurilor de îmbunătățire, este omis din simbol pentru clarificare.
- Linia din simbolul MOSFET dintre conexiunile Drenă și Sursă reprezintă canalul semiconductor. Dacă aceasta este o linie solidă neîntreruptă, atunci aceasta reprezintă un MOSFET de tip "epuizare" (normal-ON) deoarece curentul de Drenă poate circula cu potențial zero de polarizare a Porții.
- Dacă linia de canal este afișată punctată sau întreruptă, atunci este un MOSFET de tip "Enhancement" (normal-OFF) deoarece nu circulă curent de Drenă cu potențial zero de poartă. Direcția săgeții indică dacă canalul conductor este un dispozitiv semiconductor de tip-P sau de tip-N.



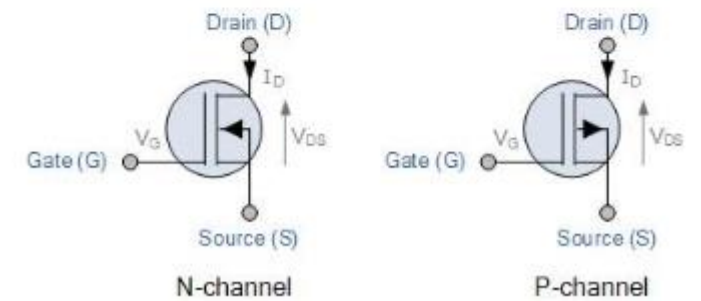
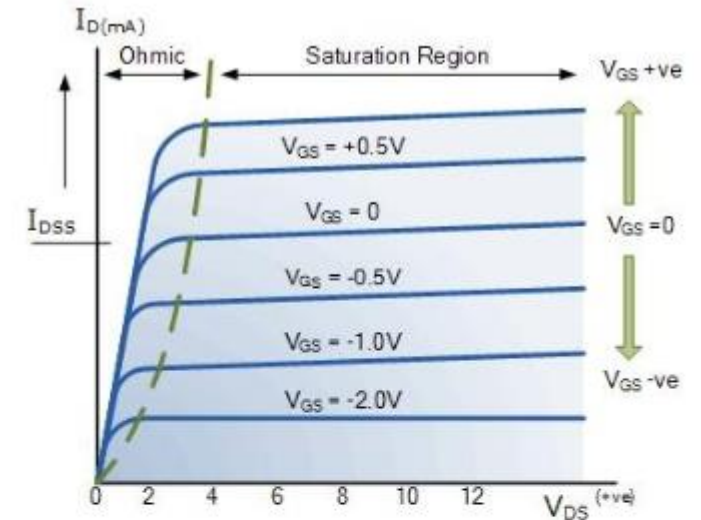
Structura și simbolul MOSFET-ului

- Construcția MOSFET este foarte diferită de cea a Junction FET. Atât MOSFET-urile de tip *Depletion* (epuizare), cât și cele de tip *Enhancement* (îmbunătățire) utilizează un câmp electric produs de o tensiune a porții pentru a modifica fluxul purtătorilor de sarcină, electronii pentru canal-N sau golurile pentru canalul-P, prin canalul Drenă-Sursă semiconductor. Electroful Poartă este plasat pe partea superioară a unui strat izolator foarte subțire și există o pereche de regiuni mici de tip-N chiar sub electrozii Drenă și Sursă.
- Am văzut în tutorialul anterior că poarta unui tranzistor cu efect de câmp cu joncțiune JFET trebuie să fie polarizată în așa fel încât să polarizeze invers joncțiunea-PN. Cu un dispozitiv MOSFET cu poarta izolată nici o astfel de limitare nu se aplică astfel încât este posibil să se polarizeze poarta unui MOSFET fie în polaritate pozitivă (+ve) fie negativă (-ve).
- Acest lucru face ca dispozitivul MOSFET să fie deosebit de valoros ca comutatoare electronice sau să facă porți logice, deoarece fără nici o polarizare acestea sunt în mod normal neconductoare și această rezistență ridicată la intrarea poartă înseamnă că este foarte puțin sau deloc curent de control, deoarece MOSFET-urile sunt dispozitive controlate de tensiune. Atât MOSFET-urile cu canal-P cât și cu canal-N sunt disponibile în două forme de bază, tipul de **îmbunătățire** și tipul de **epuizare**.



MOSFET - mod epuizare (Depletion)

- **MOSFET mod-epuizare**, care este mai puțin frecvent decât tipurile mod îmbunătățire este, în mod normal, pornit „ON” (conducând) fără aplicarea unei tensiuni de polarizare pe poartă. Canalul conduce atunci când $V_{GS} = 0$, făcând un dispozitiv "normal închis". Simbolul de circuit prezentat mai sus pentru un tranzistor MOS de epuizare utilizează o linie de canal solid pentru a semnala un canal conductor normal închis.
- Pentru tranzistorul MOS cu epuizare canal-N, o tensiune negativă poartă-sursă $-V_{GS}$ va epuiza (de aici numele său) canalul conductor al electronilor liberi, comutând tranzistorul "OFF". De asemenea, pentru un tranzistor MOS cu epuizare canal-P, o tensiune pozitivă poartă-sursă $+V_{GS}$ va epuiza canalul golurilor sale libere, comutându-l "OFF".
- Cu alte cuvinte, pentru un MOSFET mod de epuizare canal-N: $+V_{GS}$ înseamnă mai mulți electroni și mai mult curent. În timp ce $-V_{GS}$ înseamnă mai puțini electroni și mai puțin curent. Opusul este valabil și pentru tipurile de canal-P. Deci, MOSFET mod epuizare este echivalent cu un comutator "normal închis".
- MOSFET-ul mod epuizare este construit în mod similar cu omologii săi de tranzistor JFET, deoarece canalul Drenă-Sursă este în mod inerent conductiv cu electronii și golurile deja prezente în canalul de tip-N sau-P. Acest dopaj al canalului produce o cale de conducție cu rezistență scăzută între Drenă și Sursă cu polarizare zero a porții.

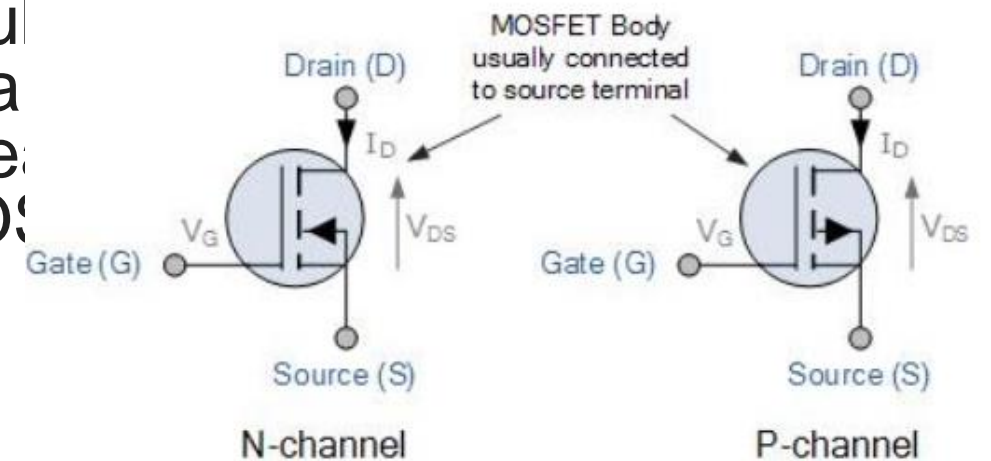
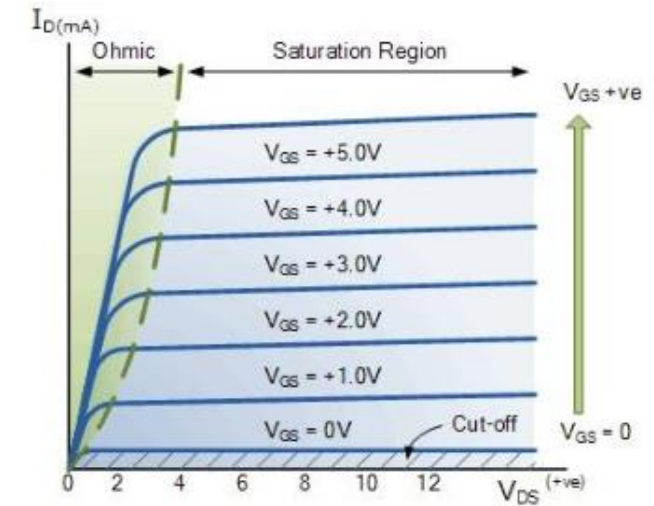


MOSFET mod îmbunătățit

- Cel mai obișnuit **MOSFET mod îmbunătățit**, sau **eMOSFET**, este invers tipului de mod epuizare. Aici canalul de conducție este ușor dopat sau chiar nedopat, făcându-l ne-conductiv. Dispozitivul este în mod normal "**OFF**" (neconductor) atunci când tensiunea de polarizare a porții VGS este egală cu zero. Simbolul de circuit prezentat mai sus pentru un tranzistor MOS îmbunătățit utilizează o linie de canal întreruptă pentru a indica un canal neconductor normal deschis.
- Pentru tranzistorul MOS îmbunătățit cu canal-N, un curent de Drenă va curge numai când o tensiune de poartă (VGS) aplicată la terminalul porții este mai mare decât nivelul pragului de tensiune (VTH) în care are loc conductanța, făcându-l un dispozitiv de transconductanță.
- Aplicarea unei tensiuni de poartă pozitive (+ve) la un eMOSFET de tip-N atrage mai mulți electroni spre stratul de oxid din jurul porții, măbind astfel sau îmbunătățind (de unde numele său) grosimea canalului, permițând curgerea unui curent mai mare. Acesta este motivul pentru care acest tip de tranzistor se numește un dispozitiv cu mod de îmbunătățire, deoarece aplicarea unei tensiuni de poarta îmbunătățește canalul.
- Creșterea acestei tensiuni pozitive a porții va determina scăderea rezistenței canalului, determinând o creștere a curentului de Drenă ID prin canal. Cu alte cuvinte, pentru un MOSFET mod îmbunătățire canal-N: +VGS comută tranzistorul "**ON**", în timp ce un zero sau -VGS comută tranzistorul "**OFF**". Astfel, MOSFET cu mod îmbunătățire este echivalent cu un comutator "normal deschis".
- Reversul este valabil pentru tranzistorul MOS mod îmbunătățire canal-P. Când VGS = 0 dispozitivul este "**OFF**" și canalul este deschis. Aplicarea unei tensiuni negative (-ve) pe poarta eMOSFET de tip-P îmbunătățește conductivitatea canalului comutându-l "**ON**". Deci, pentru un MOS mod îmbunătățire canal-P: + VGS comută tranzistorul "**OFF**", în timp ce -VGS comută tranzistorul "**ON**".

