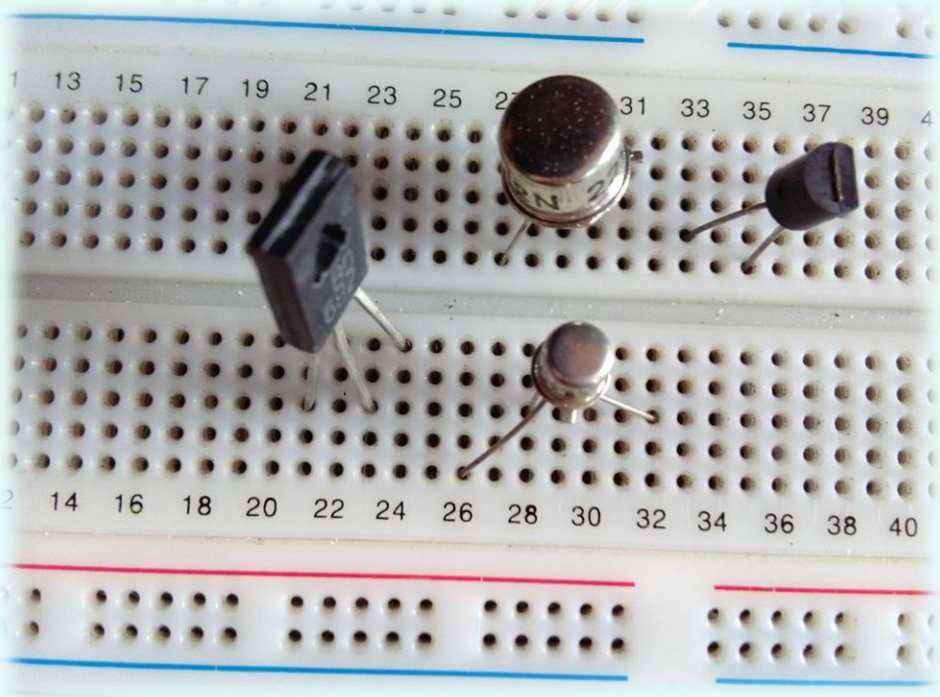
Curs 13
TRANZISTOARE BIPOLARE ȘI CMOS



CUPRINS

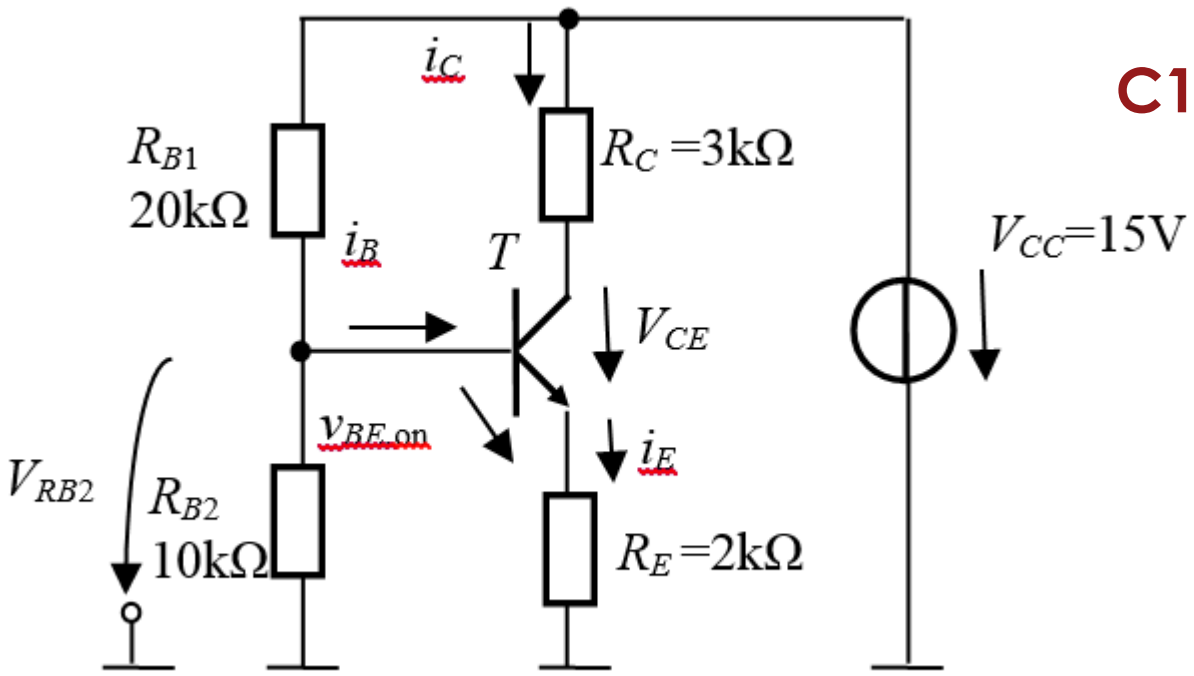
- TB
  - Punct static de funcționare – problemă
- Tranzistoare TECMOS
  - Simboluri
  - Structura fizică
  - Principiul de funcționare
  - Caracteristici de transfer
  - Carateristici de ieșire
  - Regiuni de funcționare
  - Punct static de funcționare
  - Moduri de utilizare

pentru TMOS cu canal *n indus* şi canal *p indus.*

Problemă

Pentru circuitul dat, β = 100 şi $v_{BE,on}$ = 0.7V.

a) care este PSF Q(V_{CE}, I_C)?
b) în ce regiune se află *T* ?



Rezolvare

a) Deoarece I_B este foarte mic şi $I_C = I_E + I_B$, rezultă $I_C = I_E$.

V_{RB2} - divizorul de tensiune

$$V_{RB2} = \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} \cdot V_{CC}$$

$$V_{RB2} = \frac{10k}{30k} \cdot 15V = 5V$$

$$-V_{RB2} + v_{BE,\,on} + V_{RE} = 0$$

$$V_{RE} = V_{RB2} - v_{BE,\,on}$$

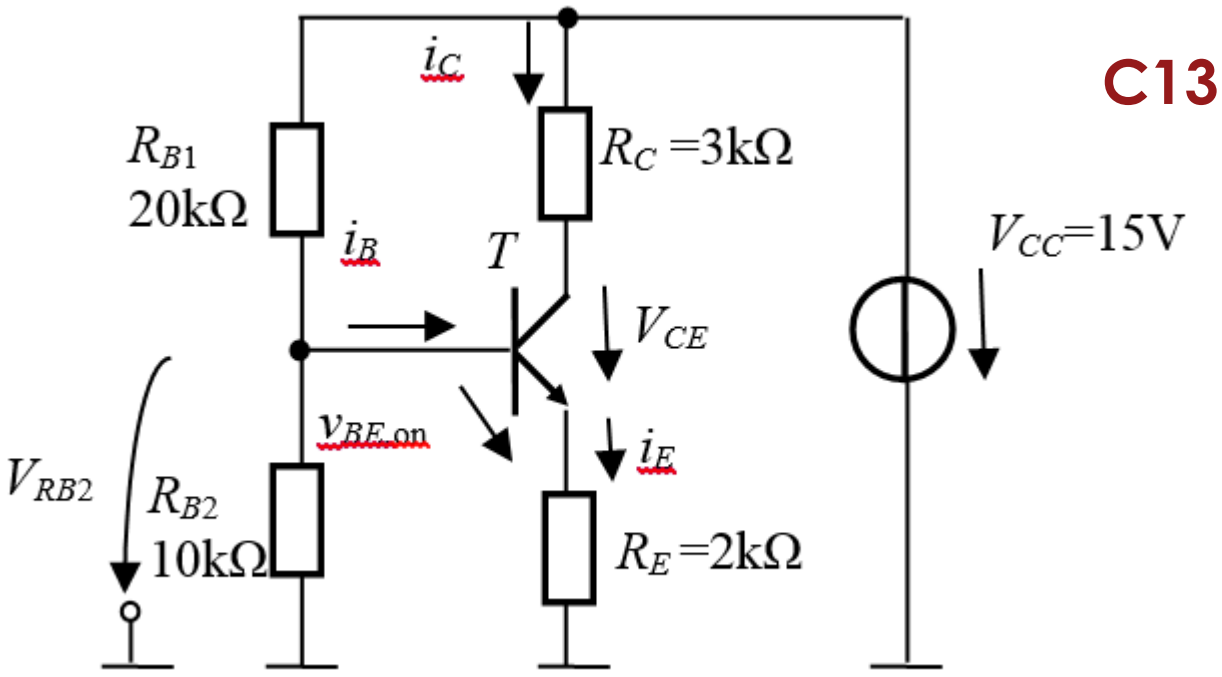
$$V_{RE} = I_E \cdot R_E$$

$$V_{RE} = 5 - 0.7 = 4.3V$$

DE TB

C13

$$V_{RE} = I_E \cdot R_E$$ și $$I_C = I_E$$



$$I_C = \frac{V_{RE}}{R_E}$$

$$I_C = \frac{4.3V}{2k\Omega} = 2.15mA$$

$$-V_{CC} + I_C \cdot R_C + V_{CE} + I_C \cdot R_E = 0$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C \cdot (R_C + R_E)$$

