

Regimul de comutație al elementelor semiconductoare

Dioda

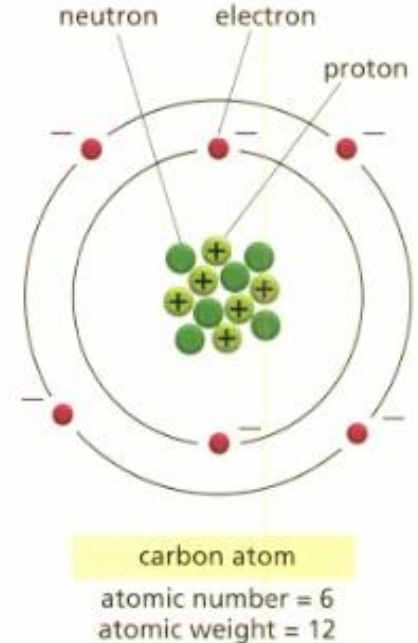
Tranzistorul Bipolar

Tranzistorul MOS Unipolar

Materiale semiconductoare

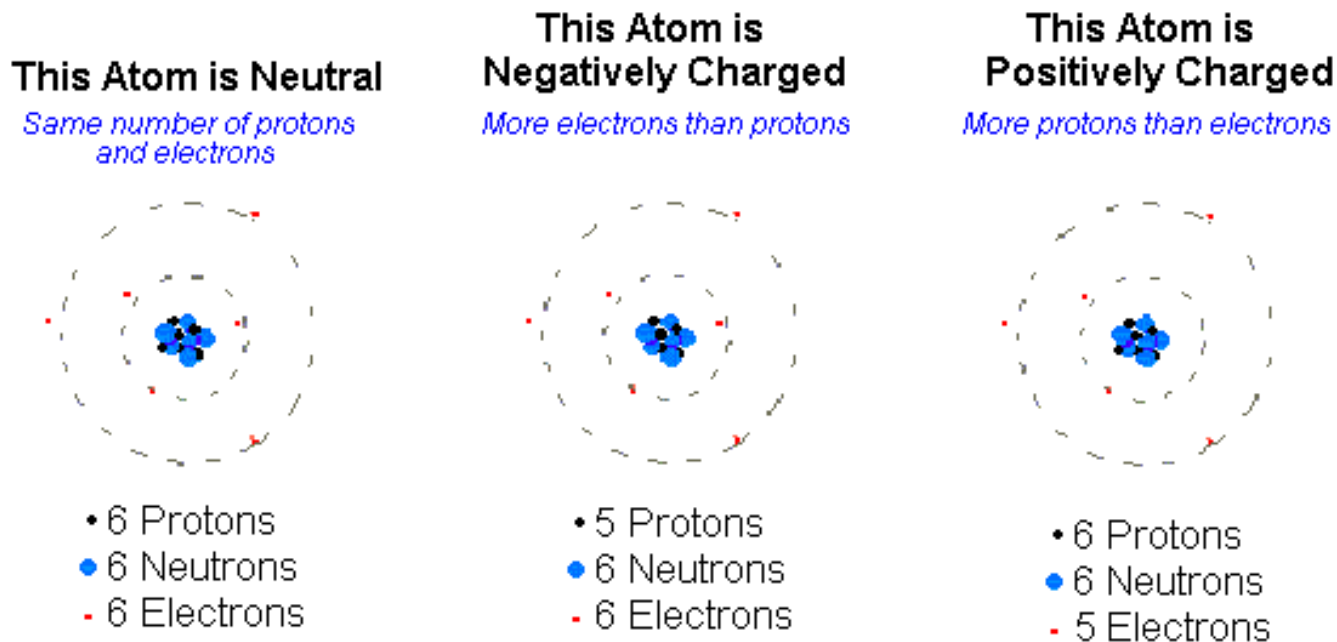
- Atom

- unitate de materie care formează un element chimic
- 100 picometri diametru
- compus din nucleu si unul sau mai multi electroni
- nucleul este format din unul sau mai multi protoni si un numar de neutroni
- neutronii nu au sarcina electrica
- protonii au o sarcina electrica pozitiva
- electronii au o sarcina electrica negativa
- electron de valență - electron din învelișul exterior care poate participa la formarea unei legături chimice