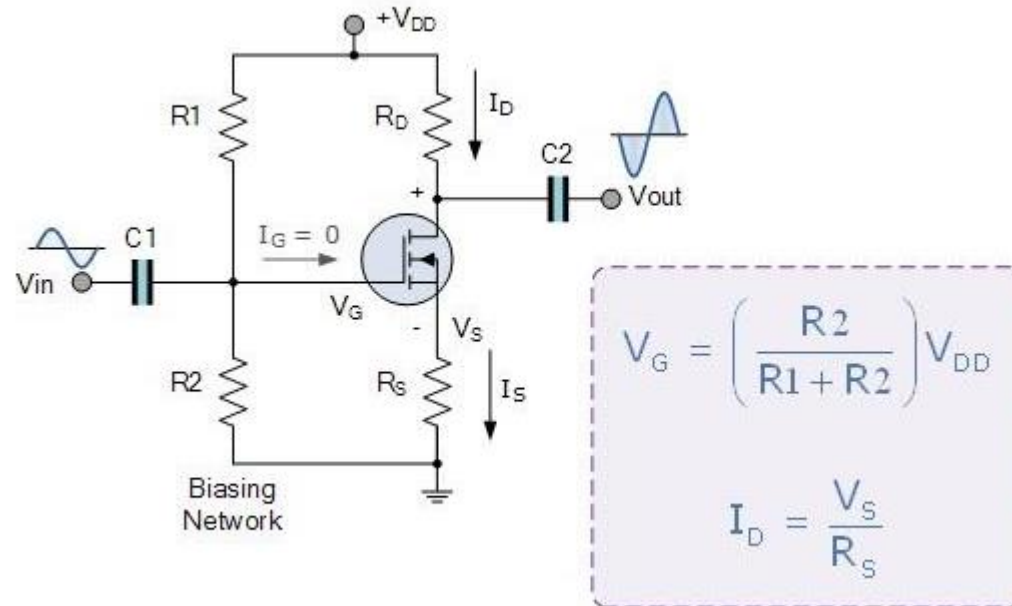
MOSFET mod îmbunătățire canal-N și simbolurile circuitului

- MOSFET-urile mod îmbunătățit fac comutatoare electronice excelente datorită rezistenței la scăzute la **ON** și rezistenței extrem de înalte "OFF", precum și rezistenței lor de intrare infinite de mari datorită porții izolate. MOSFET-urile mod îmbunătățit sunt utilizate în circuite integrate pentru a produce *porți logice* de tip CMOS și circuite de comutare a puterii sub formă de porți PMOS (canal-P) și NMOS (canal N). CMOS vine de la *MOS complementar*, ceea ce înseamnă că dispozitivul logic are atât PMOS cât și NMOS în cadrul schemei sale.



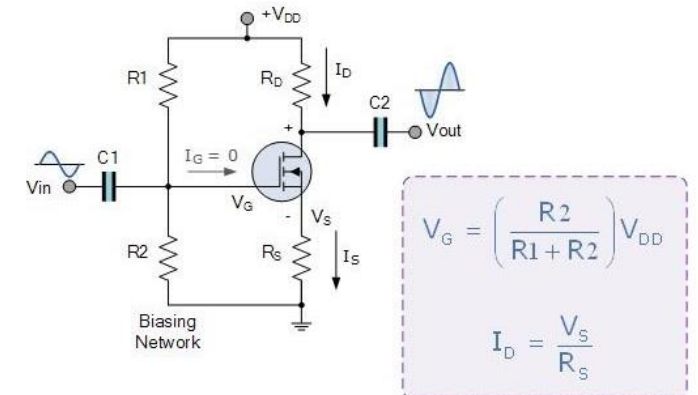
Amplificator MOSFET

- La fel ca și precedentul JFET, MOSFET-urile pot fi folosite pentru a realiza circuite amplificatoare de clasă "A" cu un singur etaj, cel mai popular circuit fiind amplificatorul MOSFET cu sursă comună, mod îmbunătățit, canal-N. Amplificatoarele MOSFET mod epuizare sunt foarte similare cu amplificatoarele JFET, cu excepția faptului că MOSFET are o impedanță de intrare mult mai mare.
- Impedanța mare de intrare este controlată de rețeaua rezistivă de polarizare a porții, formate de R1 și R2. Semnalul de ieșire pentru amplificatorul MOSFET sursă-comună, mod îmbunătățire este inversat, deoarece atunci când VG este **Low** tranzistorul este comutat "**OFF**" și VD (Vout) este **High**. Când VG este **High**, tranzistorul este comutat "**ON**" și VD (Vout) este **Low**, așa cum este arătat.



Amplificator MOSFET

- Polarizarea DC a acestui circuit amplificator MOSFET cu sursă comună (CS) este practic identică cu cea a amplificatorului JFET. Circuitul MOSFET este polarizat în modul de clasă A de rețeaua divizoare de tensiune formată din rezistoarele R1 și R2. Rezistența de intrare AC este dată de $R_{IN} = R_G = 1M\Omega$.
- MOSFET este un dispozitiv activ cu trei terminale, fabricat din materiale semiconductoare diferite, care poate acționa ca un izolator sau ca un conductor prin aplicarea unei tensiuni mici de semnal.
- Abilitatea MOSFET-ului de a schimba între aceste două stări îi permite să aibă două funcții de bază: "comutare" (electronică digitală) sau "amplificare" (electronică analogică). Deci, MOSFET-urile au capacitatea de a opera în trei regiuni diferite:
 1. *Regiunea Cut-off* - cu $V_{GS} < V_{prag}$, tensiunea poartă-sursă este mult mai mică decât tensiunea de prag a tranzistorului, astfel încât tranzistorul MOSFET este comutat "complet OFF", deci $I_D = 0$, tranzistorul acționând ca un comutator deschis.
 2. *Regiunea liniară (Ohmică)* - cu $V_{GS} > V_{prag}$ și $V_{DS} < V_{GS}$, tranzistorul se află în regiunea de rezistență constantă și se comportă ca o rezistență controlată de tensiune a cărei valoare rezistivă este determinată de tensiunea de poartă, nivelul V_{GS} .
 3. *Regiunea de saturație* - cu $V_{GS} > V_{prag}$, tranzistorul se află în regiunea s "complet ON". Curentul de drenă $I_D = \text{maxim}$, cu tranzistorul acționând ca un con



Rezumat MOSFET

- **MOSFET** are o rezistență extrem de mare la poarta de intrare, curentul care curge prin canal între sursă și drenă fiind controlat de tensiunea porții. Datorită acestei impedanțe ridicate de intrare și a câștigului, MOSFET-urile pot fi ușor deteriorate de electricitatea statică dacă nu sunt protejate sau manevrate cu grijă.
- **MOSFET-urile** sunt ideale pentru utilizarea ca **switch**-uri electronice sau ca amplificatoare cu sursă-comună deoarece consumul lor de putere este foarte mic. Aplicațiile tipice pentru MOSFET sunt în microprocesoare, memorii, calculatoare și porți logice CMOS etc.
- De asemenea, observați că o linie punctată sau întreruptă în cadrul simbolului indică un tip de îmbunătățire în mod normal "**OFF**", care arată că curentul "NU" poate curge prin canal atunci când este aplicată tensiune poartă-sursă VGS zero.
- O linie continuă neîntreruptă în cadrul simbolului indică un tip de epuizare în mod normal "**ON**", care arată că "POATE" curge curent prin canal cu tensiune zero a porții. Pentru tipurile de canal P, simbolurile sunt exact la fel pentru ambele tipuri, cu excepția faptului că săgeata indică spre exterior. Acest lucru poate fi rezumat în următorul tabel de comutare.
- Deci, pentru MOSFET-uri de tip îmbunătățire canal-N, o tensiune pozitivă a porții comută tranzistorul "ON" și cu tensiune zero de poartă, tranzistorul va fi "OFF". Pentru MOSFET tip îmbunătățire cu canal-P, o tensiune negativă a porții va comuta "ON" tranzistorul și cu zero tensiune de poartă, tranzistorul va fi "OFF". Punctul de tensiune la care MOSFET începe să treacă curentul prin canal este determinat de tensiunea de prag V_{TH} a dispozitivului.

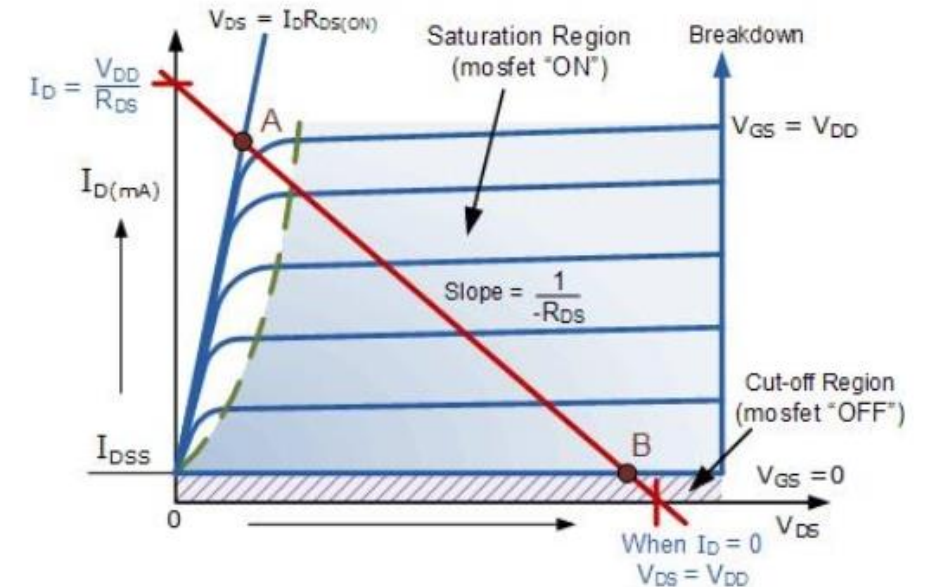
Tip MOSFET	$V_{GS} = +ve$	$V_{GS} = 0$	$V_{GS} = -ve$
Canal-N de epuizare	ON	ON	OFF
Canal-N îmbunătățire	ON	OFF	OFF
Canal-P epuizare	OFF	ON	ON
Canal-P îmbunătățire	OFF	OFF	ON