$$V_{CE} = 15 - 2.15 \cdot 10^3 \cdot 5 \cdot 10^3$$

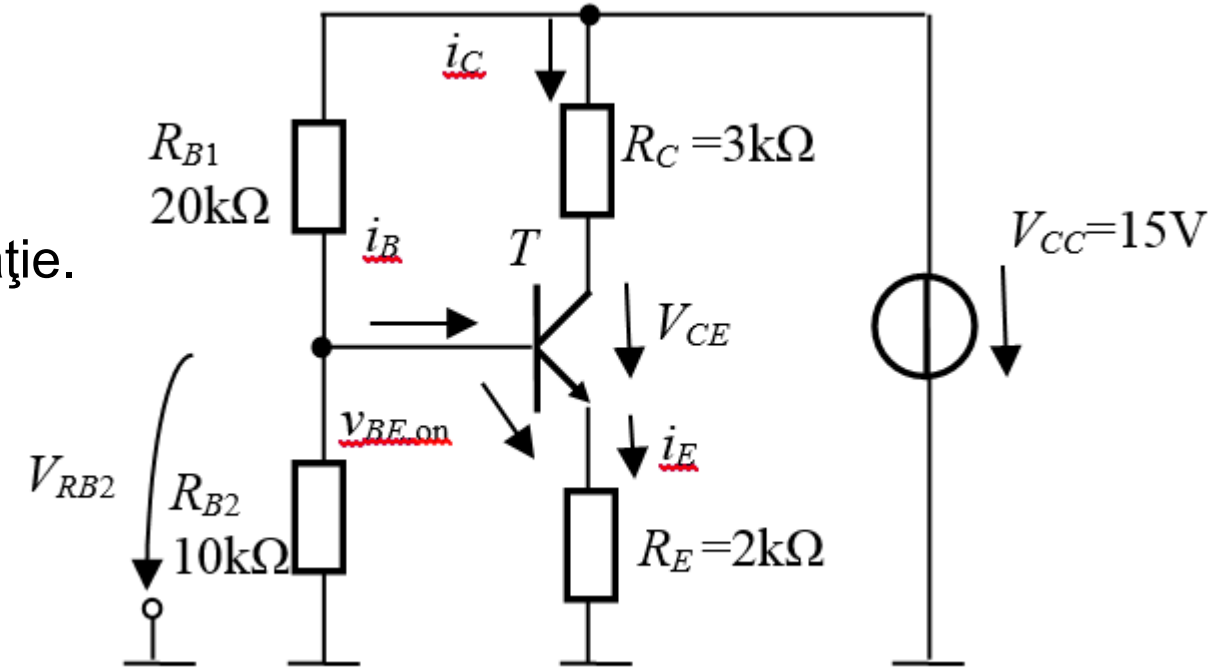
$$V_{CE} = 4.25V$$

Așadar

$$\boxed{Q(2.15mA;\ 4.25V)}$$

b) Deoarece $V_{RB2} > v_{BE,\,on}$,

T se află în regiunea activă sau în regiunea de saturaţie.



$I_C < I_{Cex}$

?

$I_C > I_{Cex}$

$$I_{Cex} = \frac{V_{CC} - V_{CE,ex}}{R_C + R_E}$$

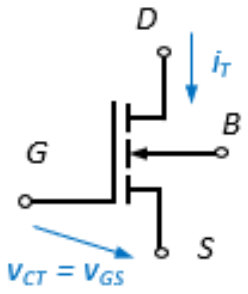
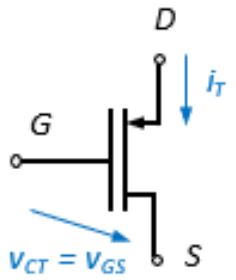
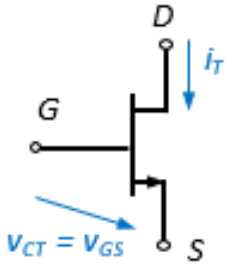
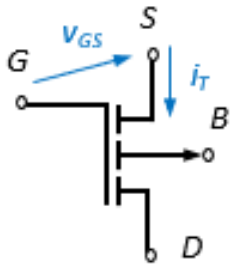
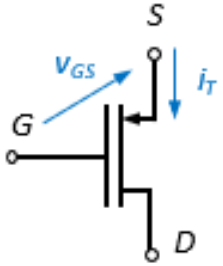
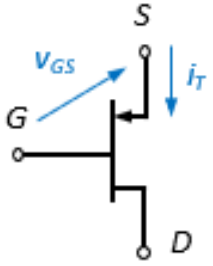
$$I_{Cex} = \frac{15 - 0.2}{3k + 2k} = \frac{14.8}{5 \cdot 10^3} = 2.96mA$$

$\boxed{I_C < I_{Cex}}$

$2.15mA < 2.96mA$

TB → regiunea activă

Simboluri

TECMOS	Simboluri generale, cu evidenţierea terminalului substrat B	Simboluri simplificate, cu evidențierea canalului	Simboluri simplificate, fără evidențierea canalului
Canal *n* indus			
Canal *p* indus			

D – drena

G – grila

S – sursa

B – baza (substrat)

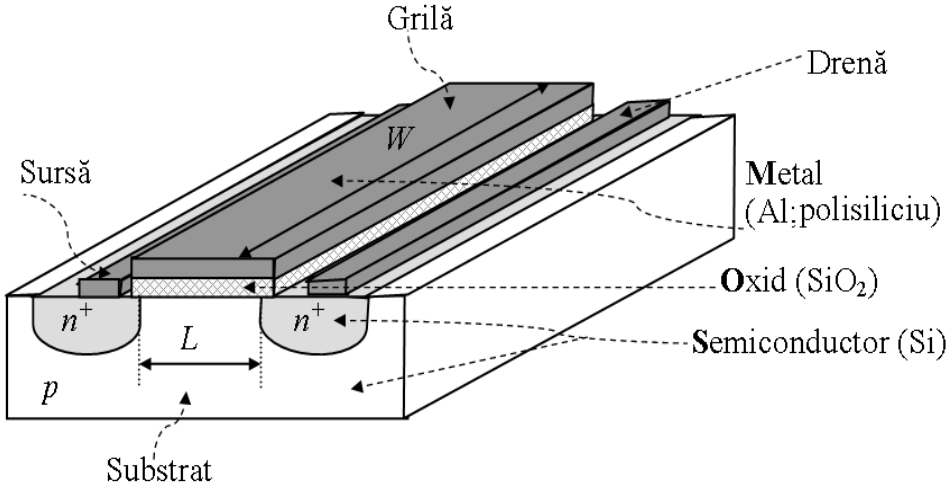
Avantaj *TECMOS* - dimensiuni mult mai mici comparativ cu un *TB*, aria ocupată pe chip fiind mult mai redusă

Structura fizică

Suprapunerea a trei straturi de material: **M**etal, **O**xid (SiO_2) și substratul format din **S**emiconductor – *MOS*

Valorile tipice ale dimensiunilor tranzistorului :

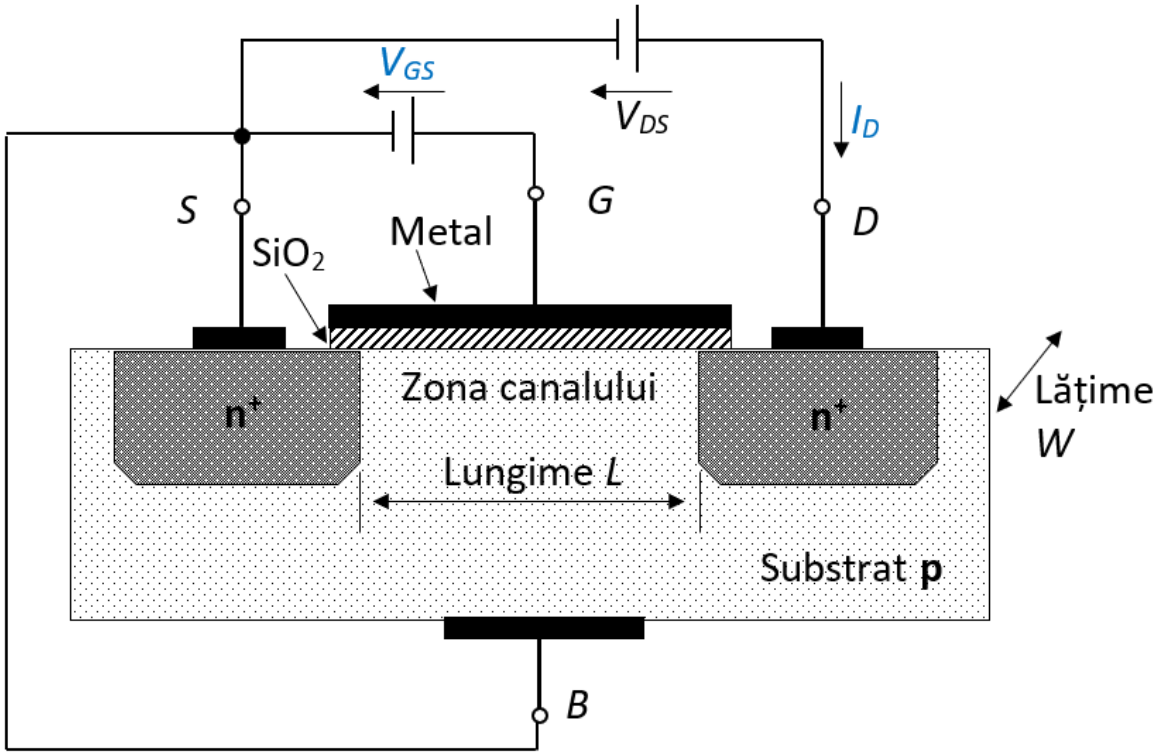
- grosimea stratului de SiO_2 - între 0,001 și 0,01 μm,
- lungimea canalului *L* - între 0.03 și 1 μm,
- lățimea canalului W - între 0.1 to 100 μm.