[http://diagramcenter.org/
samplebook/06b-
CarbonAtom.xhtml](http://diagramcenter.org/samplebook/06b-CarbonAtom.xhtml)

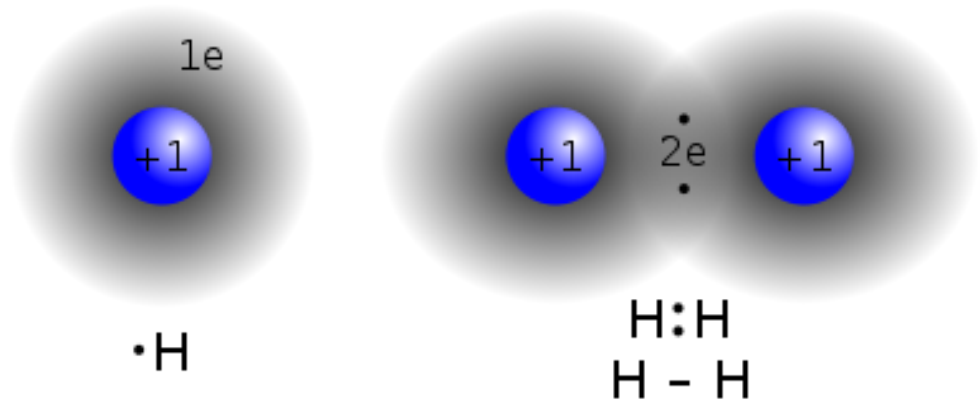
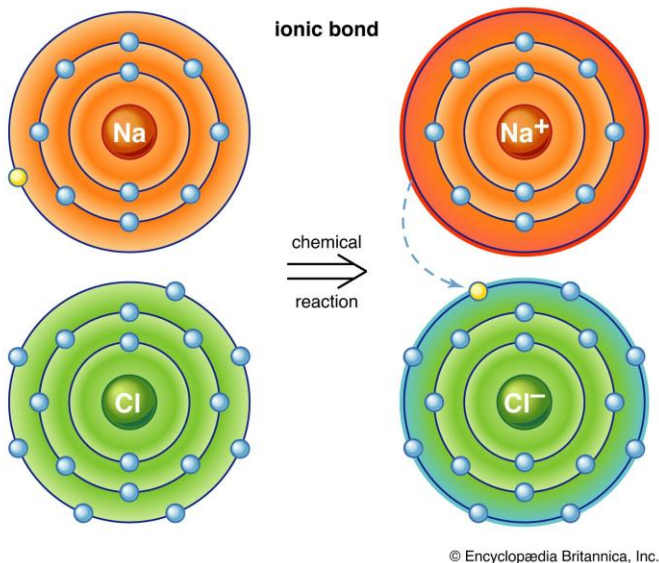
- Atom (continuare)
 - dacă numărul de protoni este egal cu numărul de electroni, atomul este neutru din punct de vedere electric
 - dacă numărul de protoni este diferit de numărul de electroni, atomul are o sarcină generală negativă sau pozitivă și se numește ion



<https://www.qrg.northwestern.edu/projects/vss/docs/propulsion/1-what-is-an-ion.html>

- Legătură chimică

- atracție între atomi, ioni sau molecule care permite formarea de compuși chimici
- legătura ionică - rezultată din forța electrostatică dintre ioni încărcați opus
- legătura covalentă - prin împărțirea electronilor; ambii atomi din legătură contribuie cu un electron de valență pentru a forma o pereche comună