MOSFET - comutator

- MOSFET-urile fac comutatoare electronice foarte bune pentru controlul sarcinilor și în circuitele digitale CMOS deoarece funcționează între regiunile lor de tăiere și saturație.
- De asemenea, am văzut că, datorită acestei rezistențe de intrare foarte mari, putem pune în paralel, în siguranță, împreună multe MOSFET-uri diferite până când vom atinge capacitatea de manevrare a curentului cerută.
- În timp ce conectăm împreună diferite MOSFET-uri în paralel ne-ar putea permite să comutăm sarcini de curenți mari sau înaltă tensiune, dar acest lucru devine costisitor și impracticabil atât în componente, cât și în spațiul plăcilor de circuit. Pentru a depăși această problemă au fost dezvoltate **Power FET**-uri.
- Știm acum că există două diferențe principale între tranzistoarele cu efect de câmp, modul de epuizare numai pentru JFET și modurile de îmbunătățire și de epuizare pentru MOSFET-uri. În acest tutorial ne vom uita la utilizarea *MOSFET în modul de îmbunătățire ca un **Switch*** deoarece aceste tranzistoare necesită o tensiune de poartă pozitivă pentru a comuta "**ON**" și o tensiune zero pentru a comuta "**OFF**", făcându-le ușor de înțeles ca întrerupătoare și, de asemenea, ușor de interfațat cu porți logice.
- Funcționarea MOSFET-ului cu mod-**enhancement**, sau e-MOSFET, poate fi descrisă cel mai bine utilizând curbele caracteristice I-V prezentate mai jos. Când tensiunea de intrare (VIN) la poarta tranzistorului este zero, MOSFET-ul conduce practic fără curent, iar tensiunea de ieșire (VOUT) este egală cu tensiunea de alimentare VDD. Deci, MOSFET este "**OFF**" care operând în regiunea sa "**cut-off**".

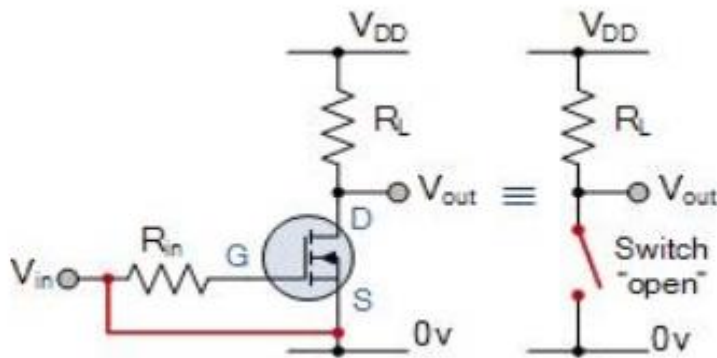
Curbe caracteristice MOSFET

- Tensiunea minimă a porții de stare-ON, necesară pentru a se asigura că MOSFET rămâne "ON" când se transportă curentul de drenă selectat, poate fi determinată din curbele de transfer V-I de mai sus. Când VIN este HIGH sau egal cu VDD, punctul Q al MOSFET se deplasează în punctul A de-a lungul liniei de sarcină.
- Curentul de drenă ID crește la valoarea maximă datorită reducerii rezistenței canalului. ID devine o valoare constantă independentă de VDD și depinde numai de VGS. Prin urmare, tranzistorul se comportă ca un comutator închis, dar rezistența-ON a canalului nu se reduce complet la zero datorită valorii lui RDS(on), dar devine foarte mică.
- De asemenea, când VIN este LOW sau redusă la zero, punctul Q al MOSFET se deplasează de la punctul A la punctul B de-a lungul liniei de sarcină. Rezistența canalului este foarte mare, astfel încât tranzistorul acționează ca un circuit deschis și nu trece curent prin canal.



Regiunea de tăiere

- Aici, condițiile de funcționare ale tranzistorului sunt tensiunea porții de intrare zero (V_{in}), curentul de drenă I_D zero și tensiunea de ieșire $V_{DS} = V_{DD}$. Prin urmare, pentru un MOSFET de tip îmbunătățit, canalul conductiv este închis și dispozitivul este comutat "OFF".

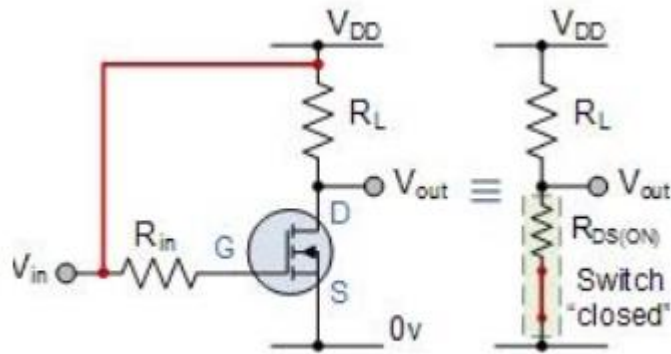


- Intrarea și Poarta sunt împământate (0 V)
- Tensiunea poartă-sursă mai mică decât tensiunea de prag $V_{GS} < V_{TH}$
- MOSFET este "OFF" (regiunea de tăiere)
- Nu există circulație a curentului de drenă ($I_D = 0$ A)
- $V_{OUT} = V_{DS} = V_{DD} = "1"$
- MOSFET funcționează ca un "comutator deschis"

Atunci putem defini regiunea **cut-off** sau "modul **OFF**" când folosim un e-MOSFET ca întrerupător cu tensiunea de poartă $V_{GS} < V_{TH}$ și $I_D = 0$. Pentru un MOSFET îmbunătățit cu canal-P, potențialul Porții trebuie să fie mai pozitiv în raport cu Sursa.

Regiunea de saturație

- În regiunea de saturație sau liniară, tranzistorul va fi polarizat astfel încât să se aplice valoarea maximă a tensiunii de poartă pe dispozitiv, care are ca rezultat rezistența canalului $R_{DS(ON)}$ cât mai mică posibil cu curentul maxim de drenă care curge prin comutatorul MOSFET. Prin urmare, pentru MOSFET tip îmbunătățit, canalul conductor este deschis și dispozitivul este comutat "ON".



- Intrarea și poarta sunt conectate la V_{DD}
- Tensiunea poartă-sursă este mult mai mare decât tensiunea de prag $V_{GS} > V_{TH}$
- MOSFET este "ON" (regiunea de saturare)
- debit max. pt. curent de drenă ($I_D = V_{DD}/R_L$)
- $V_{DS} = 0$ V (saturație ideală)
- Rezistență minimă a canalului $R_{DS(ON)} < 0,1 \Omega$
- $V_{OUT} = V_{DS} \cong 0,2$ V din cauza lui $R_{DS(ON)}$
- MOSFET funcționează ca un întrerupător închis

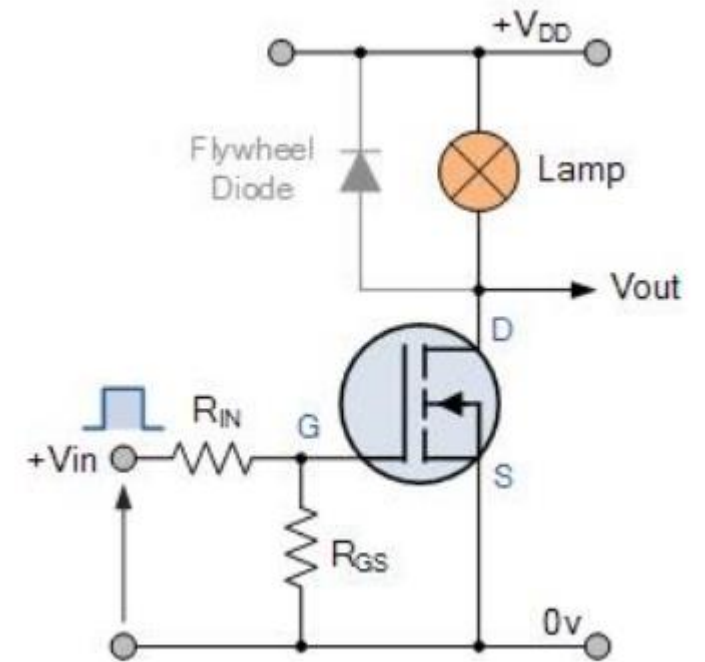
Un exemplu de utilizare a MOSFET ca switch

În acest aranjament de circuit se utilizează un MOSFET cu mod îmbunătățit canal-N pentru a comuta o lampă simplă "ON" și "OFF" (ar putea fi și un LED). Tensiunea de intrare pe poartă V_{GS} este luată la un nivel de tensiune pozitivă adecvat pentru a comuta dispozitivul și, prin urmare, sarcina lampă fie "ON", ($V_{GS} = +ve$), fie la nivel de tensiune zero care comută dispozitivul "OFF" ($V_{GS} = 0 V$).

Dacă sarcina rezistivă a lămpii ar trebui înlocuită cu o sarcină inductivă, cum ar fi o bobină, un solenoid sau un releu, ar fi necesară o "diodă supresoare" în paralel cu sarcina pentru a proteja MOSFET-ul de orice tensiune auto-indusă inversă.

Mai sus, este prezentat un circuit foarte simplu pentru comutarea unei sarcini rezistive cum ar fi o lampă sau un LED. Dar atunci când se utilizează MOSFET-uri de putere pentru a comuta sarcini inductive sau capacitive, este necesară o formă de protecție pentru a preveni deteriorarea dispozitivului MOSFET. Comanda unei sarcini inductive are efect opus față de comanda unei sarcini capacitive.

De exemplu, un condensator fără sarcină electrică este un scurtcircuit, rezultând un înalt curent de pornire și atunci când scoatem tensiunea dintr-o sarcină inductivă avem o tensiune inversă ridicată, deoarece câmpul magnetic dispare, rezultând o tensiune inversă indusă în înfășurările inductorului.



Un exemplu de utilizare a MOSFET ca switch

Atunci putem rezuma caracteristicile de comutare ale MOSFET canal-N și canal-P în tabelul următor.

Tipul MOSFET	V_{GS} (+ ve)	V_{GS} (0V)	V_{GS} (-ve)
Canal-N îmbunătățire	ON	OFF	OFF
Canal-N de epuizare	ON	ON	OFF
Canal-P îmbunătățire	OFF	OFF	ON
Canal-P de epuizare	OFF	ON	ON

Rețineți că, spre deosebire de MOSFET-ul canal-N al cărui terminal poartă trebuie făcut mai pozitiv (atrageră de electroni) decât sursa pentru a permite curentului să curgă prin canal, conducția prin MOSFET canal-P se datorează fluxului de goluri. Astfel că terminalul porții unui MOSFET cu canal P trebuie făcut mai negativ decât sursa și va opri conducția (tăia) numai până când poarta este mai pozitivă decât sursa.