Canal n indus

Condiții pentru a avea curent între drenă și sursă:

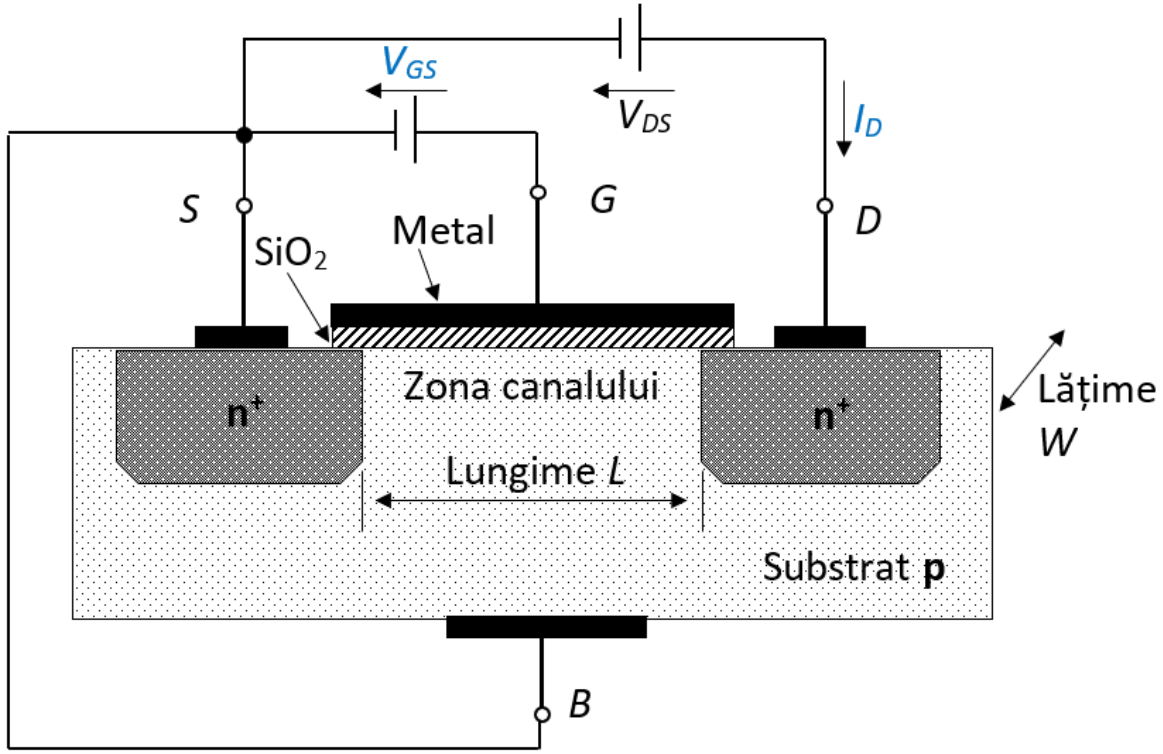
- formarea unui canal (canal indus) cu purtători majoritari de tip *n* de la drenă la sursă
- crearea unei diferențe de potențial pozitive drenă – sursă care să antreneze purtătorii pentru a creea un curent electric
- aplicarea unei tensiuni V_{GS} mai mare decât tensiunea de prag



OPȚIONAL

Structura fizică

Blocare



V_P - tensiunea de prag

$$V_{GS} < V_{Pn}$$

$$I_D = 0 \text{ mA}$$

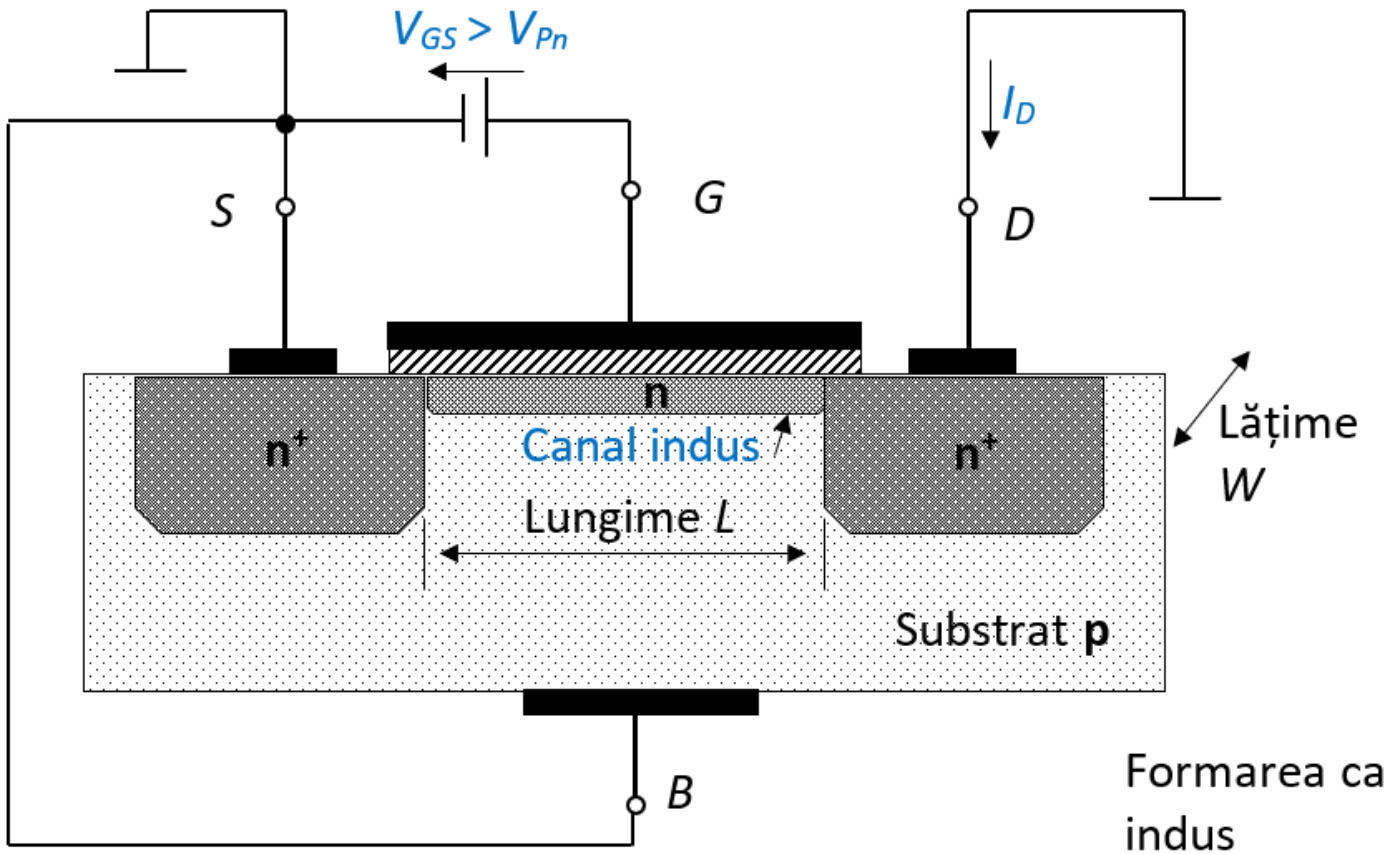
Nu se formează canal de tip *n* între *D* și *S*