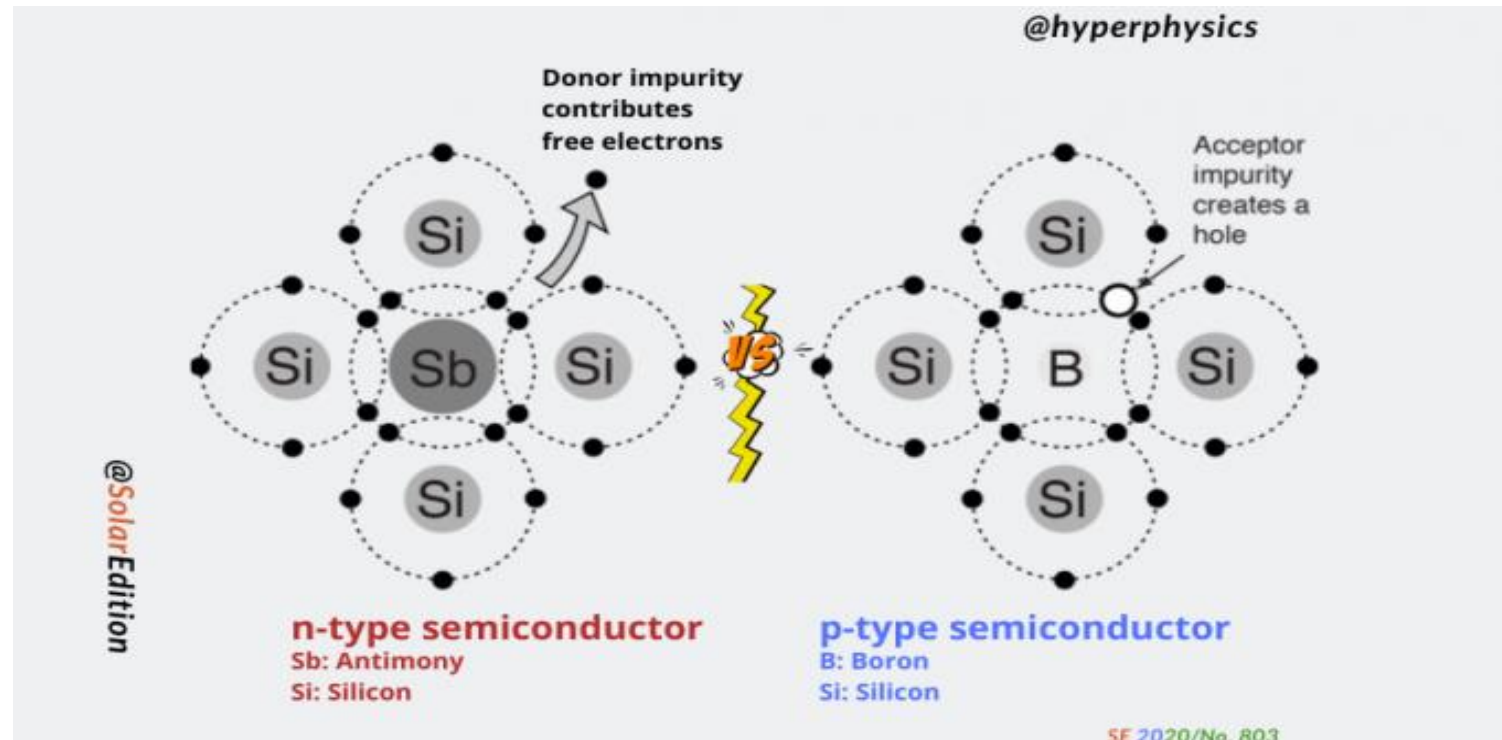
https://en.wikipedia.org/wiki/Covalent_bond

-
- The diagram illustrates the atomic structure of Silicon (Si) and Germanium (Ge). Silicon (Si) is shown with a central nucleus labeled 'Si' and four concentric electron shells. The outermost shell contains 4 electrons. Germanium (Ge) is shown with a central nucleus labeled 'Ge' and five concentric electron shells. The outermost shell contains 4 electrons. Both elements are semiconductors.