Deci, pentru ca MOSFET-ul de putere, mod îmbunătățire, să funcționeze ca un dispozitiv de comutare analogică, trebuie să fie comutat între "regiunea **Cut-off**" unde: $V_{GS} = 0$ V (sau $V_{GS} = -ve$) și "regiunea de saturație" unde $V_{GS(on)} = +ve$. Puterea disipată în MOSFET (P_D) depinde de curent care curge prin canal I_D la saturație și, de asemenea, de „rezistența-ON“ a canalului dată de $R_{DS(ON)}$.

Exemplul nr. 1

- Să presupunem că lampa este evaluată la 6V, 24W și este pe deplin "ON", MOSFET standard are o rezistență-ON de canal ($R_{DS(on)}$) în valoare de 0,1 ohmi. Calculați puterea disipată în dispozitivul de comutare MOSFET.

Curentul care curge prin lampă se calculează astfel:

$$P = V \times I_D$$

$$\therefore I_D = \frac{P}{V} = \frac{24}{6} = 4.0 \text{ amps}$$

Atunci, puterea disipată în MOSFET va fi dată de:

$$P = I^2 \cdot R$$

$$P_D = I_D^2 \times R_{DS}$$

$$\therefore P_D = 4^2 \times 0.1 = 1.6 \text{ watts}$$

MOSFET - comutator

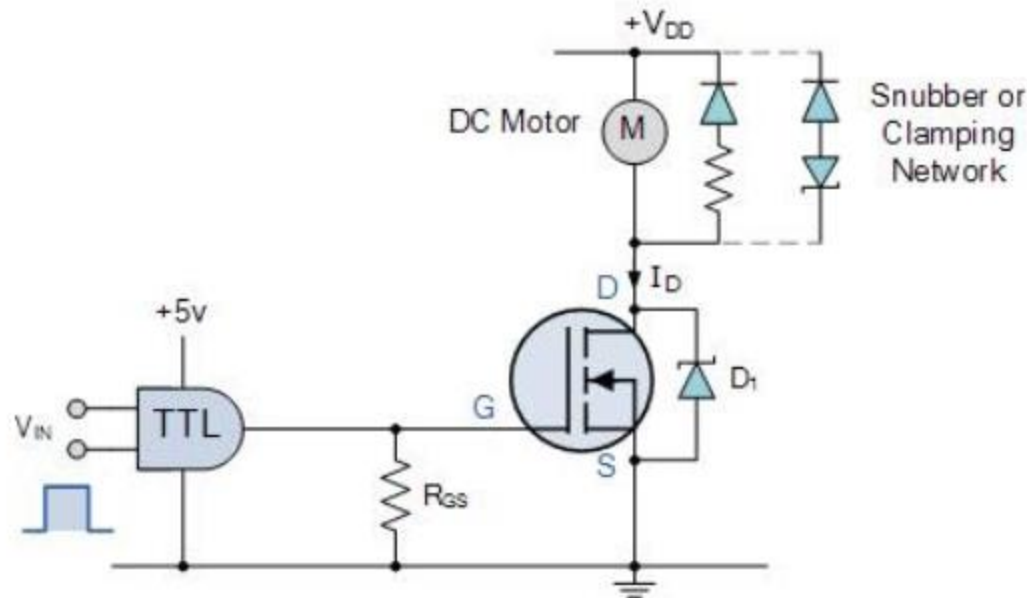
- Când utilizați MOSFET ca un comutator pentru a controla motoare DC sau sarcini electrice cu curenți mari de pornire, rezistența "ON" a canalului ($R_{DS(ON)}$) între drenă și sursă este foarte importantă. De exemplu, MOSFET-urile care controlează motoare DC sunt supuse unui curent ridicat de pornire atunci când motorul începe să se rotească, deoarece curentul de pornire al motoarelor este limitat doar de valoarea foarte scăzută a rezistenței înfășurărilor motoarelor.
- Deoarece relația de putere este: $P = I^2R$, atunci o valoare ridicată a rezistenței canalului $R_{DS(ON)}$ ar conduce pur și simplu la cantități mari de putere disipată și irosite în interiorul MOSFET rezultând o creștere a temperaturii excesivă, care, dacă nu ar fi controlată, ar putea avea ca rezultat faptul că MOSFET devine foarte fierbinte și deteriorat datorită unei supraîncărcări termice.
- O valoare mai mică $R_{DS(ON)}$ pentru rezistența canalului este, de asemenea, un parametru de dorit deoarece ajută la reducerea tensiunii de saturație efectivă a canalelor ($V_{DS(sat)} = I_D \cdot R_{DS(ON)}$) prin MOSFET și deci va opera la o temperatură mai scăzută. MOSFET-urile de putere au în general o valoare $R_{DS(ON)}$ mai mică de $0,01\Omega$, ceea ce le permite să funcționeze mai rece, prelungind durata lor de funcționare.
- Una dintre principalele limitări când se utilizează un MOSFET ca dispozitiv de comutare este curentul maxim de drenă pe care îl poate manevra. Deci, parametrul $R_{DS(ON)}$ este un ghid important pentru eficiența de comutare a MOSFET și este pur și simplu dat ca raportul V_{DS}/I_D atunci când tranzistorul este comutat "ON".
- Atunci când utilizați un MOSFET sau orice tip de tranzistor cu efect de câmp pentru acel lucru ca un dispozitiv de comutare solid-state, este întotdeauna recomandabil să selectați cele care au o valoare $R_{DS(ON)}$ foarte mică sau cel puțin să le montați pe un radiator potrivit pentru a ajuta să reduceți orice scăpare termică și deteriorare. MOSFET-urile de putere folosite ca întrerupătoare au, în general, o protecție împotriva curentului de supra-tensiune încorporate în schema lor, dar pentru aplicații de curent ridicat tranzistorul cu joncțiune bipolar este o alegere mai bună.

Controlul motorului cu MOSFET de putere

- Datorită rezistenței de intrare sau a porții extrem de ridicate pe care o are MOSFET-ul, vitezele sale foarte rapide de comutare și ușurința cu care pot fi comandate le face ideale pentru interfața cu **op-amp** sau porți logice standard. Dar, trebuie avut grijă să se asigure că tensiunea de intrare poartă-sursă este corect aleasă, deoarece atunci când se utilizează **MOSFET ca un comutator**, dispozitivul trebuie să obțină o rezistență de canal $R_{DS(ON)}$ proporțională cu această tensiune de intrare de poartă.
- MOSFET-urile de putere, tip prag mic, nu pot să comute "ON" până când cel puțin 3 V sau 4 V au fost aplicați pe poarta lor și dacă ieșirea de la poarta logică este doar + 5 V logic poate fi insuficientă pentru a comanda complet MOSFET-ul în saturație. Utilizarea MOSFET-urilor cu prag inferior concepute pentru interfațarea cu porți logice TTL și CMOS care au praguri de până la 1,5 V până la 2,0 V sunt disponibile.
- MOSFET-urile de putere pot fi folosite pentru a controla mișcarea motoarelor DC sau a motoarelor pas cu pas fără perii direct de la logica calculatorului sau cu ajutorul controlerelor de tip PWM (modularea lățimii de impuls). Deoarece motorul DC oferă un cuplu de pornire ridicat și care este proporțional cu curentul de rotor, comutatoarele MOSFET împreună cu un PWM pot fi folosite ca un regulator de turație foarte bun, care ar asigura funcționarea fără probleme a motorului.

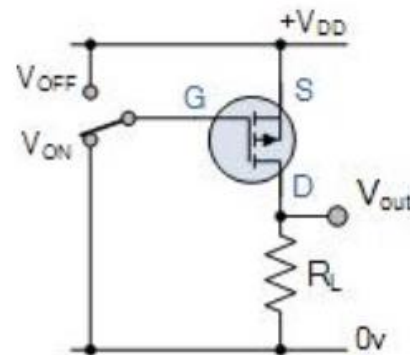
Controler de motor cu MOSFET de putere simplu

- Deoarece sarcina motorului este inductivă, o diodă simplă supresoare este conectată pe sarcina inductivă pentru a disipa orice emf inversă generată de motor atunci când MOSFET-ul îl va opri. O rețea [clamping](#) formată dintr-o diodă zener în serie cu dioda poate fi, de asemenea, utilizată pentru a permite o comutare mai rapidă și un control mai bun al tensiunii inverse de vârf și a timpului de revenire.
- Pentru o securitate sporită s-a adăugat o diodă cu siliciu sau diodă Zener suplimentară D1 plasată peste canalul unui comutator MOSFET atunci când se utilizează sarcini inductive, cum ar fi motoare, rele, solenoizi, etc, pentru suprimarea tranzițiilor de comutare cu supratensiuni și zgomot oferind protecție suplimentară comutatorului MOSFET dacă este necesar. Rezistorul RGS este folosit ca un rezistor [pull-down](#) pentru a ajuta la tragerea tensiunii de ieșire TTL până la 0 V atunci când MOSFET-ul este comutat "OFF".