NMOS - în blocare

OPȚIONAL

Structura fizică

Conducție - Formarea canalului indus



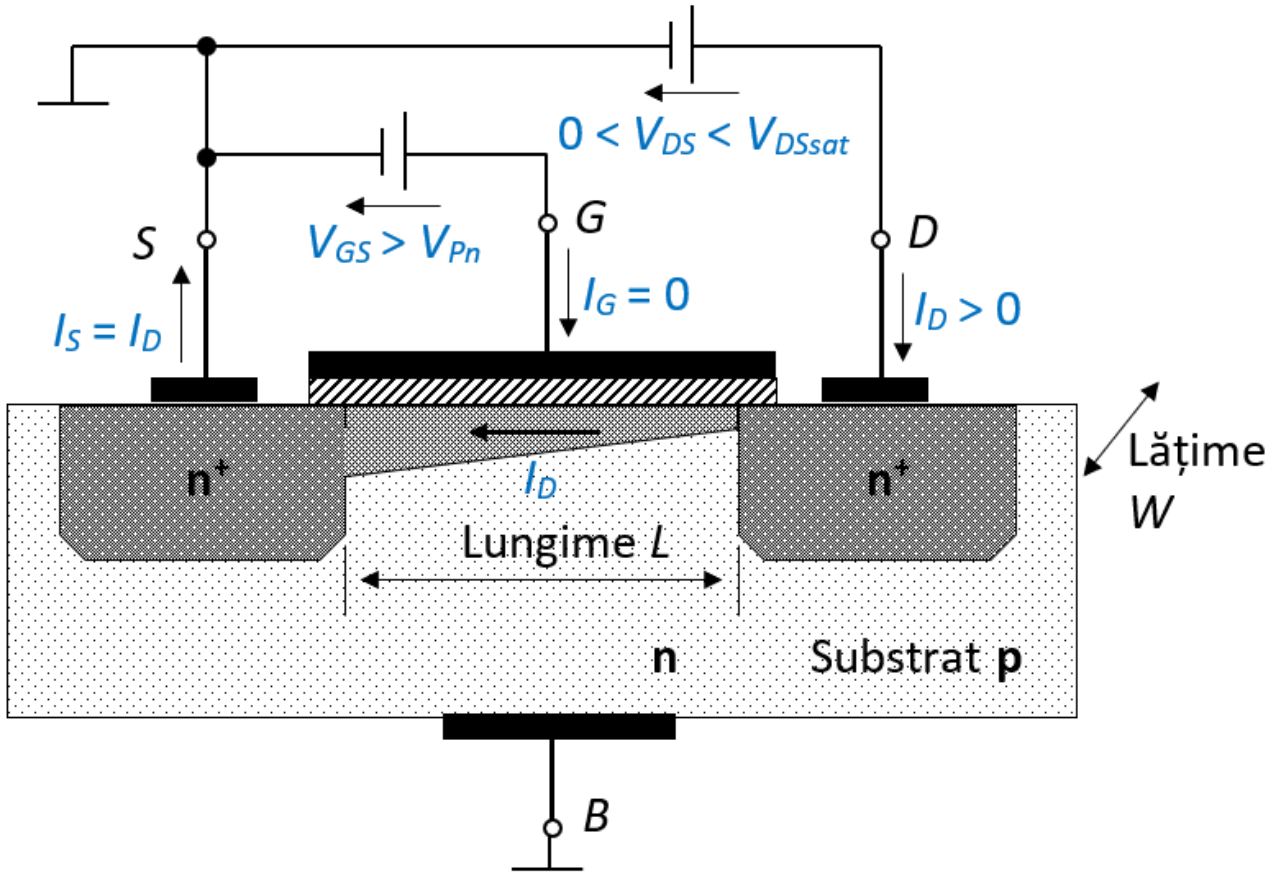
Formarea canalului *n* indus

$V_{GS} > V_{Pn}$
$V_{DS} = 0\ V$
$I_D = 0\ mA$

Canalul dintre *D* și *S* este format în momentul în care există suficienți electroni acumulați la suprafața substratului astfel încât să permită trecerea curentului între *D* și *S* la aplicarea unei tensiuni exterioare tranzistorului, V_{DS}.

Structura fizică

Conducție – Regiunea liniară



Funcționarea *NMOS* în regiunea liniară

OPȚIONAL

Curentul depinde liniar de V_{GS}

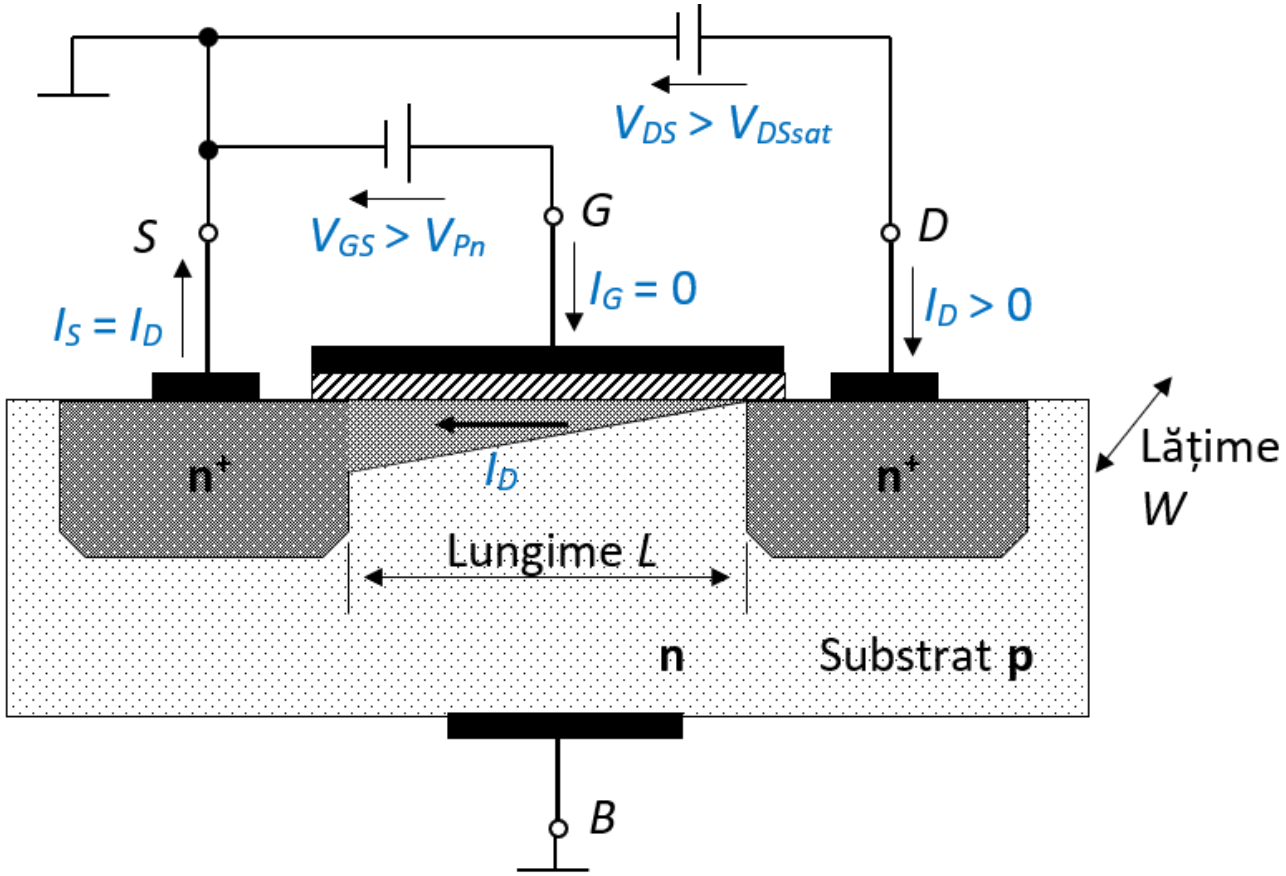
$$V_{GS} > V_{Pn}$$
$$0\ V < V_{DS} < V_{DSsat}$$
$$V_{DSsat} = V_{GS} - V_{Pn}$$
$$I_D > 0\ mA$$
$$I_D = \beta \cdot \left[2 \cdot (V_{GS} - V_{Pn}) \cdot V_{DS} - V_{DS}^2\right]$$
$$I_D = \frac{K}{2} \cdot \frac{W}{L} \cdot \left[2 \cdot (V_{GS} - V_{Pn}) \cdot V_{DS} - V_{DS}^2\right]$$
$$\beta = \frac{K}{2} \cdot \frac{W}{L}$$

- parametrul β [μA/V²] este un parametru constructiv al tranzistorului,
- parametrul transconductanţă K [μA/V²] depinde de mobilitatea purtătorilor şi de capacitatea stratului de oxid izolator,
- W şi L sunt dimensiunile fizice ale canalului [μm].

Structura fizică

OPȚIONAL

Conducție – Regiunea activă (sau regiunea de strangulare, sau regiunea de saturație)