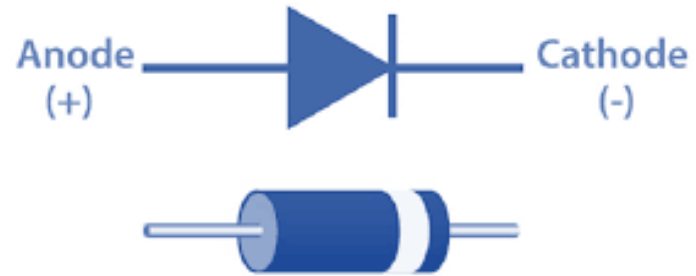
<https://www.physics-and-radio-electronics.com/electronic-devices-and-circuits/semiconductor/intrinsic-semiconductor/atomic-structure-of-silicon-and-germanium.html>

https://en.wikipedia.org/wiki/Periodic_table

- Modificarea comportării materialelor semiconductoare se face prin adăugare de impurități, prin procesul de dopare
- Tipuri de materialele semiconductoare:
 - tip **n**, electronii sunt în exces; impurități precum fosforul, arseniul, elemente care se găsesc pe coloana a V-a
 - tip **p**, purtătorii de sarcină în exces sunt cei pozitivi (goluri); impurități precum borul sau aluminiul, aflate pe coloana a III-a și având trei electroni de valență



Diode



Gunn Diode



LED

PIN Diode



Step Recovery Diode



Laser Diode



Photo Diode



Tunnel Diode



Varactor Diode

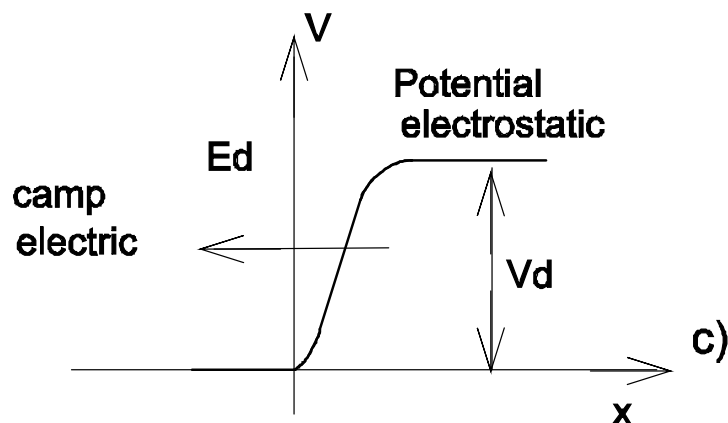
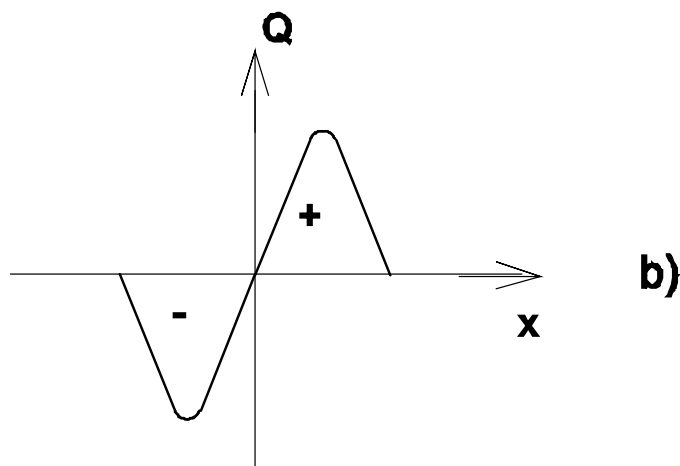
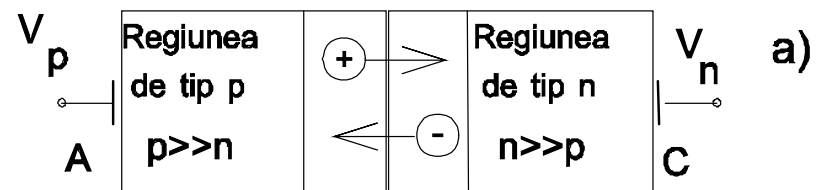