Switch MOSFET cu canal-P

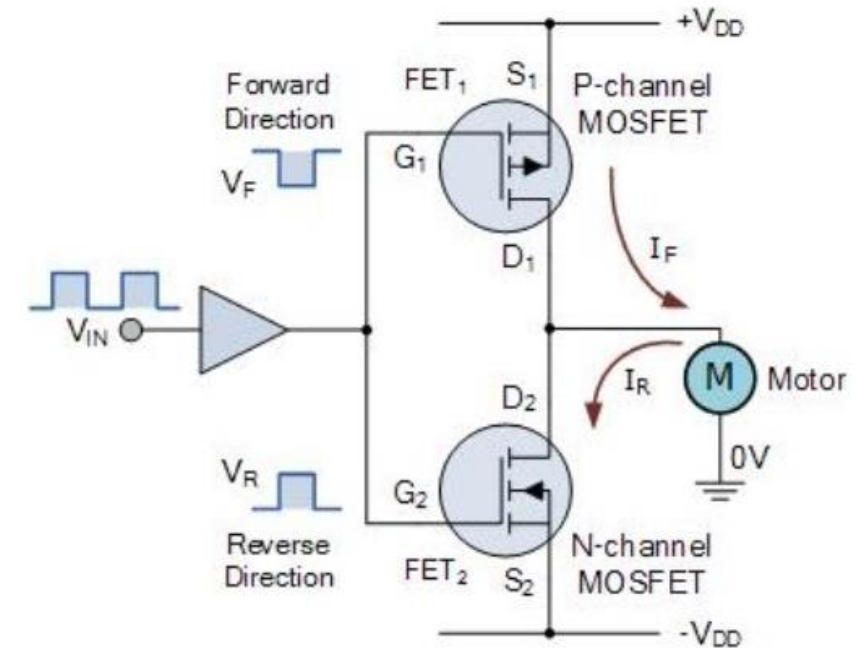
- Până acum ne-am uitat la MOSFET cu canal-N ca un comutator, unde MOSFET este plasat între sarcină și masă. Acest lucru permite pentru comanda porții MOSFET sau semnalul de comutare să fie raportat la masă (comutare pe partea **Low**).
- Într-un dispozitiv cu canal-P fluxul convențional al curentului de drenă este în direcția negativă, astfel încât se aplică o tensiune negativă poartă-sursă pentru comutarea tranzistorului "ON". Dar, în unele aplicații avem nevoie să utilizăm MOSFET modul de îmbunătățire canal-P unde sarcina este conectată direct la masă. În acest caz, comutatorul MOSFET este conectat între sarcină și sursa de alimentare pozitivă (comutarea pe partea **High**) așa cum o facem cu tranzistoarele PNP.
- Acest lucru se realizează deoarece MOSFET-ul canal-P este "cu susul în jos", cu terminalul său sursă legat la alimentarea pozitivă +VDD. Deci, atunci când comutatorul trece **LOW**, MOSFET-ul comută "**ON**", iar atunci când comutatorul trece **HIGH**, MOSFET-ul comută "**OFF**".
- Această conexiune cu susul în jos a unui comutator MOSFET în modul de îmbunătățire cu canal-P ne permite să îl conectăm în serie cu un MOSFET în modul de îmbunătățire cu canal-N, pentru a produce un dispozitiv de comutare complementar sau CMOS, așa cum se arată într-o alimentare dublă.



Switch MOSFET canal-P

Controler pentru motor cu MOSFET complementare

- Cele două MOSFET-uri sunt configurate pentru a produce un comutator bidirecțional de la o sursă dublă cu motorul conectat între conexiunea drenă-comună și referința de masă. Când intrarea este **LOW**, MOSFET-ul canal-P este comutat **ON**, deoarece jonctiunea sa poartă-sursă este polarizată negativ, astfel încât motorul se rotește într-o direcție. Doar șina de alimentare +VDD pozitivă este utilizată pentru a comanda motorul.
- Atunci când intrarea este **HIGH**, dispozitivul cu canal-P comută **OFF** și dispozitivul cu canal-N comută **ON**, deoarece jonctiunea poartă-sursă este polarizată pozitiv. Motorul se rotește acum în direcția opusă, deoarece tensiunea la terminalele motorului a fost inversată, fiind acum alimentată de către șina negativă -VDD.
- Atunci, MOSFET-ul canal-P este folosit pentru comutarea alimentării pozitive a motorului cu direcția înainte (comutarea pe partea **High**) în timp ce MOSFET-ul canal-N este utilizat pentru a comuta alimentarea negativă la motor în direcția inversă (comutarea pe partea **Low**).
- Există o varietate de configurații pentru a comanda cele două MOSFET-uri cu multe aplicații diferite. Atât dispozitivele cu canal-P, cât și dispozitivele cu canal-N pot fi acționate de un singur IC, după cum se arată.
- Dar, pentru a evita conducția transversală, cu ambele MOSFET care conduc în același timp pe cele două polarități ale alimentării duale, sunt necesare dispozitive de comutare rapide pentru a realiza o anumită diferență de timp între comutarea lor **OFF** și comutarea **ON**. O modalitate de a depăși această problemă este de a comanda ambele porți MOSFET separat. Aceasta produce apoi o a treia opțiune de "STOP" la motor atunci când ambele MOSFET-uri sunt **OFF**.



Tabel de control motor cu MOSFET-uri complementare

MOSFET 1	MOSFET 2	Funcția motorului
OFF	OFF	Motor oprit (OFF)
ON	OFF	Motorul se rotește înainte
OFF	ON	Motorul se rotește invers
ON	ON	NEPERMIS

Vă rugăm să rețineți că este important să nu existe nici o altă combinație de intrări permise în același timp, ceea ce ar putea duce la scurtcircuitarea sursei de alimentare, deoarece ambele MOSFET-uri, FET 1 și FET 2 ar putea fi comutate împreună **ON**, rezultând arderea siguranței.

Tranzistorul cu efect de câmp (Field Effect Transistor)

- **Tranzistoarele cu efect de câmp**, sau FET-uri, sunt "**Dispozitive de operare în tensiune**" și pot fi împărțite în două tipuri principale: Dispozitive cu poartă-joncțiune denumite JFET, dispozitive cu poartă-izolată numite IGFET, sau mai cunoscute sub denumirea de MOSFET.
- Dispozitivele cu poartă-izolată pot fi subdivizate și în tip de îmbunătățire și tip de epuizare. Toate formele sunt disponibile atât în versiunile cu canal-N, cât și cu canal-P.
- FET-urile au rezistențe de intrare foarte mari, astfel că foarte puțin sau deloc curent (tipurile MOSFET) circulă în terminalul de intrare, făcându-le ideale pentru a fi utilizate ca comutatoare electronice.
- Impedanța de intrare a MOSFET este chiar mai mare decât cea a JFET datorită stratului de oxid izolant și, prin urmare, electricitatea statică poate deteriora cu ușurință dispozitivele MOSFET, astfel încât trebuie acordată atenție atunci când le mașevrați.
- Atunci când nu se aplică tensiune la poarta unui FET îmbunătățit, tranzistorul este în starea "**OFF**" similar cu un "comutator deschis".
- FET de epuizare este inerent conductiv și în stare "**ON**" când nu se aplică tensiune la poartă similar cu un "comutator închis".
- FET-urile au câștiguri de curent mult mai mari comparativ cu tranzistoarele cu joncțiune bipolare.
- Cea mai obișnuită conexiune FET este configurarea Sursă-comună (CS), dar sunt disponibile și configurații Poartă-comună (CG) și Drenă-comună (CD).
- MOSFET-urile pot fi folosite ca întrerupătoare ideale datorită rezistenței foarte înalte a canalului "**OFF**" și rezistenței joase "**ON**".
- Pentru a comuta "**OFF**" tranzistorul JFET cu canal-N, trebuie aplicată o tensiune negativă pe poartă.
- Pentru a comuta "**OFF**" tranzistorul JFET cu canal-P, trebuie aplicată o tensiune pozitivă pe poartă.
- MOSFET-urile de epuizare cu canal-N sunt în starea "**OFF**" când se aplică o tensiune negativă pe poartă pentru a crea regiunea de epuizare.
- MOSFET-urile de epuizare cu canal-P, se află în starea "**OFF**" când se aplică o tensiune pozitivă la poartă pentru a crea regiunea de epuizare.
- MOSFET-urile cu îmbunătățire cu canal-N se află în starea "**ON**" când se aplică o tensiune "+ ve" (pozitivă) pe poartă.
- MOSFET-urile cu îmbunătățire cu canal-P sunt în stare "**ON**" când se aplică tensiune "-ve" (negativă) pe poartă.

Diferențele dintre un FET și un tranzistor bipolar

FET pot fi folosite pentru a înlocui BJT normale în circuite electronice și o simplă comparație între FET și BJT care să indice atât avantajele lor cât și dezavantajele lor este dată mai jos.

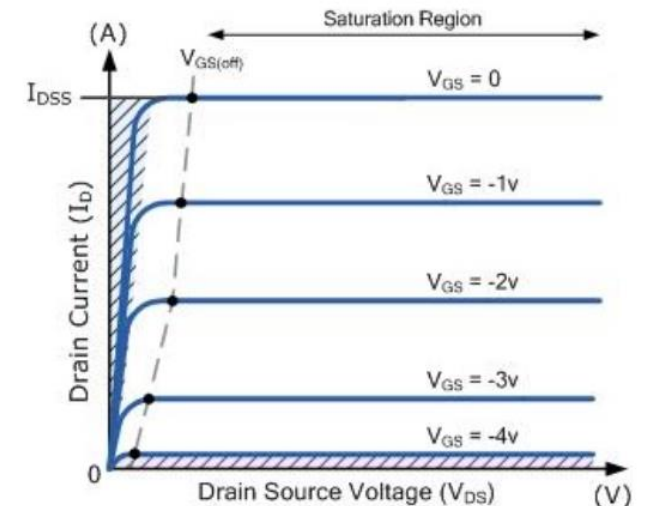
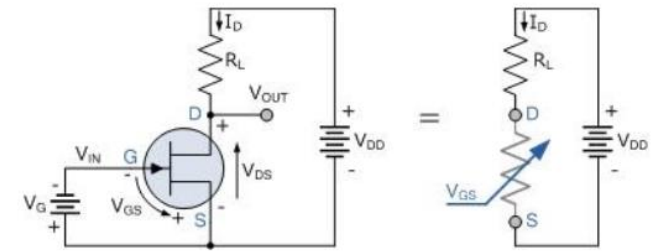
	Tranzistor cu efect de câmp (FET)	Tranzistor cu joncțiune bipolar (BJT)
1	Câștig de tensiune mic	Câștig de tensiune mare
2	Câștig de curent mare	Câștig de curent scăzut
3	Impedanță de intrare foarte ridicată	Impedanță de intrare redusă
4	Impedanță înaltă de ieșire	Impedanță scăzută de ieșire
5	Generare de zgomot scăzut	Generare de zgomot mediu
6	Timp rapid de comutare	Timp medie de comutare
7	Ușor de deteriorat static	Robust
8	Unele au nevoie de o intrare pentru a comuta "OFF"	Necesită intrare zero pentru a comuta "OFF"
9	Dispozitiv controlat cu tensiune	Dispozitiv controlat cu curent
10	Prezintă proprietățile unui rezistor	
11	Mai scump decât bipolar	ieftin
12	Dificil de polarizat	Ușor de polarizat

