5.5. TRANZISTOARE CU EFECT DE CÂMP

Spre deosebire de tranzistoarele bipolare, tranzistoarele cu efect de câmp utilizează un singur tip de purtători de sarcină (electroni sau goluri) care circulă printr-un canal semiconductor. Dacă la tranzistoarele bipolare controlul conductivității se realizează prin variația unui curent între emitor şi bază, la tranzistoarele cu efect de câmp controlul conductivității se realizează prin variația unei tensiuni aplicate unui electrod de comandă numit **grilă** sau **poartă** (cu rol asemănător bazei TB).

Funcționarea tranzistoarelor cu efect de câmp se bazează pe modificarea conductibilității unui canal realizat dintr-un material semiconductor prin aplicarea unui câmp electric creat de tensiunea aplicată electrodului de comandă (grilă sau poartă).

Controlul curentului electric de către un câmp electric se numeşte ***efect de câmp***.

Tranzistoarele cu efect de câmp au următoarele avantaje față de tranzistoarele bipolare :

- prezintă impedanță de intrare foarte mare (deoarece sunt comandate în tensiune)
- pot fi utilizate ca rezistențe comandate în tensiune
- liniaritate bună a circuitului
- zgomot redus
- gabarit redus (

După modul de realizare a canalului (în volum sau la suprafață), tranzistoarele cu efect de câmp se împart în două categorii:

- tranzistoare cu efect de câmp **cu grilă joncțiune (TEC-J)**
- tranzistoare cu efect de câmp **cu grilă izolată (TEC-MOS)**

În funcție de tipul de dopare al canalului, tranzistoarele **TEC-J** se împart în două categorii:

- TEC cu grilă joncțiune cu **canal n**
- TEC cu grilă joncțiune cu **canal p**

În funcție de modul de realizare al canalului, tranzistoarele **TEC-MOS** se împart în două categorii:

- TEC cu grilă izolată cu **canal inițial**
- TEC cu grilă izolată cu **canal indus**

Tranzistorul cu efect de câmp este un dispozitiv electronic cu trei terminale (unele tipuri au 4 terminale) care se numesc **Drenă, Sursă, Grilă sau Poartă, (Substrat).** Sursa şi drena sunt conectate la capetele canalului. **Sursa** furnizează purtătorii de sarcină iar **drena** colectează purtătorii de sarcină. Curentul care circulă între sursă şi drenă se numeşte **curent de drenă** şi se notează cu $\mathbf{I_D}$**. Grila** controlează curentul de drenă în funcție de tensiunea care se aplică între grilă şi sursă $\mathbf{V_{GS}}$**.**

http://eprofu.ro/electronica

5.5.1 TRANZISTOARE CU GRILĂ JONCȚIUNE (TEC-J)

Tranzistoarele cu efect de câmp cu grilă joncțiune ***funcționează numai cu joncțiunea grilă-sursă polarizată invers***

a. Structurile de bază şi simbolurile dispozitivelor TEC cu grilă joncțiune.