Schottky Diode



Zener Diode

Dioda semiconductoare în regim de comutație

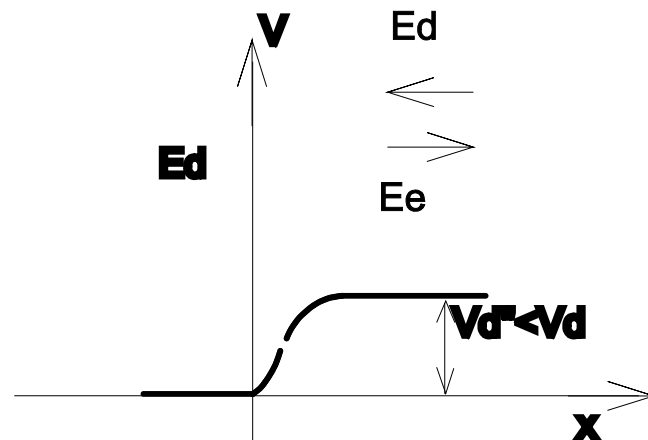
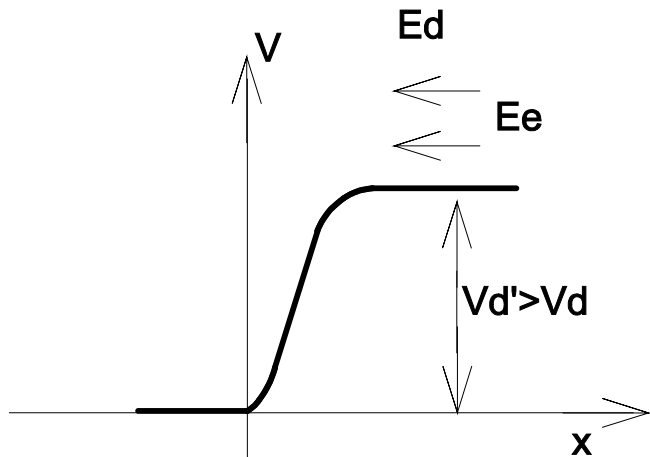
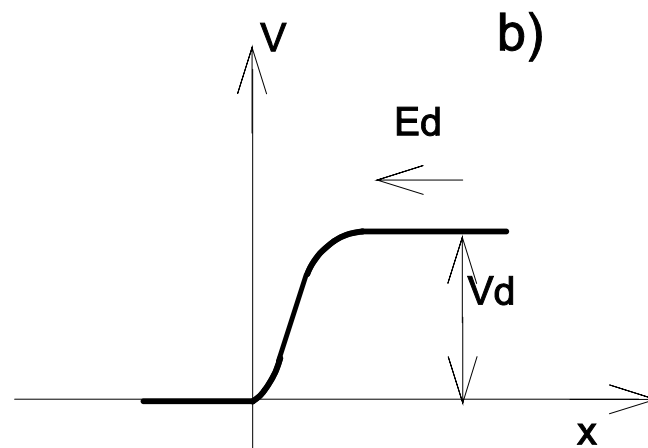
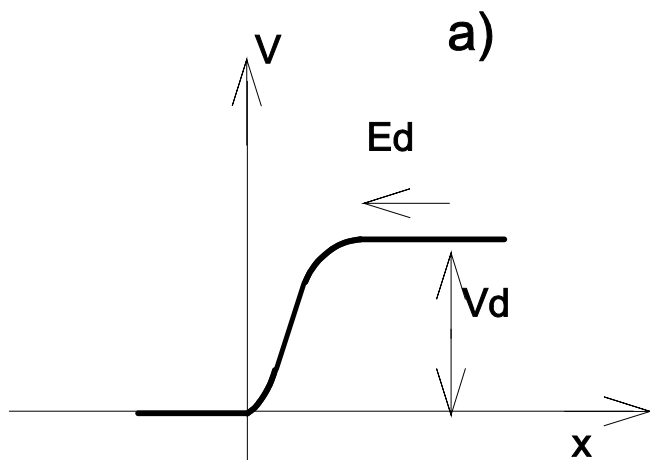


Echilibru termic: nu se va produce niciun curent electric prin semiconductor

Proces de difuzie

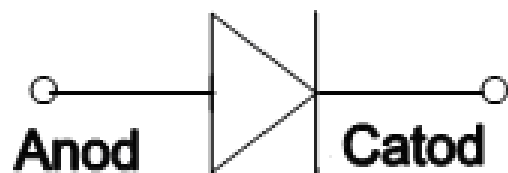
Câmp electric de difuzie (E_d) asociat unei diferențe de potențial, numit potențial de difuzie sau barieră de potențial, lângă planul joncțiunii, care se opune tendinței de difuzie