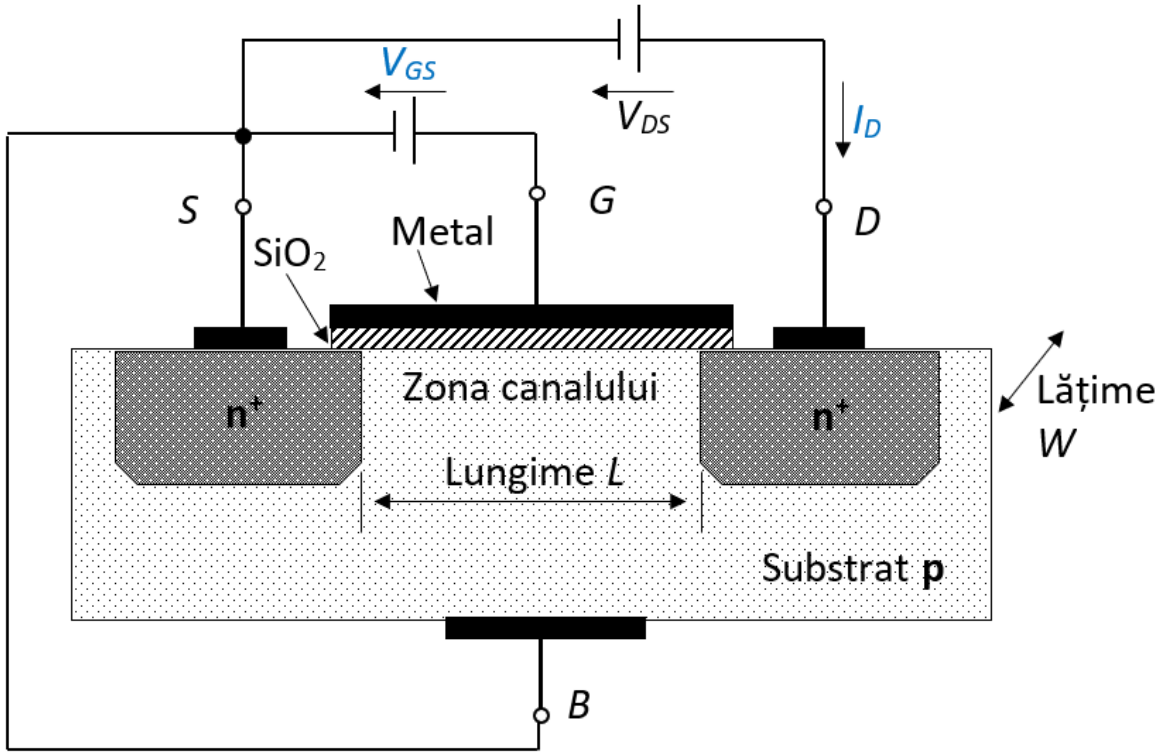


Funcționarea NMOS în regiunea activă

Curentul depinde neliniar de $(V_{GS} - V_P)^2$

$$V_{GS} > V_{Pn}$$
$$V_{DS} > V_{DSsat}$$
$$V_{DSsat} = V_{GS} - V_{Pn}$$
$$I_D > 0 \ mA$$
$$I_D = \beta \cdot (V_{GS} - V_{Pn})^2 \cdot \left(1 + \frac{V_{DS}}{V_A}\right) \cong \beta \cdot (V_{GS} - V_{Pn})^2$$
$$I_D = \frac{K}{2} \cdot \frac{W}{L} \cdot (V_{GS} - V_{Pn})^2 \cdot \left(1 + \frac{V_{DS}}{V_A}\right) \cong \frac{K}{2} \cdot \frac{W}{L} \cdot (V_{GS} - V_{Pn})^2$$
$$\beta = \frac{K}{2} \cdot \frac{W}{L}$$

Curentul prin tranzistor



Curentul prin tranzistor I_D depinde de:

V_{GS} - formarea canalului

V_{DS} – deplasarea dirijată a purtătorilor între D și S

$$I_D = f(V_{GS}, V_{DS})$$

Principiu de funcționare

Funcţionarea TMOS - **caracteristicile statice** la terminalele **TMOS cu canal n**

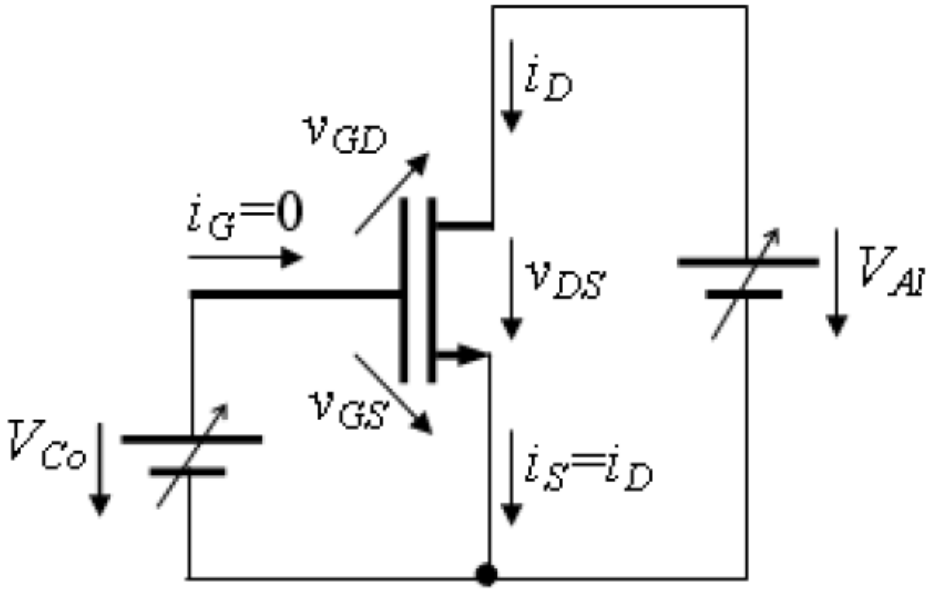
$$\boxed{I_D = f(V_{GS}, V_{DS})}$$

- **Familia de caracteristici de transfer**

$$i_D(v_{GS}) \text{ cu parametrul } v_{DS}$$

- **Familia de caracteristici de ieșire**

$$i_D(v_{DS}) \text{ cu parametrul } v_{GS}$$



$$i_D + i_G = i_S \text{ nod de curent}$$

$$i_G = 0$$

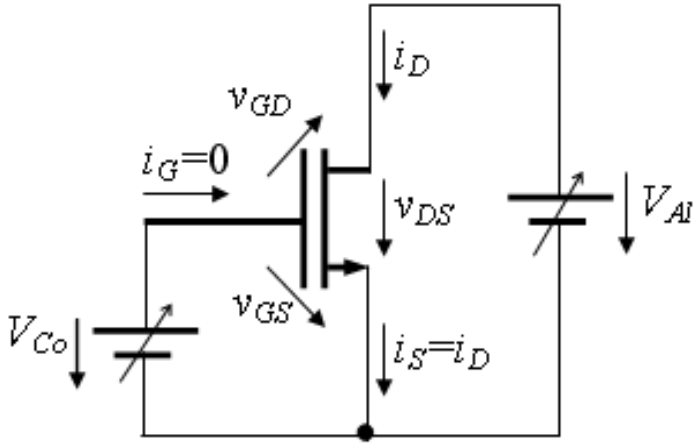
$$i_D = i_S$$

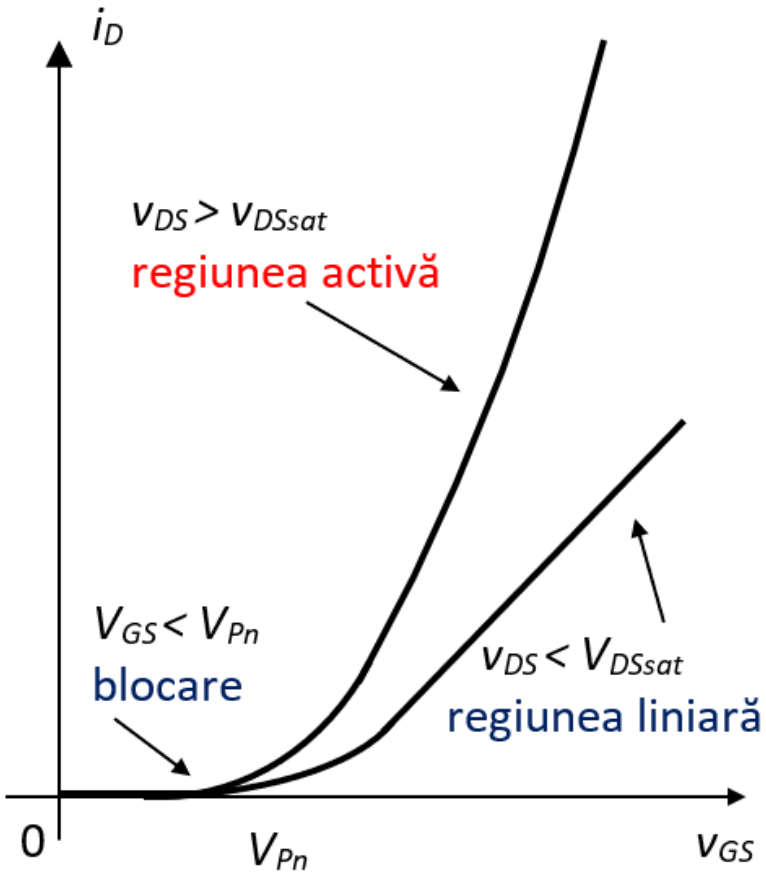
$$v_{GS} = v_{Co}$$

$$v_{DS} = v_{Al}$$

Caracteristici de transfer

$i_D(v_{GS})$ cu parametrul v_{DS}





- Regiunea de saturație $v_{DS} > V_{DSsat}$

$$i_D = \beta(v_{GS} - V_P)^2$$

i_D – depinde doar de pătratul v_{GS}

$$V_{DSsat} = v_{GS} - V_P$$

tensiunea drenă-sursă de saturație

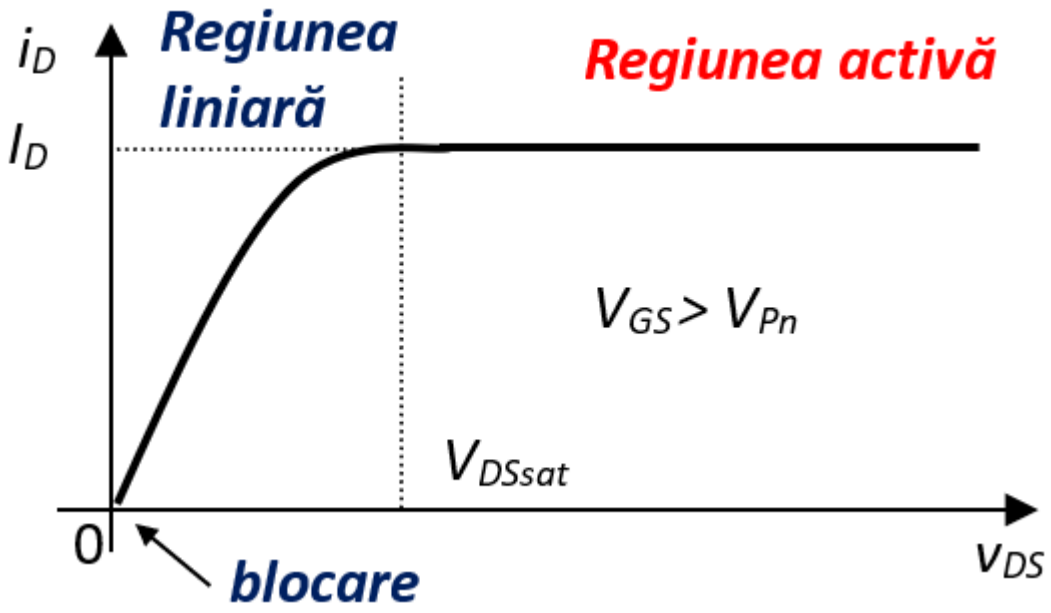
- Regiunea liniară $v_{DS} < V_{DSsat}$, v_{DS} – mic,