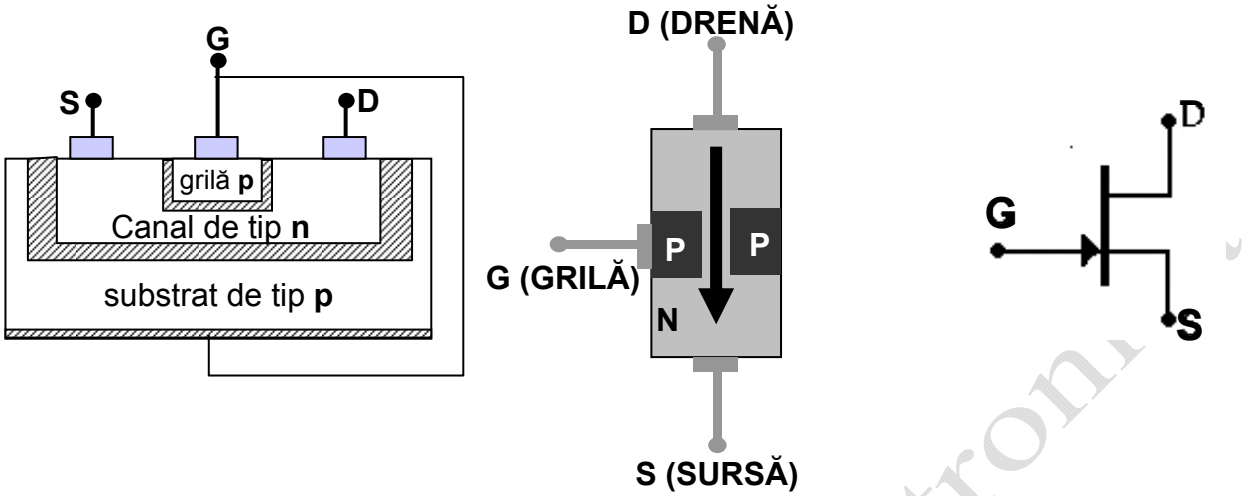


Figura 5.5.1 Structură şi simbol tranzistor TEC-J cu canal N

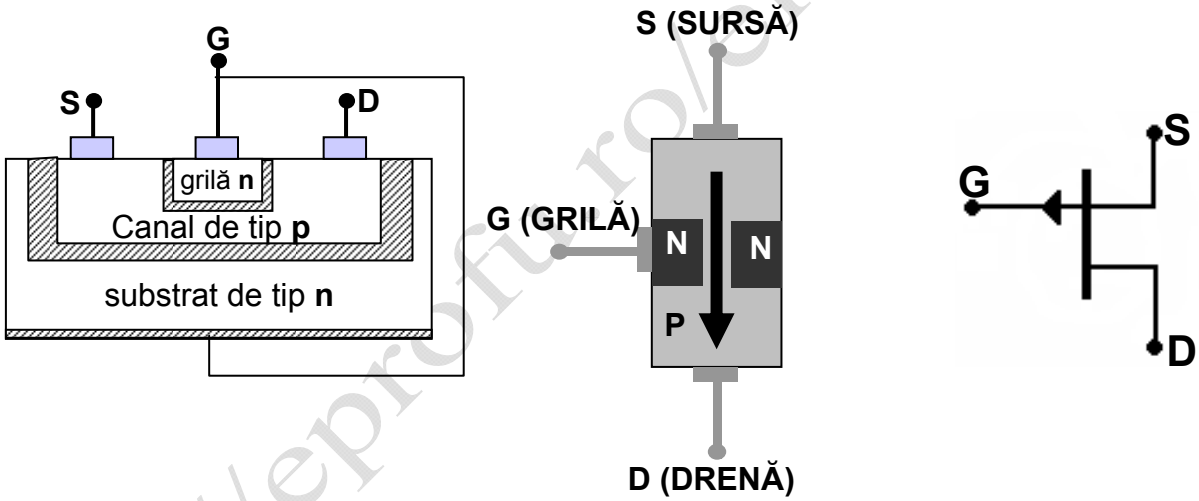


Figura 5.5.2 Structură şi simbol tranzistor TEC-J cu canal P

Elementele grafice ale simbolurilor au următoarele semnificații:

- săgeata este întotdeauna plasată pe grilă
- săgeata este orientată întotdeauna de la **P** spre **N**
- grila se plasează întotdeauna în dreptul sursei
- TEC-J cu canal P sunt reprezentate inversat (cu sursa în sus) pentru ca sensul curentului de drenă $\mathbf{I_D}$ să fie reprezentat de sus în jos

http://eprofu.ro/electronica

b. Încapsularea şi identificarea terminalelor dispozitivelor TEC cu grilă joncțiune.

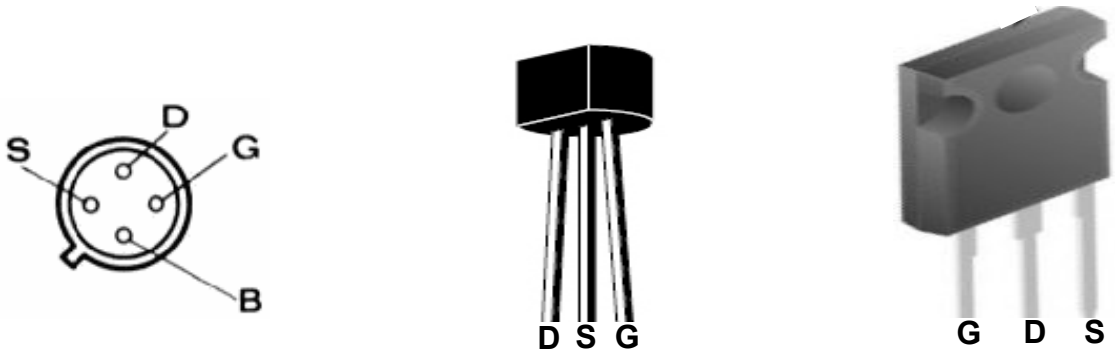


Figura 5.5.3 Dispunerea terminalelor la TEC-J

OBSERVAȚIE IMPORTANTĂ!

La unele tipuri de tranzistoare cu efect de câmp, terminalele pot fi dispuse altfel decât sunt prezentate în figura de mai sus chiar dacă capsulele sunt identice. Pentru identificarea corectă a terminalelor recomand utilizarea cataloagelor cu dispozitive TEC unde sunt prezentate dispunerea terminalelor.

c. Principiul de funcționare al tranzistoarelor cu efect de câmp cu grilă joncțiune.

În figura 5.5.4 este prezentat modul de polarizare a unui TEC-J cu canal n.