Difuzia de purtători este un proces cu autolimitare



O tensiune ce mărește înălțimea barierei de potențial este numită **tensiune de polaritate inversă**

O tensiune externă de polaritate opusă se numește **tensiune directă**



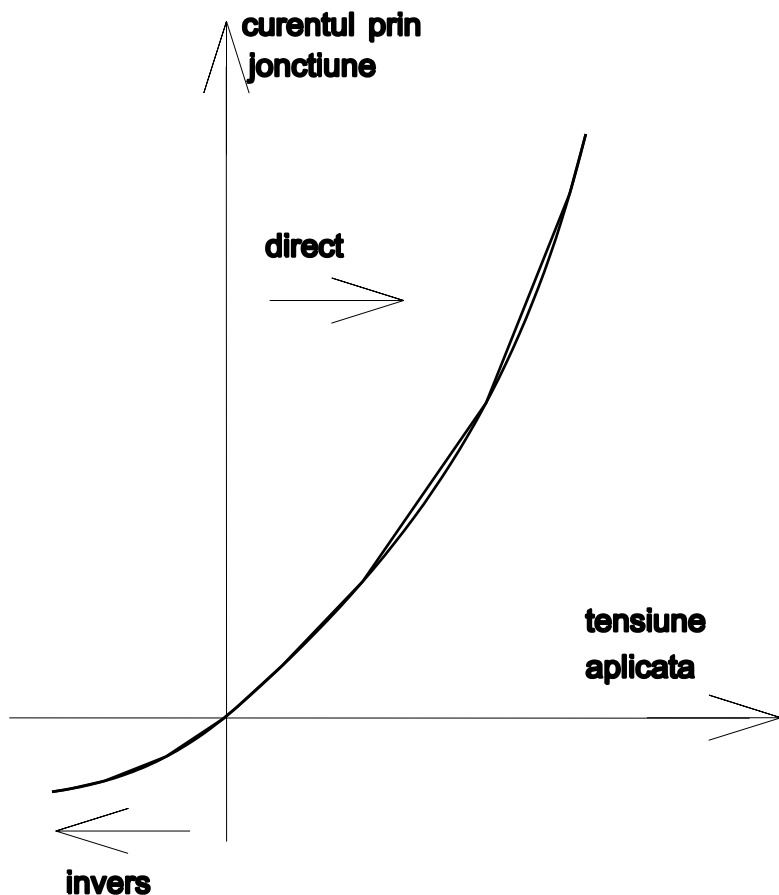
Simbolul diodei

Consideram o tensiune U aplicata la bornele A (anod) și C (catod) ale diodei semiconductoare:

$$U = V_p - V_n$$

$V_p > V_n$ – curent electric este mare și este datorat purtătorilor majoritari; joncțiunea este polarizată direct

$V_p < V_n$ – curent electric este neglijabil și este datorat purtătorilor minoritari; joncțiunea este polarizată invers