Sursă de curent FET

- O sursă de curent constant FET (*Field Effect Transistor*) este un tip de circuit activ care folosește un *tranzistor cu efect de câmp* pentru a furniza o cantitate constantă de curent unui circuit. Dar de ce ai vrea un curent constant? *Sursele de curent constant* și absorția de curent (o absorbție de curent este inversul unei surse de curent) sunt un mod foarte simplu de a forma circuite de polarizare sau referințe de tensiune cu o valoare constantă a curentului, de exemplu, 100 μA , 1 mA sau 20 mA folosind doar un singur FET și rezistor.
- Sursele de curent constant sunt utilizate în mod obișnuit în circuitele de încărcare a condensatoarelor în scopuri de sincronizare exactă sau în aplicațiile de încărcare a bateriei reîncărcabile, precum și în circuitele liniare cu LED-uri pentru comanda șirurilor de LED-uri la o luminozitate constantă. Referințele de tensiune rezistive pot fi, de asemenea, formate folosind surse de curent constante, deoarece dacă știți valoarea rezistenței și curentul care curge prin ea este constant și stabil, atunci puteți utiliza pur și simplu legea lui Ohm pentru a găsi căderea de tensiune. Însă, cheia creării unei *surse de curent constant* exacte și fiabile depinde de utilizarea FET cu transconductanță scăzută, precum și de valorile rezistorului de precizie pentru a converti curentul într-o tensiune precisă și stabilă.
- Tranzistoarele cu efect de câmp sunt utilizate în mod obișnuit pentru a crea o sursă de curent cu **Junction-FET** (JFET) și Metal-oxid Semiconductor MOSFET fiind deja utilizate în aplicații cu sursă de curent redus. În forma sa cea mai simplă, JFET poate fi utilizat ca un rezistor controlat de tensiune, unde o mică tensiune a porții controlează conducția canalului său. Am văzut în tutorialul nostru despre JFET-uri că JFET-urile sunt *dispozitive de epuizare* și că JFET-ul cu canal-N este un dispozitiv „normal-ON”, până când tensiunea poartă-sursă (VGS) devine suficient de negativă pentru a-l comuta "OFF". JFET canal-P, care este, de asemenea, un dispozitiv de epuizare „normal-ON” necesită ca tensiunea porții să devină suficient de pozitivă pentru a comuta "OFF".

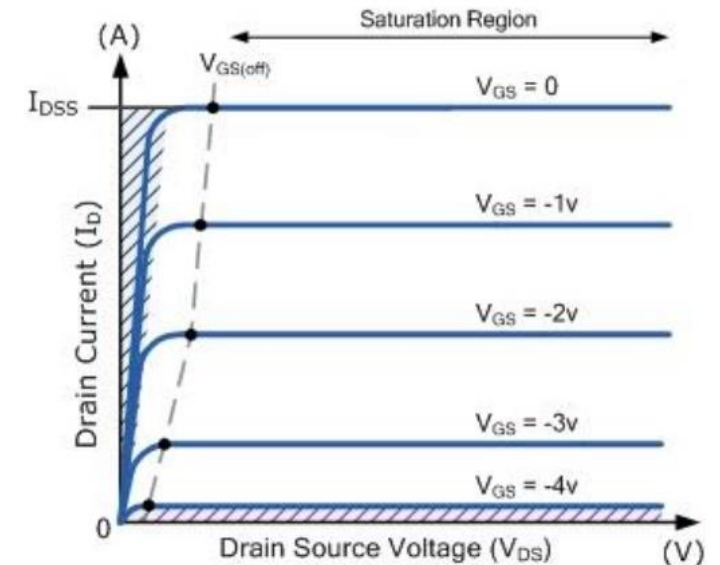
Polarizarea JFET cu canal-N

- Imaginea prezintă aranjamentul și conexiunile standard pentru o sursă comună configurată cu JFET canal-N cu polarizare normală atunci când este utilizat în regiunea sa activă. Aici tensiunea poartă-sursă V_{GS} este egală cu sursa de poartă sau tensiunea de intrare V_G care setează polarizarea inversă între poartă și sursă, în timp ce V_{DD} asigură tensiunea drenă-sursă și circulația de curent din sursa de alimentare de la drenă (D) la sursă (S). Acest curent ce intră în terminalul drenă al JFET este etichetat I_D .
- Tensiunea drenă-sursă V_{DS} este căderea de tensiune directă a JFET și este o funcție de curentul de drenă, I_D pentru diferite valori ale V_{GS} . Când V_{DS} este la valoarea sa minimă, canalul conductiv al JFET este complet deschis și I_D este la valoarea sa maximă, care se numește curent de saturație drenă-sursă $I_{D(sat)}$ sau pur și simplu I_{DSS} . Când V_{DS} este la valoarea sa maximă, canalul conductiv al JFET este complet închis, (blocat), așa că I_D se reduce la zero, cu tensiunea drenă-sursă V_{DS} fiind egală cu tensiunea de alimentare la drenă V_{DD} . Tensiunea porții, V_{GS} la care canalul JFET încetează să mai conducă este denumită tensiunea **cut-off** (de tăiere) a porții $V_{GS(off)}$.
- Acest aranjament de polarizare a sursei comune a JFET canal-N determină operarea în stare stabilă a JFET în absența oricărui semnal de intrare, V_{IN} deoarece V_{GS} și I_D sunt cantități de stare staționară, adică *starea de repaus* a JFET.
- Astfel, pentru un JFET sursă-comună, tensiunea poartă-sursă V_{GS} controlează cât de mult curent va curge prin canalul conductiv al JFET între drenă și sursă, făcând JFET un dispozitiv controlat de tensiune, deoarece tensiunea sa de intrare controlează curentul său de canal. Ca urmare, putem dezvolta un set de curbe caracteristice de ieșire prin reprezentarea I_D versus V_{GS} pentru orice dispozitiv JFET dat.



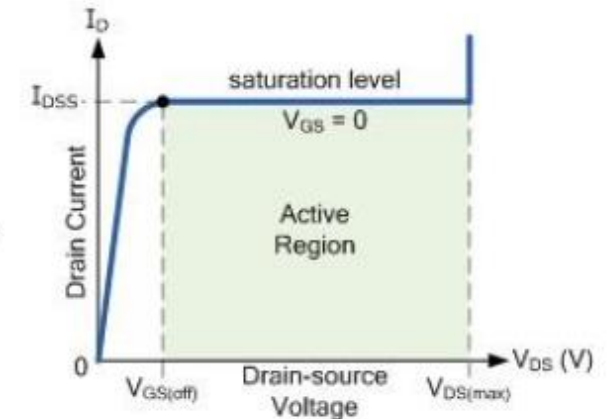
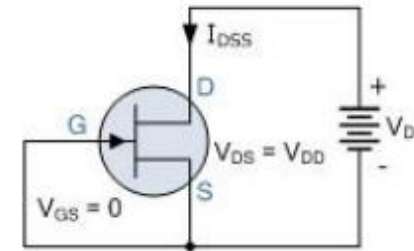
JFET ca sursă de curent constant

- Putem vedea că JFET cu canal-n este un dispozitiv normal-ON și dacă V_{GS} este suficient de negativ, canalul conductor drenă-sursă se închide (cut-off) și curentul de drenă se reduce la zero. Pentru JFET canal-n, închiderea canalului conductiv între drenă și sursă este cauzată de lărgirea regiunii de epuizare de tip-p în jurul porții până când aceasta închide complet canalul. Regiunile de epuizare de tip-n închid canalul pentru un JFET canal-p.
- Deci, setând tensiunea poartă-sursă la o anumită valoare negativă fixă predeterminată, putem face ca JFET să conducă curent prin canalul său la o anumită valoare între zero amperi și respectiv I_{DSS} . Considerați circuitul de mai jos.



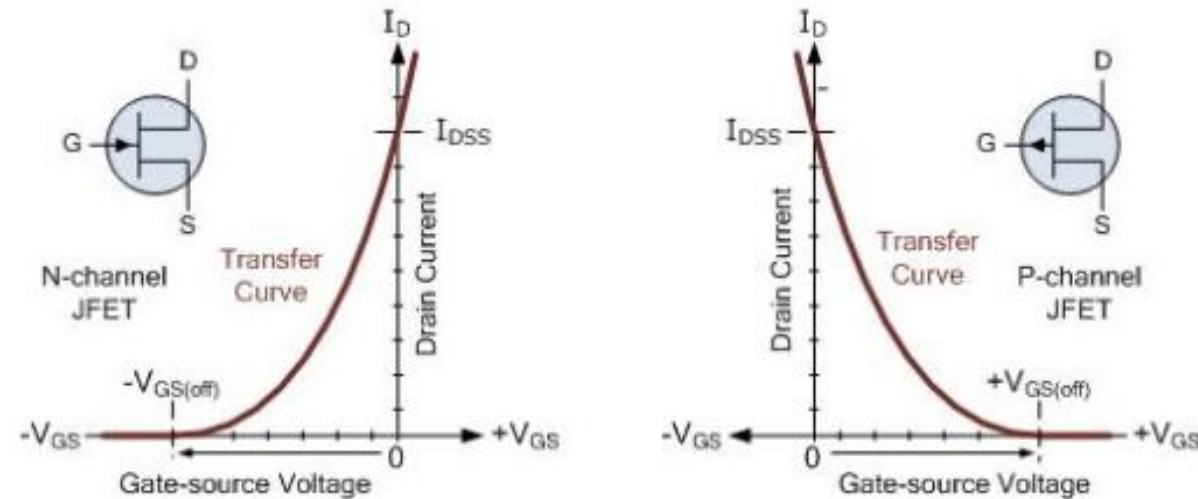
Polarizare JFET cu tensiune zero

- Am văzut că curbele caracteristice de ieșire ale JFET sunt un grafic de I_D versus V_{GS} pentru o V_{DS} constantă. Dar am observat, de asemenea, că curbele JFET nu se schimbă foarte mult cu modificări mari în V_{DS} , iar acest parametru poate fi foarte util în stabilirea unui punct de funcționare fix al canalului conductiv.
- Cea mai simplă sursă de curent constant este cu terminalul porții JFET scurtcircuitat la terminalul sursă, așa cum se arată, canalul conductiv al JFET este deschis, astfel încât fluxul de curent prin el va fi aproape de valoarea sa maximă I_{DSS} , datorită faptului că JFET operează în regiunea de curent saturat. Dar, operarea și performanța unei astfel de configurații de curent constant este destul de slabă, deoarece JFET este în permanență în plină conducție, cu valoarea curentului I_{DSS} depinzând complet de tipul dispozitivului.
- De exemplu, seria JFET canal-n 2N36xx sau 2N43xx are doar câțiva miliamperi (mA), în timp ce seria J1xx sau PN4xxx cu canal-n mai larg poate avea câteva zeci de miliamperi. De asemenea, rețineți că I_{DSS} va varia foarte mult între dispozitivele cu același număr de piesă pe care producătorii le indică pe fișele lor de date, valorile minime și maxime ale acestui curent de drenă la tensiune de poartă zero, I_{DSS} .
- Un alt punct de remarcat este că un FET este în esență un rezistor controlat de tensiune al cărui canal conductor are o valoare rezistivă în serie cu terminalele drenă și sursă. Această rezistență a canalului se numește R_{DS} . După cum am văzut, atunci când $V_{GS} = 0$, curentul maxim drenă-sursă curge, prin urmare rezistența canalului JFET R_{DS} trebuie să fie la minimum, și acest lucru este adevărat.
- Dar, rezistența canalului nu este complet zero, ci la o valoare ohmică scăzută definită de geometria de fabricație a FET și care poate fi la fel de mare ca 50 de ohmi. Atunci când un FET conduce, această rezistență a canalului este cunoscută în mod obișnuit sub denumirea de $R_{DS(ON)}$ și este la valoarea sa minimă rezistivă atunci când $V_{GS} = 0$. Astfel o valoare ridicată a $R_{DS(ON)}$ are ca rezultat un I_{DSS} scăzut și invers.