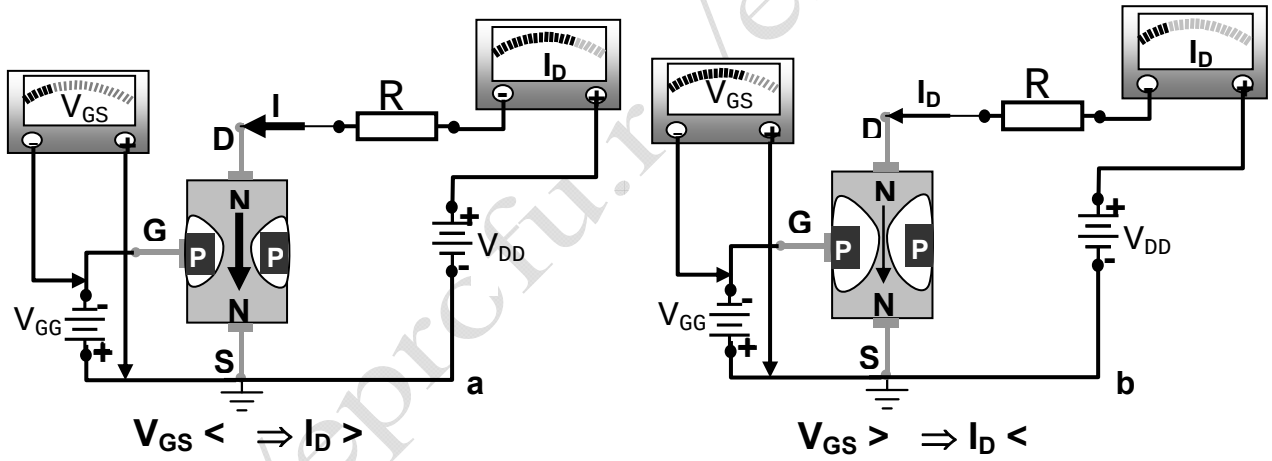


Figura 5.5.4 Polarizarea şi funcționarea unui tranzistor TEC-J cu canal N

V_{GG} este tensiunea de comandă cu care se polarizează **invers** joncțiunea pn grilă-sursă. Polarizarea inversă a joncțiunii grilă-sursă cu tensiune negativă pe grilă, generează în jurul joncțiunii pn o regiune golită care se extinde în semiconductorul mai slab dopat, în zona canalului, mărindu-i rezistența prin îngustarea lui. Astfel, tranzistorul prezintă între grilă şi sursă o rezistență de intrare foarte mare. Din acest considerent curentul de grilă este foarte mic (de ordinul zecilor de nanoamperi) Lățimea canalului, implicit rezistența lui, pot fi comandate prin modificarea tensiunii grilă-sursă.

V_{DD} este tensiunea dintre drenă şi sursă care furnizează curentul de drenă I_D, care circulă dinspre drenă spre sursă. Acest curent este comandat de tensiunea grilă-sursă.

Cu cât tensiunea grilă-sursă U_{GG} **este mai mare** cu atât canalul se îngustează şi valoarea curentului de drenă I_D **scade** (figura 5.5.4 b).

http://eprofu.ro/electronica

d. Caracteristicile tranzistoarelor cu efect de câmp cu grilă joncțiune.

Deoarece joncțiunea grilă-sursă este polarizată invers, aceste tranzistoare nu au caracteristică de intrare.

În cele ce urmează se vor prezenta **caracteristica de ieşire $I_D = f(V_{DS})$** şi **caracteristica de transfer $I_D = f(V_{GS})$** pentru tranzistorul **BC264** care are următoarele date de catalog:

- tensiunea drenă-sursă **$V_{DS} = 15V$**
- tensiunea de blocare grilă-sursă **$V_{GS(blocare)} = -5V$**

Tensiunea de blocare reprezintă valoarea tensiunii **V_{GS}** pentru care curentul **$I_D \cong 0$**