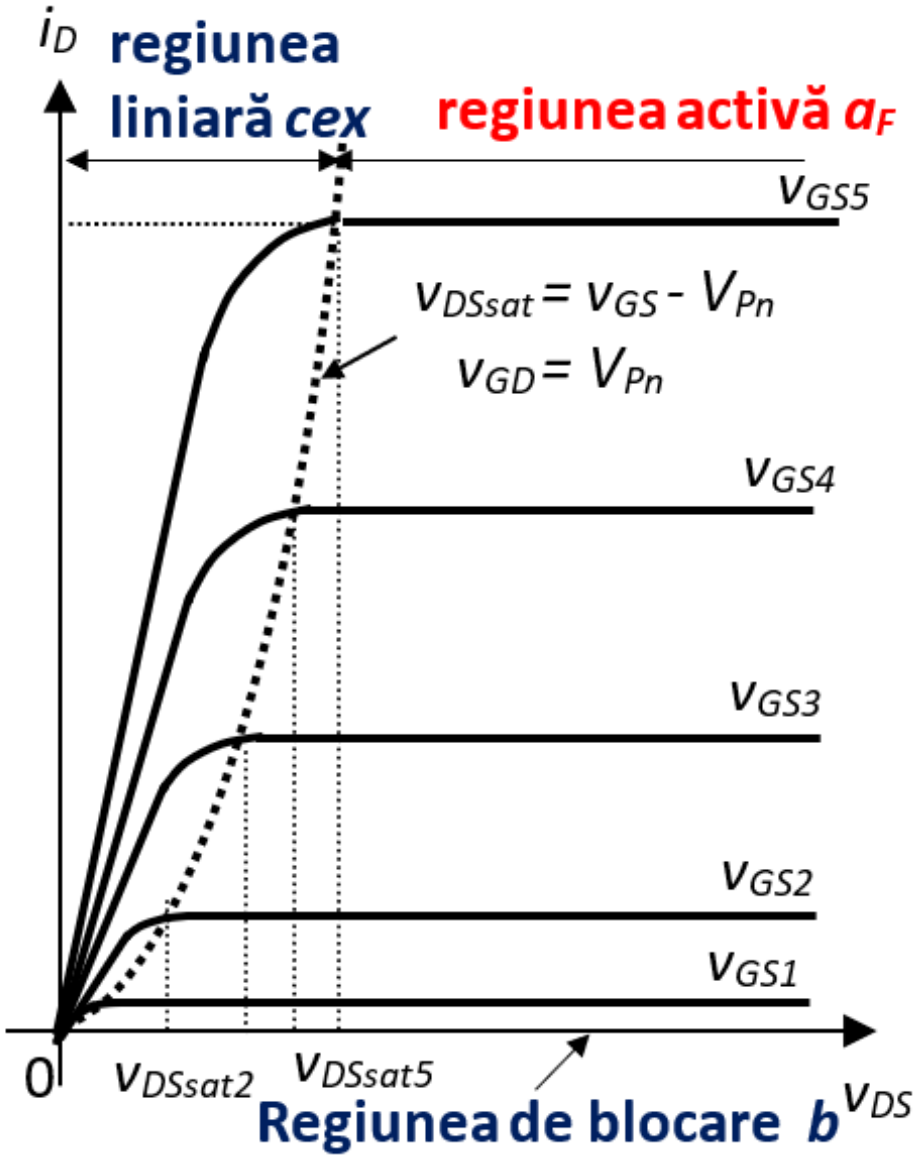
$$i_D = \beta[2(v_{GS} - V_P)v_{DS} - v_{DS}^2]$$

i_D – depinde liniar de tensiunea de comandă v_{GS}
- depinde de tensiunea de ieșire v_{DS},

Caracteristici de ieșire

$i_D(v_{DS})$ cu parametrul v_{GS}





Regiuni de funcționare

TECMOS-urile au patru regiuni de funcționare:

- regiunea de blocare *b*, axa v_{DS} pe care $i_D = 0$ indiferent de valoarea v_{DS};
- regiunea de conducţie extremă *cex*, regiunea liniară;
- regiunea activă directă a_F, regiunea de saturaţie;
- regiunea activă inversă a_R, în care rolurile terminalelor de *D* şi *S* se inversează.

Regiuni de funcționare

Regiunea activă

$$i_D = \beta(v_{GS} - V_P)^2$$

Regiunea liniară

$$i_D = \beta[2(v_{GS} - V_P)v_{DS} - v_{DS}^2]$$

β – parametru constructiv al tranzistorului TMOS;
– factorul beta se măsoară în μA/V², mA/V², A/V²;
– pentru tranzistoare discrete se poate extrage din caracteristicile de catalog

Pentru tranzistoarele integrate avem:

$$\beta = \frac{K}{2}\frac{W}{L}$$

$$i_D = \frac{K}{2}\frac{W}{L}(v_{GS} - V_P)^2$$

regiunea activă

K - parametrul transconductanţă şi se măsoară în μA/V²

W - lăţimea canalului prin care circulă i_D

L - este lungimea canalului prin care circulă i_D

Punct static de funcționare

Limitarea curentului comandat I_D prin NMOS

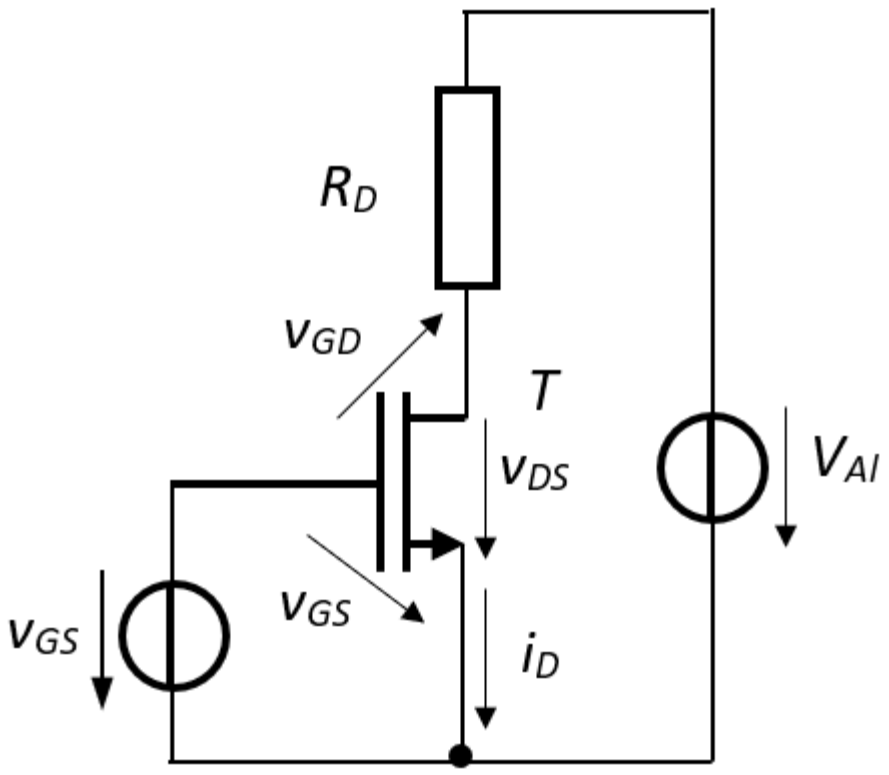
Rezistor în drenă

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

$$V_{DS} = V_{DSsat}$$

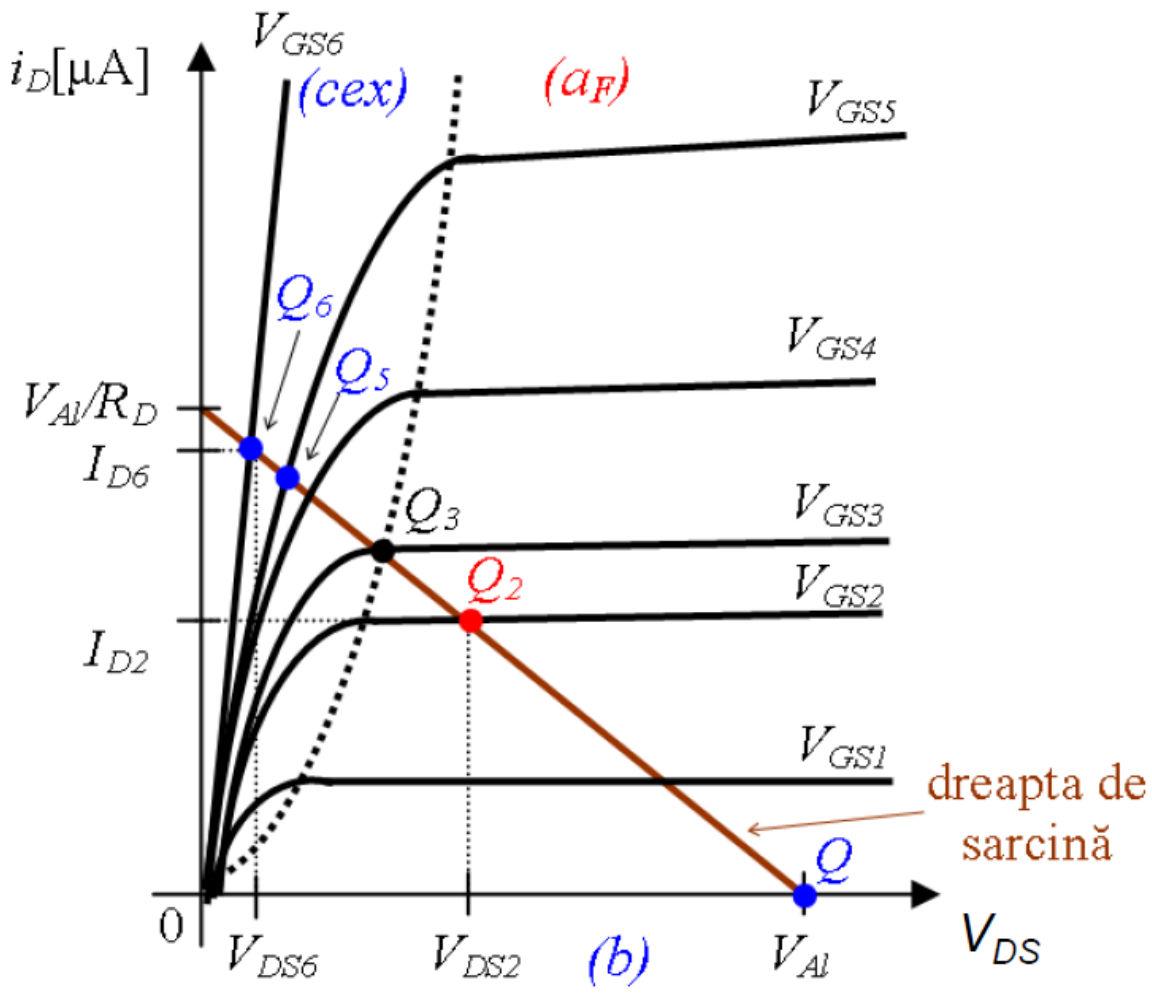
$$V_{DSsat} = V_{GS} - V_{Pn}$$

$$V_{AI} - I_D \cdot R_D = V_{GS} - V_{Pn}$$



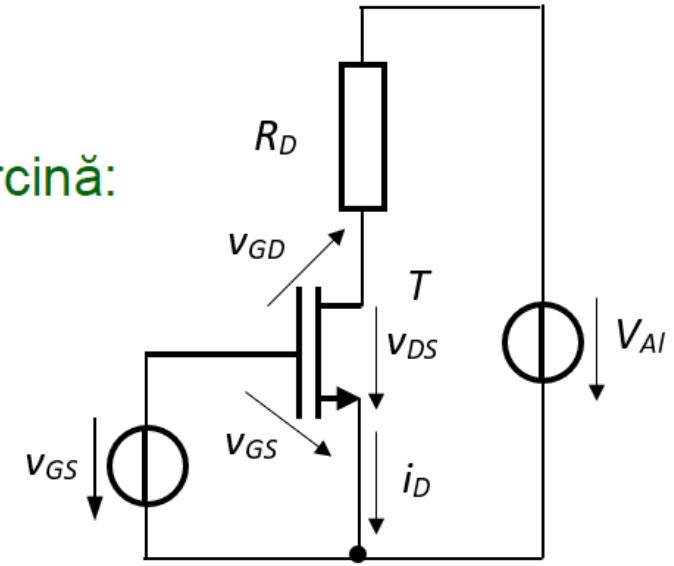
OPȚIONAL

Punct static de funcționare



Dreapta de sarcină:

$v_{DS} = V_{AI} - R_D i_D$



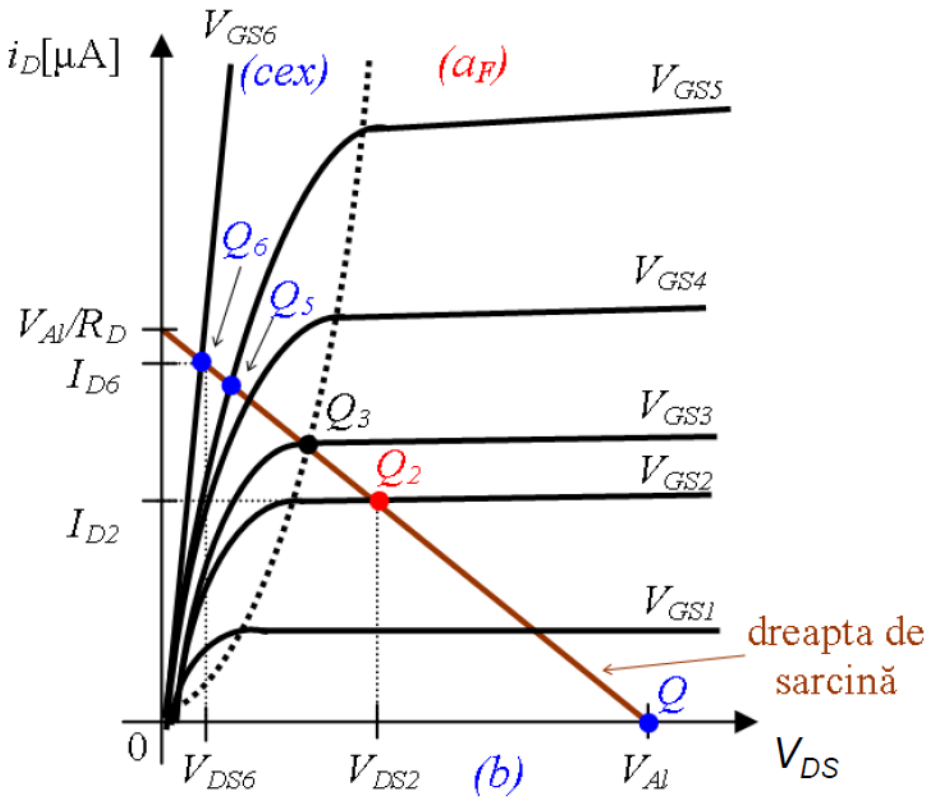
Punctul static de funcționare $Q(I_D, V_{DS})$ se află la intersecţia dintre drepta de sarcină și caracteristica corespunzătoare tensiunii v_{GS}

Moduri de utilizare

T – (*b*): $V_{GS} < V_P$

T – (a_F): $V_P < V_{GS} < V_{GS3}$

T – (*cex*): $V_{GS} > V_{GS3}$



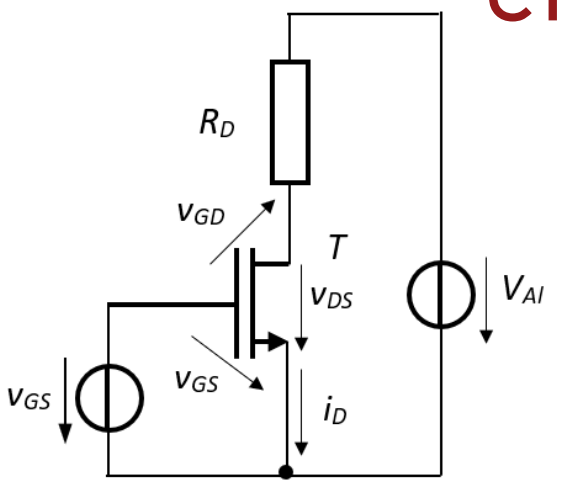
Regiunile (*cex*) şi (a_F) sunt separate de curba
$V_{DSsat} = V_{GS} - V_P$

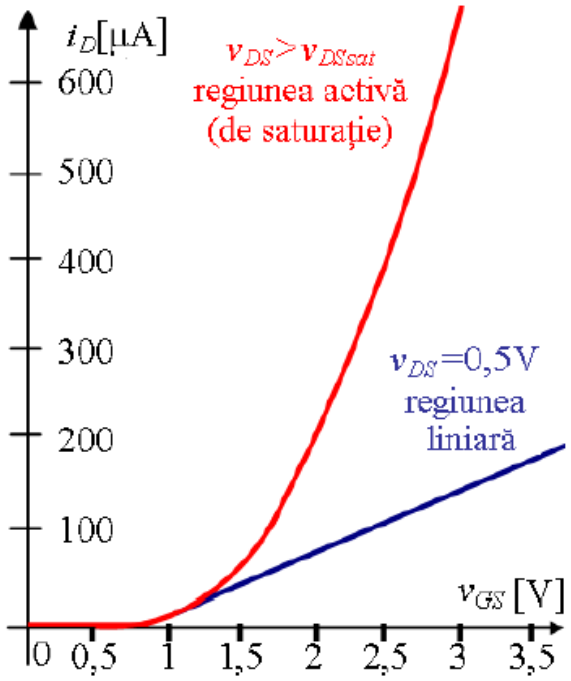
Moduri de utilizare →
- în comutare (*b*) ⇄ (*cex*)
- ca amplificator (a_F)
- rezistenta liniară comandată în tensiune, v_{DS} mică (*cex*) $r_{DS} \approx \frac{1}{2 \cdot \beta \cdot (v_{GS} - V_{Pn})}$

Exemplu 1

- Ce valori au V_{GS}, I_D, V_{DS}, V_{GD}, V_{DSsat} pentru următoarele valori ale V_{Co}?