Curba de transfer JFET

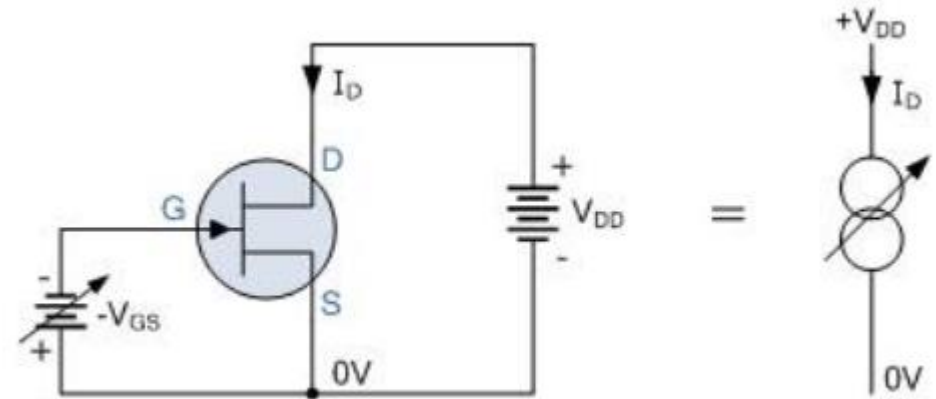
Deci, un JFET poate fi polarizat pentru a funcționa ca un dispozitiv sursă de curent constant la orice valoare de curent sub curentul său de saturație, I_{DSS} când V_{GS} este egal cu zero volți. Când V_{GS} este la nivelul său de tensiune **cut-off** $V_{GS(off)}$ va exista curent de drenă zero, ($I_D = 0$) deoarece canalul este închis. Astfel curentul de drenă al canalului, I_D , va curge întotdeauna atâta timp cât dispozitivul JFET este acționat în regiunea sa activă, așa cum se arată mai jos.



Rețineți că pentru un JFET cu canal-P, tensiunea **cut-off** $V_{GS(off)}$ va fi o tensiune pozitivă, dar curentul său de saturație, I_{DSS} obținut atunci când V_{GS} este egal cu zero volți, va fi același ca pentru un dispozitiv cu canal-N. De asemenea, observați că curba de transfer este neliniară deoarece curentul de drenă crește mai repede prin canalul deschis pe măsură ce V_{GS} se apropie de zero volți.

Polarizarea JFET cu tensiune negativă

- Ne amintim că JFET este un dispozitiv cu mod de epuizare care este întotdeauna „ON”, deci necesită o tensiune de poartă negativă pentru JFET-urile cu canal-N și o tensiune de poartă pozitivă pentru JFET-urile cu canal-P pentru a le comuta „OFF”. Polarizarea unui JFET canal-N cu o tensiune pozitivă sau polarizarea unui JFET canal-P cu o tensiune negativă va deschide canalul conductiv chiar forțând curentul canalului, I_D dincolo de I_{DSS} .
- Dar dacă folosim curbele caracteristice I_D față de V_{GS} , putem seta V_{GS} la un anumit nivel de tensiune negativă, să spunem -1V, -2V sau -3V pentru a crea o sursă de curent constantă JFET fixă, indiferent de nivelul de curent pe care îl dorim între zero și I_{DSS} . Dar pentru o sursă de curent constantă mai exactă cu o reglare îmbunătățită, este mai bine să polarizați JFET la aproximativ 10% până la 50% din valoarea sa maximă I_{DSS} . Acest lucru ajută și la pierderile de putere I^2R prin canalul rezistiv și, prin urmare, la efectul de încălzire redus.



Ecuția curentului de drenă
JFET

$$I_D \cong I_{DSS} \left[1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS(off)}} \right]^2$$

Exemplu nr. 1 de sursă de curent constant FET

- Fișa tehnică a producătorilor pentru un JFET de comutare cu canal-N J109 arată că are un I_{DSS} de 40 mA când $V_{GS} = 0$ și o valoare maximă $V_{GS(off)}$ de -6,0 volți. Folosind aceste valori declarate, calculați valoarea curentului de drenă a JFET atunci când $V_{GS} = 0$, $V_{GS} = -2$ volți și când $V_{GS} = -5$ volți. De asemenea, arătați curba caracteristică de transfer a lui J109.

- 1). Când $V_{GS} = 0$ V

- Când $V_{GS} = 0$ V canalul conductiv este deschis și circulă curentul maxim de drenă.

- Astfel $I_D = I_{DSS} = 40$ **mA**.

- 2). Când $V_{GS} = -2$ V

$$I_D \cong I_{DSS} \left[1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS(off)}} \right]^2 = 40 \text{mA} \left[1 - \frac{-2}{-6} \right]^2$$

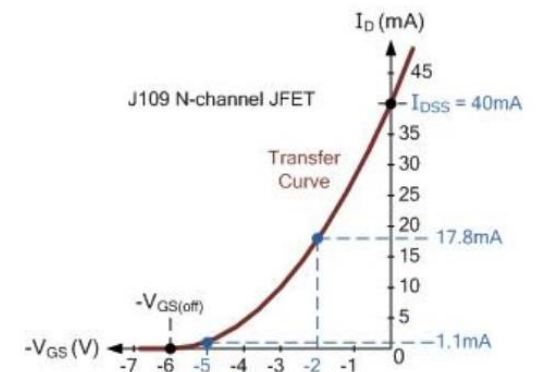
$$I_D = 0.04(1-0.333)^2 = 0.04(0.444) = 17.78 \text{mA}$$

- 3). Când $V_{GS} = -5$ V

$$I_D \cong I_{DSS} \left[1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS(off)}} \right]^2 = 40 \text{mA} \left[1 - \frac{-5}{-6} \right]^2$$

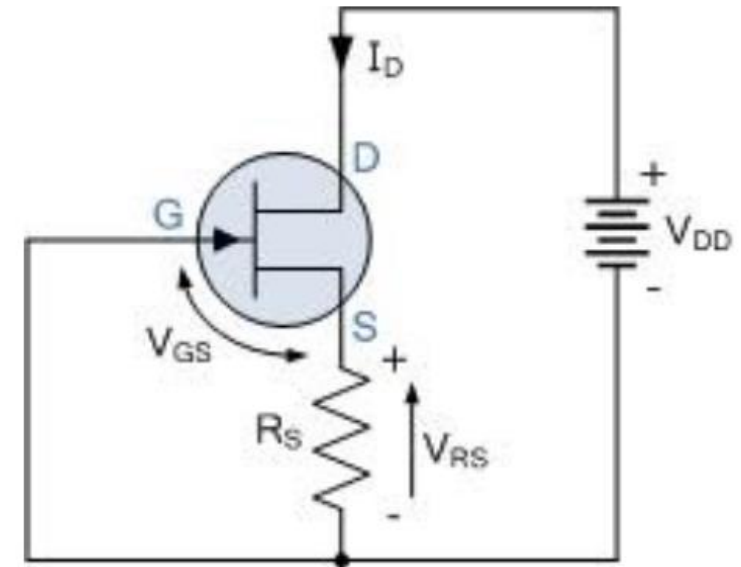
$$I_D = 0.04(1-0.833)^2 = 0.04(0.0278) = 1.11 \text{mA}$$

- 4). Curba caracteristică de transfer J109



Sursa de curent JFET

- Un JFET poate funcționa ca o sursă de curent constant controlată de tensiune ori de câte ori jonctiunea sa poartă-sursă este polarizată invers, iar pentru un dispozitiv cu canal-N avem nevoie de un $-V_{GS}$ și pentru un dispozitiv cu canal-P avem nevoie de un $+V_{GS}$. Problema este că JFET necesită două surse de tensiune separate, una pentru V_{DD} și alta pentru V_{GS} . Dar, dacă plasăm un rezistor între sursă și masă (0 volți), putem realiza aranjamentul necesar de auto-polarizare V_{GS} pentru ca JFET să funcționeze ca o sursă de curent constant utilizând doar tensiunea de alimentare V_{DD} . Considerați circuitul de mai jos.
- La prima vedere s-ar putea să credeți că această configurație arată foarte asemănător cu un circuit de JFET cu drenă-comună (urmăritor de sursă) pe care l-am văzut în [tutorialul JFET](#). Inșă, diferența de această dată este că, în timp ce terminalul poartă al FET este încă legat în mod direct la masă ($V_G = 0$), terminalul sursă este la un anumit nivel de tensiune deasupra tensiunii zero a masei, datorită căderii de tensiune pe rezistorul surse R_S . Prin urmare, cu un curent de canal care curge prin rezistorul sursei externe, tensiunea poartă-sursă a JFET va fi mai mică decât (mai negativă decât) zero ($V_{GS} < 0$).
- Rezistorul sursei externe, R_S furnizează o tensiune de feedback care este utilizată pentru auto-polarizarea terminalului porții JFET menținând curentul de drenă constant prin canal, în ciuda oricăror modificări ale tensiunii drenă-sursă. Astfel, singura sursă de tensiune de care avem nevoie este tensiunea de alimentare V_{DD} pentru a furniza curentul de drenă și polarizarea.
- Deci, JFET folosește căderea de tensiune pe rezistorul sursei (V_{RS}) pentru a seta tensiunea de polarizare a porții V_{GS} și, prin urmare, curentul canalului așa cum am văzut mai sus. Astfel, creșterea valorii rezistive a lui R_S va reduce curentul de drenă al canalului I_D și invers. Dar dacă ne-am dorit să construim un circuit JFET de sursă de curent constant, care ar fi o valoare corespunzătoare pentru acest rezistor de sursă extern R_S ?