- curentul de drenă maxim **$I_{DSS} = 12$ mA**

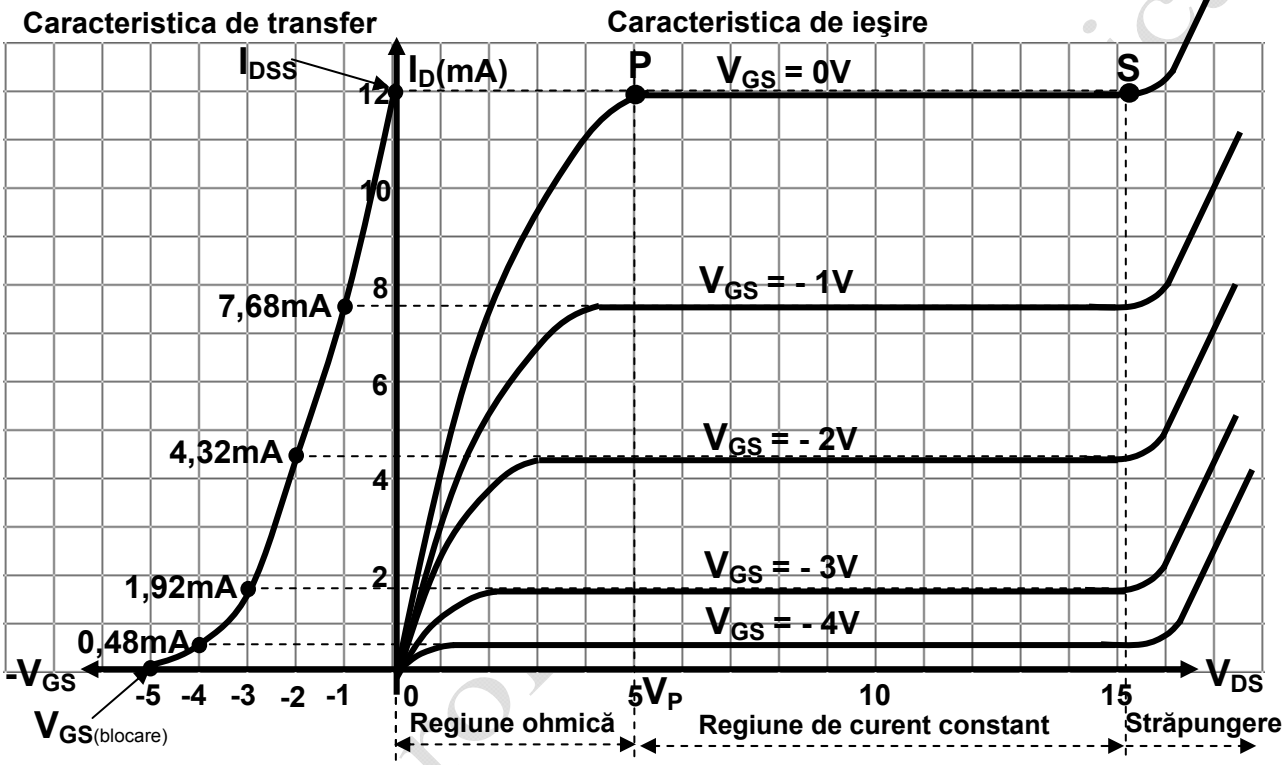


Figura 5.5.5 Graficele caracteristicilor de transfer şi ieşire unui TEC-J cu canal N

Pentru a trasa **graficul caracteristicii de transfer** trebuie determinate coordonatele **I_D** în funcție de valorile **$-V_{GS}$.** Pentru determinarea lor se utilizează formula:

$$I_D = I_{DSS} \cdot (1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS(blocare)}})^2$$

$V_{GS} = 1 \Rightarrow$ $I_D = 12 \cdot (1 - \frac{-1}{-5})^2 = 7,68mA$ **$V_{GS} = 2 \Rightarrow$** $I_D = 12 \cdot (1 - \frac{-2}{-5})^2 = 4,32mA$

$V_{GS} = 3 \Rightarrow$ $I_D = 12 \cdot (1 - \frac{-3}{-5})^2 = 1,92mA$ **$V_{GS} = 4 \Rightarrow$** $I_D = 12 \cdot (1 - \frac{-4}{-5})^2 = 0,48mA$

Pe **graficul de ieşire** întâlnim **V_P** care se numeşte **tensiune de strangulare**. Aceasta reprezintă valoarea tensiunii drenă-sursă de la care curentul de drenă începe să fie constant. **V_P** este întotdeauna egală în modul cu **$V_{GS(blocare)}$** şi de semn opus cu aceasta.

Pe **graficul caracteristicii de ieşire** se pot observa regiunile în care lucrează un TEC-J.

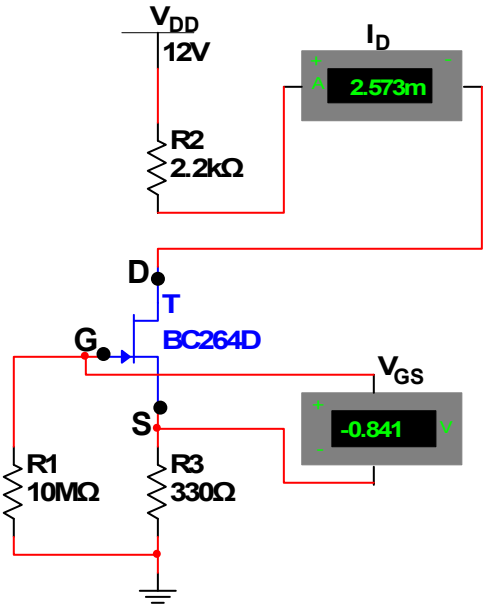
http://eprofu.ro/electronica

e. Polarizarea tranzistoarelor cu efect de câmp cu grilă joncțiune.

Prin polarizarea TEC-J se urmăreşte obținerea unei tensiuni de comandă V_{GS} şi a unui curent de drenă I_D de valoare dorită, deci un PSF adecvat. În cele ce urmează se va trata numai polarizarea TEC-J cu canal **n**, deoarece sunt cele mai utilizate în practică.

e1. POLARIZAREA AUTOMATĂ

La acest tip de polarizare joncțiunea grilă-sursă nu se polarizează de la o sursă de tensiune separată, ea va fi polarizată automat. Această polarizare se poate face cu configurația din figura 5.5.6. Grila se conectează la "masa" montajului printr-un rezistor de valoare foarte mare pentru a izola față de „masă" semnalul de curent alternativ în circuitele de amplificare.



$I_D = 2{,}573mA$

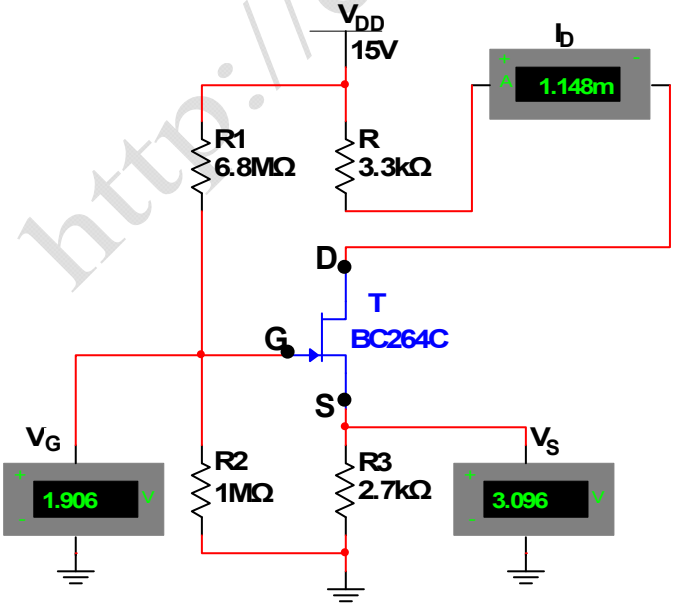
$V_{GS} = V_G - V_S = 0 - 0{,}841 = -0{,}841$