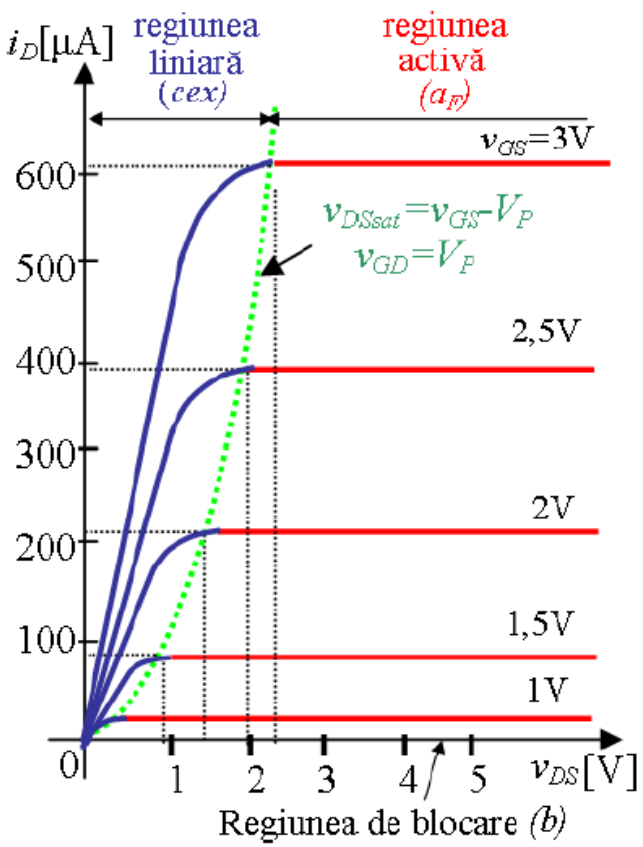
$$V_{Co1} = 0.5\text{V}$$
$$V_{Co2} = 2\text{V}$$
$$V_{Co3} = 3\text{V}$$





$i_D(v_{GS})$

V_P=0.58V, β=104μA/V²



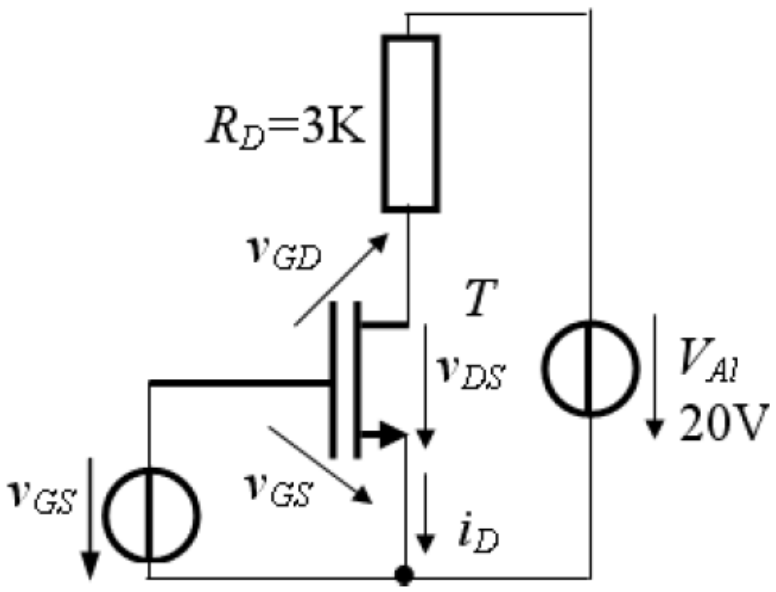
$i_D(v_{GS})$

- Plasați punctele statice de functionare $Q(V_{DS}, I_D)$, în planul caracteristicilor de ieșire.

- În ce regiuni de funcționare lucrează tranzistorul?

Exemplu 2

Pentru T se cunosc V_P=1V, β=2mA/V^2



a) În ce regiune se află *T* pentru:

i) v_{GS}=0.8V; ii) v_{GS}=2.5V; iii) v_{GS} =4V

b) Valoarea minimă a v_{GS} pentru care *T* este în (*cex*)?

Rezolvare

a) i) $v_{GS}<V_P$, deci *T* (*b*)

ii) $v_{GS}>V_P$, deci *T* (*cex*) sau (a_F)

i_D =2·(2.5 -1)^2= 4.5mA v_{DS} =20-3 · 4.5= 6.5V

comparam v_{DS} cu v_{DSsat} $v_{DS}=V_{Al}-R_D\cdot i_D$ $v_{DS\,sat}=v_{GS}-V_P$=2.5-1= 1.5V

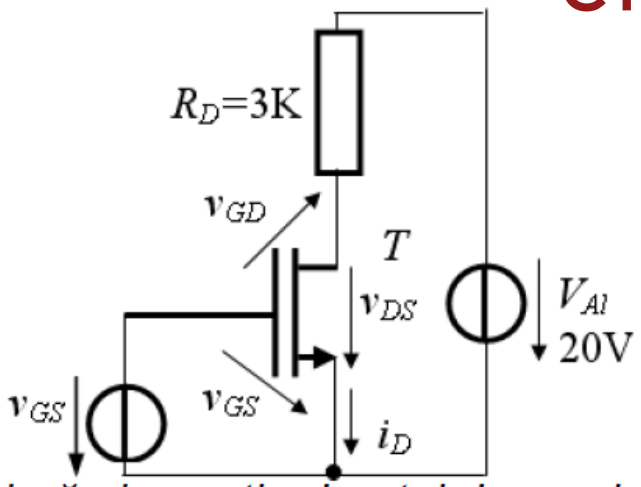
presupunem *T* în (a_F) $i_D=\beta\,(v_{GS}-V_P)^2$ $v_{DS}>v_{Dssat}$ presupunerea *T* - (a_F) este adevărată

T este în (a_F)

iii) v_{GS}=4V>V_P, deci *T* (*cex*) sau (a_F) i_D =2·(4-1)^2 =18mA presupunerea *T* - (a_F) este falsă

v_{DS} =20-3·18= -34V *T* este în (*cex*)

Exemplu 2



Altă modalitate de rezolvare iii) : compararea valorii i_D în (a_F) cu i_{Dex}

$$i_{Dex} = \frac{V_{Al} - v_{DS,ex}}{R} \approx \frac{V_{Al}}{R} = \frac{20}{3} = 6.67 \text{ mA}$$

Dacă se dorește determinarea Q în (cex) se utilizează pentru i_D *ecuația din regiunea liniară și ecuația dreptei de sarcină.*

i_D=18mA > i_{Dex}=6.67mA $\Rightarrow$ *T - (cex)*

b) Valoarea minimă v_{GSmin} pentru care *T* este în (*cex*) corespunde plasării lui *T* pe curba v_{DSsat}.

$v_{DSsat} = v_{GSmin} - V_P$

$v_{DSsat} = V_{Al} - R \cdot i_D$

$V_{Al} - R \cdot i_D = v_{Gsmin} - V_P$

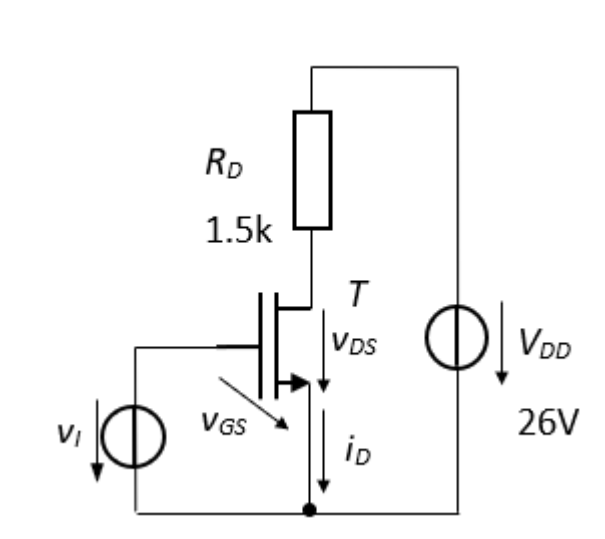
$i_D = \beta \cdot (v_{GSmin} - V_P)^2$

$(v_{GSmin} - V_P) - V_{Al} + R \cdot \beta (v_{GSmin} - V_P)^2 = 0$

din soluţia $(v_{GSmin} - V_P) > 0$

V_{GSmin} =2.744V

Exersare - P10



Pentru T se cunosc V_P=2.5V și β=1.5mA/V².

a) Care este valoarea maximă pentru v_I pentru care T este în blocare? Justificați răspunsul.

b) Dacă I_D=6mA, determinați valoarea V_{DS} și regiunea de funcționare a T.

c) Pentru circuitul de la **b)** determinați valoarea v_I.

d) Determinați cea mai mică valoare a v_I pentru care T este in (cex).

e) Modificați circuitul a.î. v_I să se obțină de la V_{DD}. Dimensionați componentele nou adăugate pentru a obține v_I=6V. În ce regiunea funcționează T?

Ce am învățat azi despre tranzistoarele CMOS?

- Simboluri
- Structura fizică
- Principiul de funcționare
- Caracteristici de transfer
- Carateristici de ieșire
- Regiuni de funcționare
- Punct static de funcționare
- Moduri de utilizare