Ecuția tensiunii poartă-sursă a JFET

$$I_D = I_{DSS} \left[1 - \frac{-V_{GS}}{-V_{GS(off)}} \right]^2$$

$$\therefore V_{GS} = -V_{GS(off)} \left[1 - \sqrt{\frac{I_D}{I_{DSS}}} \right]$$

- După ce am găsit tensiunea poartă-sursă necesară pentru un curent de drenă dat, valoarea solicitată a rezistorului de polarizare a sursei este găsită prin simpla utilizare a legii lui Ohm, ca $R = V/I$. Prin urmare:

$$R_S = \frac{V_{GS}}{I_D} \quad (\Omega's)$$

Exemplul nr. 2 de sursă de curent constant FET

- Utilizăm dispozitivul JFET J109 canal-N de deasupra care are un I_{DSS} de 40 mA când $V_{GS} = 0$ și o valoare maximă $V_{GS(off)}$ de -6,0 volți. Calculați valoarea rezistorului extern al sursei necesară pentru a produce un curent de canal constant de 20 mA și din nou pentru un curent constant de 5 mA.

- 1). V_{GS} pentru $I_D = 20$ mA
5 mA

$$V_{GS} = -V_{GS(off)} \left[1 - \sqrt{\frac{I_D}{I_{DSS}}} \right]$$

$$V_{GS} = -6 \left[1 - \sqrt{\frac{20\text{mA}}{40\text{mA}}} \right] = -6(1 - 0.7071)$$

$$\therefore V_{GS} = -6 \times 0.2929 = -1.75 \text{ volts}$$

$$R_{DS} = \frac{V_{GS}}{I_D} = \frac{1.75\text{V}}{20\text{mA}} = \frac{1.75}{0.02} = 87.5 \Omega$$

- 2). V_{GS} pentru $I_D =$

$$V_{GS} = -V_{GS(off)} \left[1 - \sqrt{\frac{I_D}{I_{DSS}}} \right]$$

$$V_{GS} = -6 \left[1 - \sqrt{\frac{5\text{mA}}{40\text{mA}}} \right] = -6(1 - 0.3536)$$

$$\therefore V_{GS} = -6 \times 0.6464 = -3.88 \text{ volts}$$

$$R_{DS} = \frac{V_{GS}}{I_D} = \frac{3.88\text{V}}{5\text{mA}} = \frac{3.88}{0.005} = 776 \Omega$$

Astfel, când $V_{GS(off)}$ și I_{DSS} sunt cunoscute, putem folosi ecuațiile de mai sus pentru a găsi rezistența sursei necesară pentru a polariza tensiunea de poartă pentru un anumit curent de drenă și, în exemplul nostru simplu, aceasta a fost de 87,5 Ω la 20 mA și 776 Ω la 5 mA. Așadar, adăugarea unui rezistor extern de sursă permite reglarea ieșirii sursei de curent.

Dacă ar fi să înlocuim rezistoarele de valoare fixă cu un potențiomtru, putem face sursa de curent constant JFET complet reglabilă. De exemplu, am putea înlocui cele două rezistoare sursă din exemplul de mai sus cu un potențiomtru de 1 k Ω sau un trimmer. De asemenea, pe lângă faptul că este complet reglabil, acest curent de drenă al circuitului sursă de curent constant JFET va rămâne constant chiar și cu modificări în V_{DS} .

Exemplul nr. 3 Sursa de curent constant FET

- Este necesar un JFET canal-N pentru a varia luminozitatea unei sarcini LED roșu rotund de 5 mm între 8 mA și 15 mA. Dacă circuitul sursei de curent constant JFET este alimentat de la o sursă de curent continuu de 12 volți, calculați rezistența sursei JFET necesară pentru iluminarea LED-ului între luminozitate minimă și maximă atunci când comutatorul JFET are o valoare maximă $V_{GS(off)}$ de -4,0 volți și un I_{DSS} de 20 mA când $V_{GS} = 0$. Desenați schema circuitului.
- 1). V_{GS} pentru $I_D = 8$ mA
mA
- 2). V_{GS} pentru $I_D = 15$ mA

$$V_{GS} = -V_{GS(off)} \left[1 - \sqrt{\frac{I_D}{I_{DSS}}} \right]$$

$$V_{GS} = -4 \left[1 - \sqrt{\frac{8\text{mA}}{20\text{mA}}} \right] = -4(1 - 0.6325)$$

$$V_{GS} (8\text{mA}) = -4 \times 0.3675 = -1.47 \text{ volts}$$

$$\therefore R_{DS(8\text{mA})} = \frac{V_{GS}}{I_D} = \frac{1.47\text{V}}{8\text{mA}} = \frac{1.47}{0.008} = 184\Omega$$

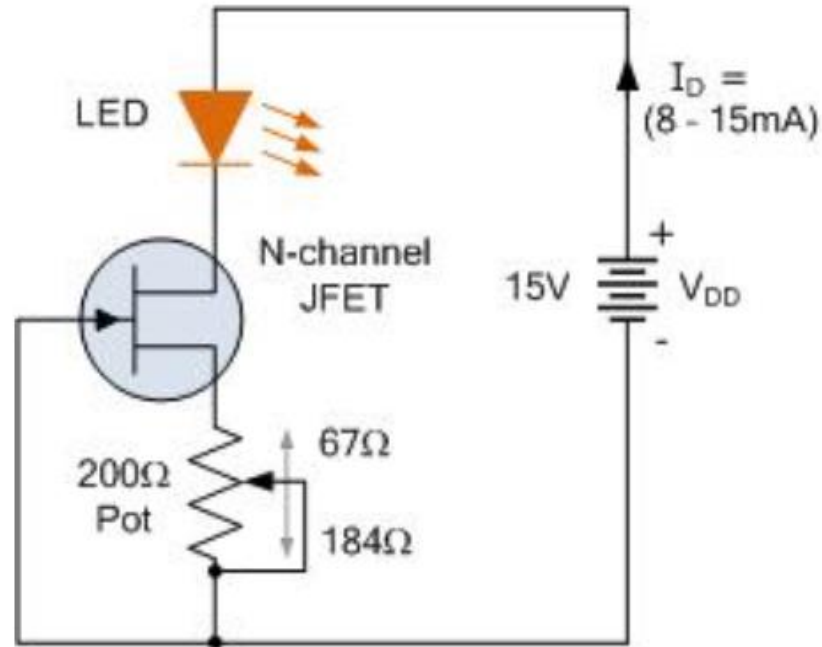
$$V_{GS} = -V_{GS(off)} \left[1 - \sqrt{\frac{I_D}{I_{DSS}}} \right]$$

$$V_{GS} = -4 \left[1 - \sqrt{\frac{15\text{mA}}{20\text{mA}}} \right] = -4(1 - 0.75)$$

$$V_{GS} (15\text{mA}) = -4 \times 0.25 = -1.0 \text{ volts}$$

$$\therefore R_{DS(15\text{mA})} = \frac{V_{GS}}{I_D} = \frac{1.0\text{V}}{15\text{mA}} = \frac{1.0}{0.015} = 67\Omega$$

Sursă reglabilă JFET de curent constant



Un potențiomtru sau trimmer utilizat pentru rezistența sursei R_S ne permite să modificăm sau să reglăm fin curentul care circulă prin canalul conductiv al JFET. Dar, pentru a asigura o bună reglare a curentului prin dispozitivul FET și, prin urmare, un curent stabil, este mai bine să limitați fluxul maxim de curent al canalului prin LED (15 mA în acest exemplu) la 10% și 50% din valoarea I_{DSS} a JFET-ului .

Crearea surselor de curent constant folosind MOSFET permite curenți de canal mult mai mari și o mai bună reglare a curentului și, spre deosebire de JFET, care sunt disponibili numai ca dispozitive în mod de epuizare normal-ON, MOSFET-urile sunt disponibile atât în dispozitive cu mod de epuizare (normal-ON), cât și cu mod de îmbunătățire (normal-OFF) ca tipuri de canal-P sau canal-N, permițând o gamă mai mare de opțiuni de sursă de curent.

Rezumatul sursei de curent constant FET

- Am văzut în acest tutorial despre **Sursa de curent constant FET** că datorită caracteristicilor de rezistență ale canalului, tranzistoarele cu efect de câmp pot fi utilizate pentru a furniza un curent constant unei sarcini și pentru a găsi numeroase aplicații în circuitele electronice unde este necesar să furnizeze un curent fix la o sarcină conectată. Circuitele de curent constant pot fi construite folosind FET-uri în modul de epuizare, dar și folosind BJT (*tranzistoare cu joncțiune bipolare*) sau o combinație a acestor două dispozitive. Amintindu-ne că JFET este un dispozitiv controlat de tensiune, nu un dispozitiv controlat de curent, cum ar fi tranzistorul cu joncțiune bipolar.
- Una dintre caracteristicile principale ale unui tranzistor cu efect de câmp cu joncțiune sau JFET este că, deoarece este un dispozitiv de epuizare, canalul său conductiv este întotdeauna deschis, astfel încât necesită o tensiune poartă-sursă VGS pentru a-l comuta **OFF**. Tensiunea VGS(off) necesară pentru un JFET canal-N variază de la 0 volți pentru conducția completă a canalului la o anumită valoare negativă, de obicei mai mulți volți, pentru a bloca JFET complet, închizând canalul. Prin urmare, polarizând terminalul poartă la o anumită valoare fixă între zero și VGS(off), putem controla lățimea stratului de epuizare a canalului și, prin urmare, valoarea sa rezistivă, trecând o cantitate fixă și constantă de curent. Pentru un JFET canal-P, valoarea VGS(off) variază de la 0 volți pentru conducția canalului complet la o anumită valoare pozitivă de mai mulți volți pentru o anumită valoare VDS.
- Reglarea și toleranța curentului constant pentru un dispozitiv JFET dat este legată de cantitatea curentului de drenă ID ce trece prin canal. Cu cât curentul de drenă este mai mic printr-un anumit dispozitiv, cu atât este mai bună reglarea. Polarizarea unui JFET între aproximativ 10% și 50% din valoarea sa maximă IDSS va îmbunătăți reglarea și performanța dispozitivelor. Acest lucru se realizează prin conectarea unei rezistențe externe între terminalele sursă și poartă.
- Un rezistor de feedback poartă-sursă, așa cum se arată mai sus, oferă auto-polarizarea necesară a JFET, permițându-i să funcționeze ca sursă de curent constant la orice nivel de curent cu mult sub curentul său de saturație IDSS. Această rezistență externă a sursei RS poate avea o valoare rezistivă fixă sau variabilă utilizând un potențiomtru.