PSF(-0,84V ; 2,57mA)

Figura 5.5.6 Polarizarea automată a unui tranzistor TEC-J cu canal N

e2. POLARIZAREA PRIN DIVIZOR DE TENSIUNE

La acest tip de polarizare joncțiunea grilă-sursă se polarizează invers prin intermediul unui divizor rezistiv de tensiune. Circuitul de polarizare este prezentat în figura 5.5.7



$I_D = 1{,}15mA$

$V_{GS} = V_G - V_S = 1{,}91 - 3{,}09 = -1{,}18V$

PSF(-1,18 ; 1,15)

Figura 5.5.7 Polarizarea prin divizor de tensiune a unui tranzistor TEC-J cu canal N

http://eprofu.ro/electronica

5.5.2 TRANZISTOARE CU GRILĂ IZOLATĂ (TEC-MOS)

Structura TEC-MOS diferă de structura TEC-J prin faptul că **poarta (grila)** tranzistorului este izolată față de canal printr-un stat subțire de dioxid de siliciu (SiO_2). Datorită izolației realizată de stratul de oxid, aceste tranzistoare au rezistența de intrare foarte mare (de ordinul 10^{15} Ω) şi curentul de grilă extrem de mic (de ordinul 10^{-15} A).

În funcție de modul de funcționare sunt două categorii de TEC-MOS:

- **TEC-MOS cu canal inițial** – la acest tip de tranzistoare canalul este întotdeauna prezent fiind realizat prin mijloace tehnologice
- **TEC-MOS cu canal indus** – la acest tip de tranzistoare canalul apare în condițiile în care tranzistorul este polarizat corespunzător

a. Structurile de bază şi simbolurile dispozitivelor TEC-MOS.

a1. TEC-MOS cu canal inițial.

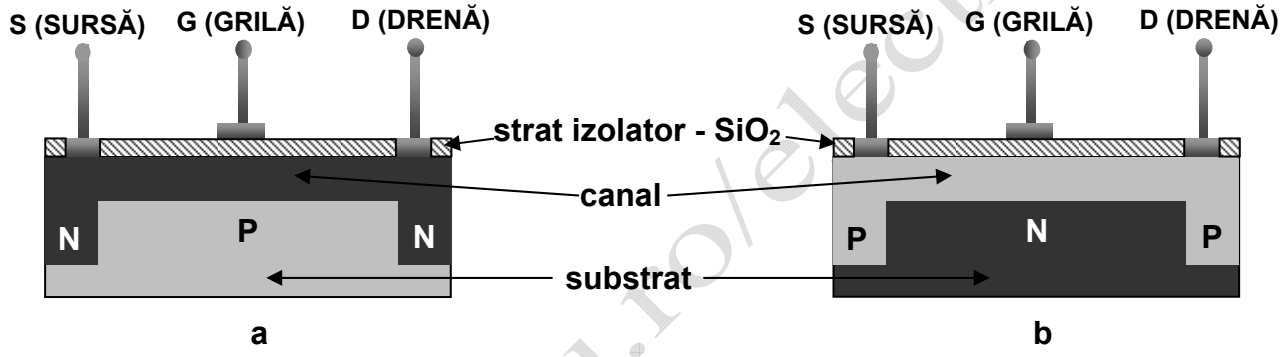


Figura 5.5.8 Structură TEC-MOS cu canal inițial a. canal n b. canal p

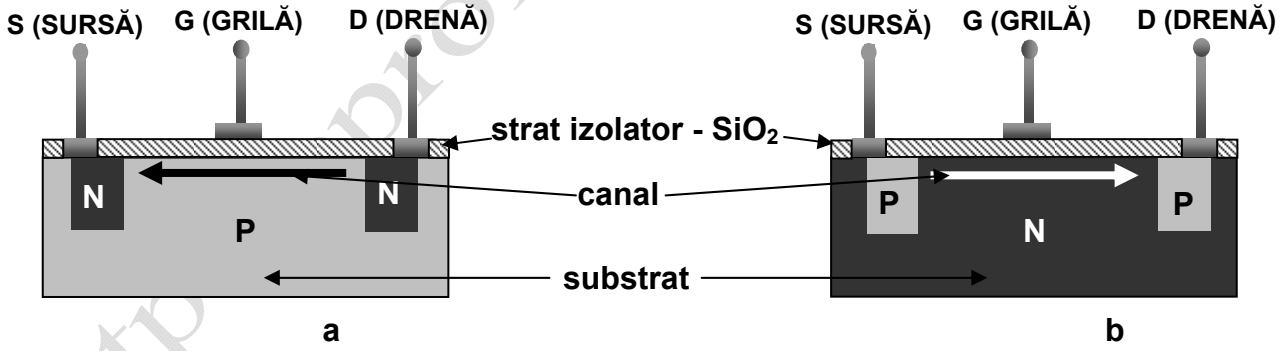


Figura 5.5.9 Structură TEC-MOS cu canal indus a. canal n b. canal p

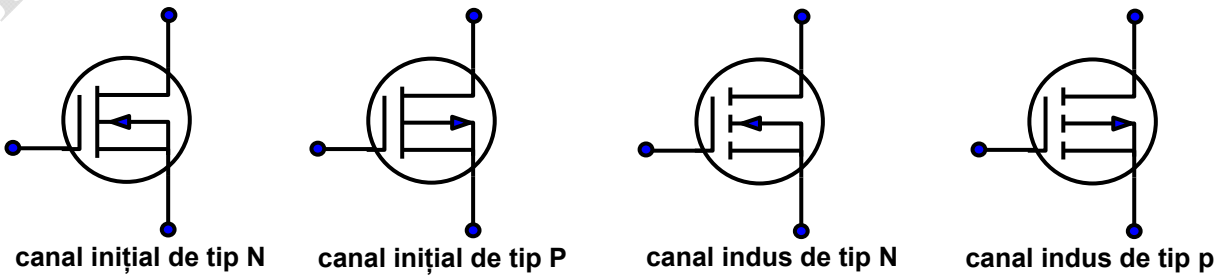


Figura 5.5.10 Simboluri grafice pentru TEC-MOS

http://eprofu.ro/electronica

b. Principiul de funcționare al dispozitivelor TEC-MOS.

b1. Funcționarea unui dispozitiv TEC-MOS cu canal inițial N

Un TEC-MOS, în funcție de modul de polarizare al grilei, poate lucra în **regim de sărăcire** sau în **regim de îmbogățire**. Dacă **tensiunea** aplicată **pe grilă este negativă** tranzistorul lucrează în **regim de sărăcire** (fig.5.5.11 a), iar dacă **tensiunea** aplicată **pe grilă este pozitivă** tranzistorul lucrează în **regim de îmbogățire** (fig.5.5.11 b).

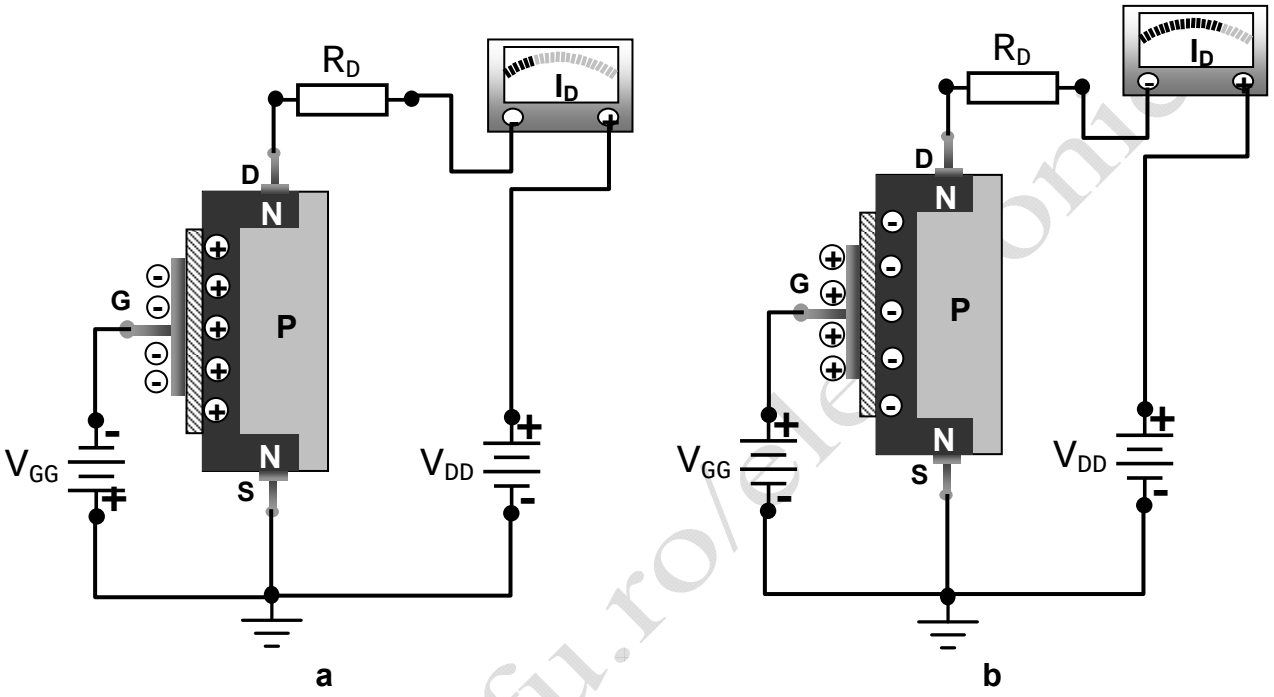


Figura 5.5.11 Funcționarea unui TEC-MOS cu canal inițial N

Dacă pe grilă se aplică o tensiune negativă, sarcinile negative de pe grilă îndepărtează electronii de conducție din canalul n, care vor lăsa în urma lor goluri. Deoarece canalul rămâne sărăcit în electroni, conductivitatea lui scade, ceea ce duce la scăderea intensității curentului de drenă $\mathbf{I_D}$. Cu cât creşte tensiunea $\mathbf{V_{GG}}$ cu atât scade curentul $\mathbf{I_D}$, până ce canalul se goleşte complet şi curentul $\mathbf{I_D}$ devine nul (figura 5.5.11 a).

Dacă pe grilă se aplică o tensiune pozitivă, sarcinile pozitive de pe grilă atrag electronii de conducție din canalul n. Deoarece canalul se îmbogățeşte în electroni, conductivitatea lui creşte, ceea ce duce la creşterea intensității curentului de drenă $\mathbf{I_D}$. Cu cât creşte tensiunea $\mathbf{V_{GG}}$ cu atât creşte curentul $\mathbf{I_D}$ (figura 5.5.11 b).

În cazul TEC-MOS cu canal inițial P, tranzistoarele funcționează în mod similar, cu excepția faptului că polaritățile tensiunilor sunt inversate.

În cele mai multe cazuri, aceste tranzistoare sunt utilizate în **regim de sărăcire**.

http://eprofu.ro/electronica

b2. Funcționarea unui dispozitiv TEC-MOS cu canal indus

La aceste tranzistoare canalul de conducție nu este realizat constructiv (figura 5.5.12 a). Canalul de conducție este indus dacă tranzistorul este polarizat corect cu o tensiune grilă-sursă mai mare decât tensiunea de prag (figura 5.5.12 b).

TEC-MOS cu canal indus lucrează numai în regim de îmbogățire.

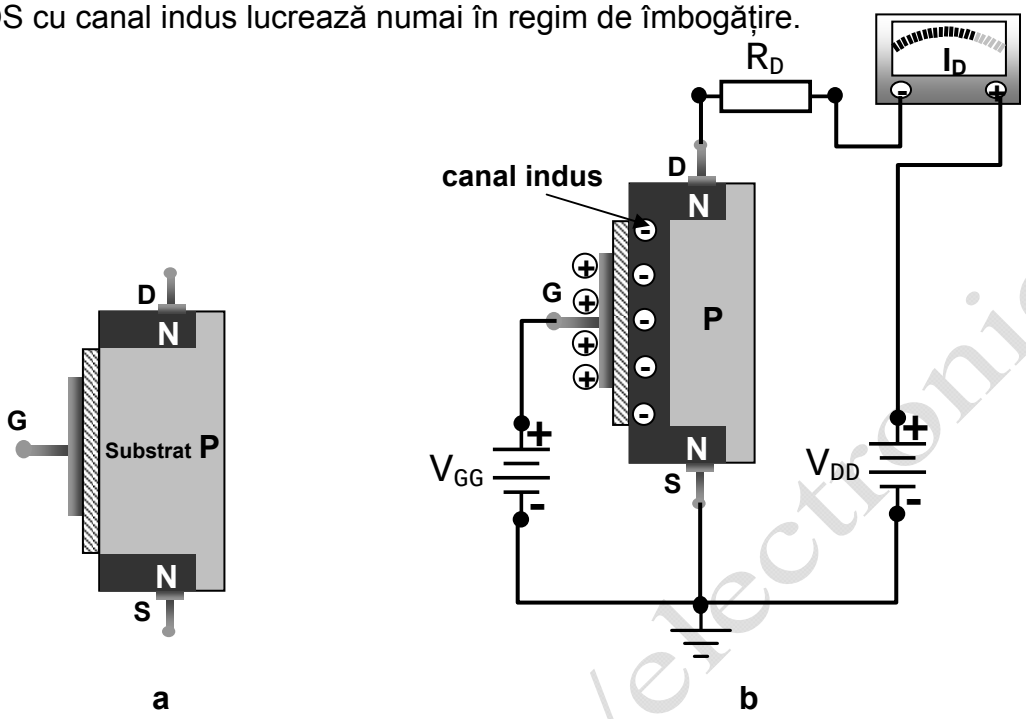


Figura 5.5.12 Funcționarea unui TEC-MOS cu canal indus N

Dacă pe grila tranzistorului se aplică o tensiune pozitivă mai mare decât tensiunea de prag, aceasta generează pe suprafața substratului un strat subțire de sarcini negative în regiunea de substrat din vecinătatea grilei. Astfel se induce un canal între drenă şi sursă a cărui conductivitate creşte odată cu creşterea tensiunii grilă-sursă. Cu cât creşte tensiunea $\mathbf{V_{GG}}$ cu atât creşte curentul $\mathbf{I_D}$ (figura 5.5.12 b).

Un TEC-MOS obişnuit are canalul de conducție îngust şi lung ceea ce duce la o rezistență drenă-sursă mare. Acest lucru limitează utilizarea tranzistoarelor în circuite de curenți mici. Pentru utilizarea tranzistoarelor în circuite de putere trebuie modificate din construcție dimensiunile şi forma canalului. Prin lărgirea şi scurtarea canalului, rezistența lui scade, permițând obținerea unor tensiuni şi curenți mai mari.

Precauții la manevrarea TEC-MOS

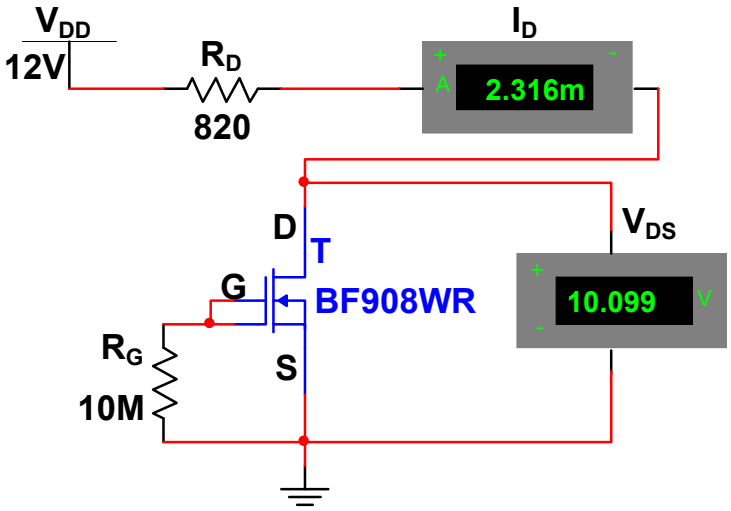
Dispozitivele TEC-MOS se pot distruge foarte uşor datorită descărcărilor electrostatice. Pentru a prevenii această situație trebuie luate următoarele măsuri de precauție:

- dispozitivele TEC-MOS trebuie păstrate în ambalaj din material antistatic cu terminalele scurtcircuitate cu staniol sau un conductor metalic subțire
- scurtcircuitul dintre terminale se îndepărtează numai după ce tranzistorul a fost lipit
- nu este permisă aplicarea unui semnal de intrare pe grila tranzistorului dacă circuitul în care este acesta nu este alimentat în curent continuu.

http://eprofu.ro/electronica

c. Polarizarea dispozitivelor TEC-MOS.

c1. Polarizarea dispozitivelor TEC-MOS cu canal inițial N

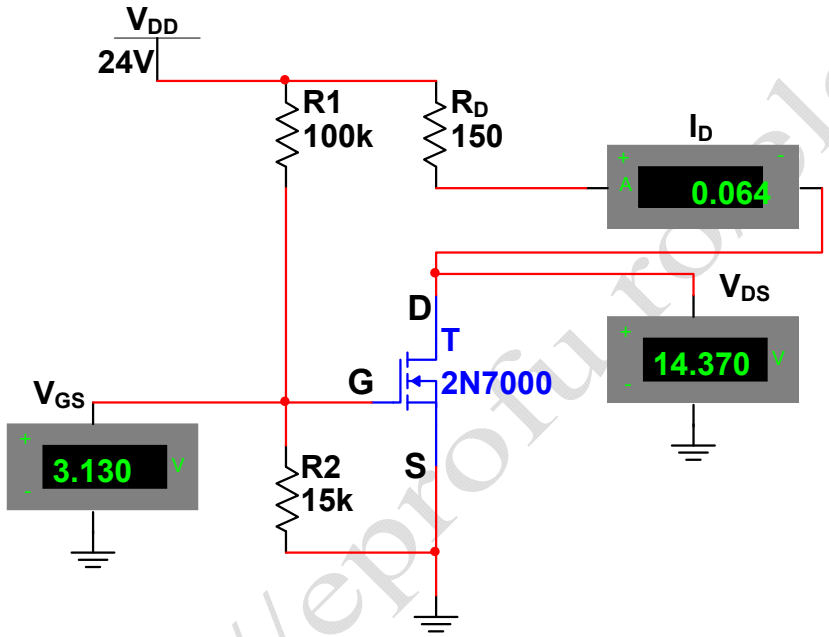


Tranzistorul **BF908WR** are două grile deoarece are un canal inițial şi un canal indus.

$$V_{DS} = V_{DD} - R_D \cdot I_D$$

Figura 5.5.13 Polarizare la zero a unui dispozitiv TEC-MOS cu canal inițial N

c2. Polarizarea dispozitivelor TEC-MOS cu canal indus N



Date de catalog **2N7000**

$V_{GS(prag)}$ = 2 V

$I_{D(cond)}$=75mA la V_{GS}= 4,5V

$I_{D(cond)}$=500mA la V_{GS}=10V

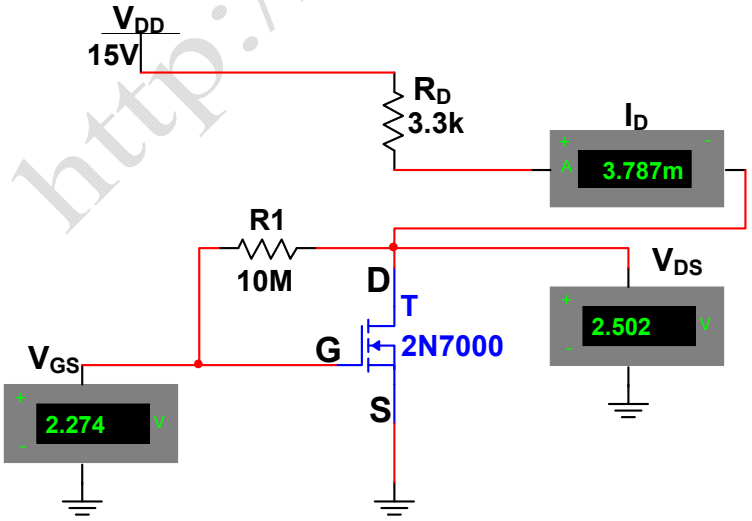
Valori obținute cu simulatorul MULTISIM:

V_{GS} = 3,13 V

I_D = 64 mA

V_{DS} = 14,37 V

Figura 5.5.14 Polarizare prin divizor de tensiune a unui TEC-MOS cu canal indus N



Valori obținute cu simulatorul MULTISIM:

V_{GS} = 2,27 V

I_D = 3,78 mA

V_{DS} = 2,50 V

Figura 5.5.15 Polarizare cu reacție în drenă a unui TEC-MOS cu canal indus N

http://eprofu.ro/electronica