Caracteristica curent-tensiune

doua drepte

$i=0, u < U_T$

$i=u/R_d, u > U_T$

U_T tensiunea de prag,

R_d rezistența diferențială,

I_{D0} curentul rezidual

dau aproximarea liniară a
caracteristicii volt-amper a
diodei

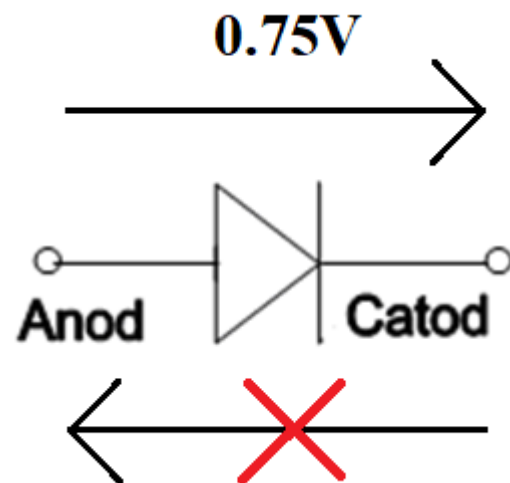
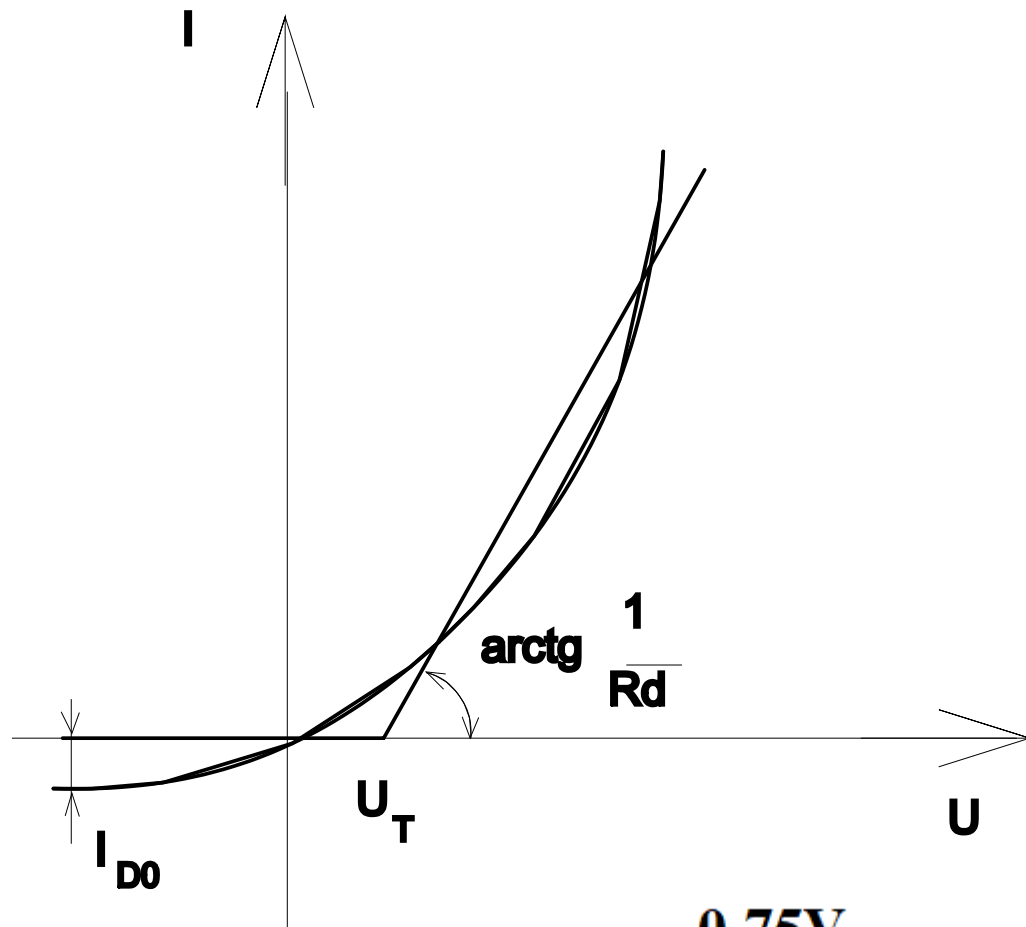
Valori tipice:

$I_{D0} = 0,05A$

$U_T = 0,5V$

$R_d = 15ohm$

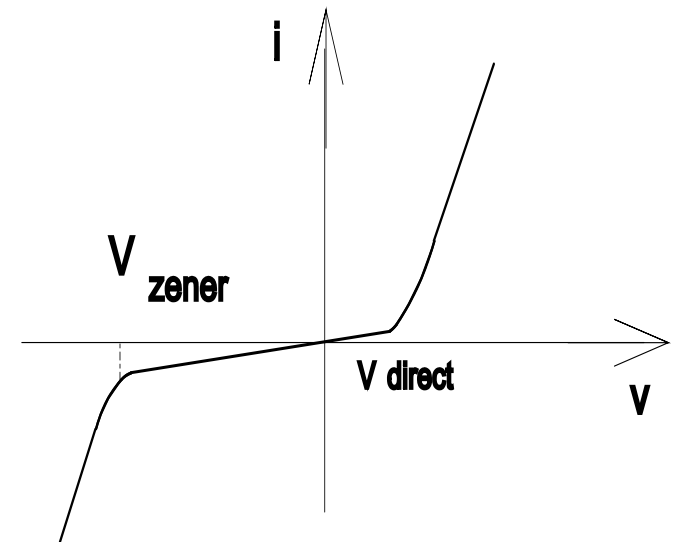
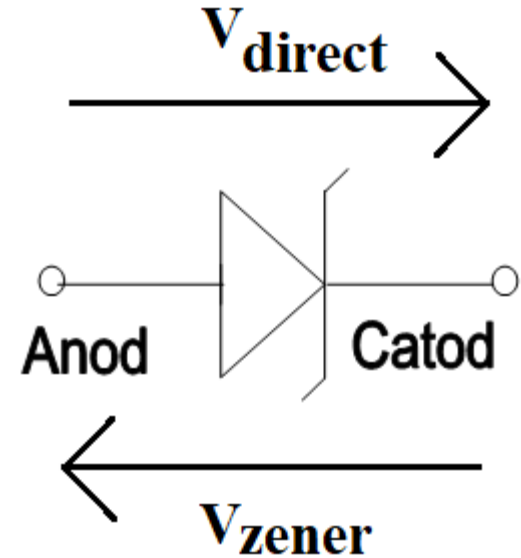
Căderea de tensiune directă pe o diodă
cu siliciu este de $\approx 0,75V$; pentru diodele
cu germaniu este de $\approx 0,3V$.



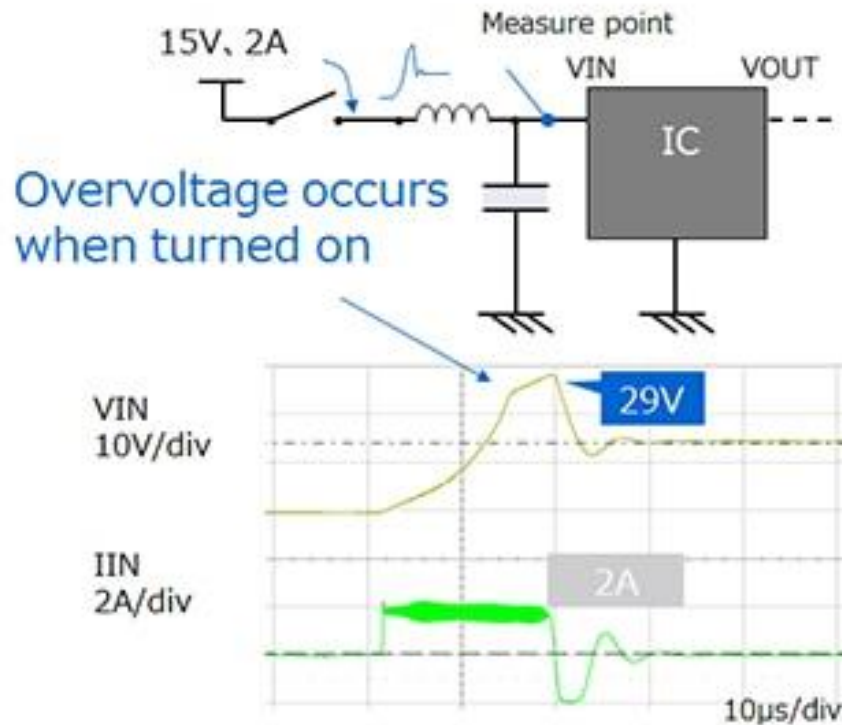
Diode Zener

La aplicarea unei polarizări inverse pe o joncțiune **pn**: dacă câmpul electric posedă energia necesară extragerii electronilor de pe orbitele de rotație, rezultă o creștere bruscă a curentului

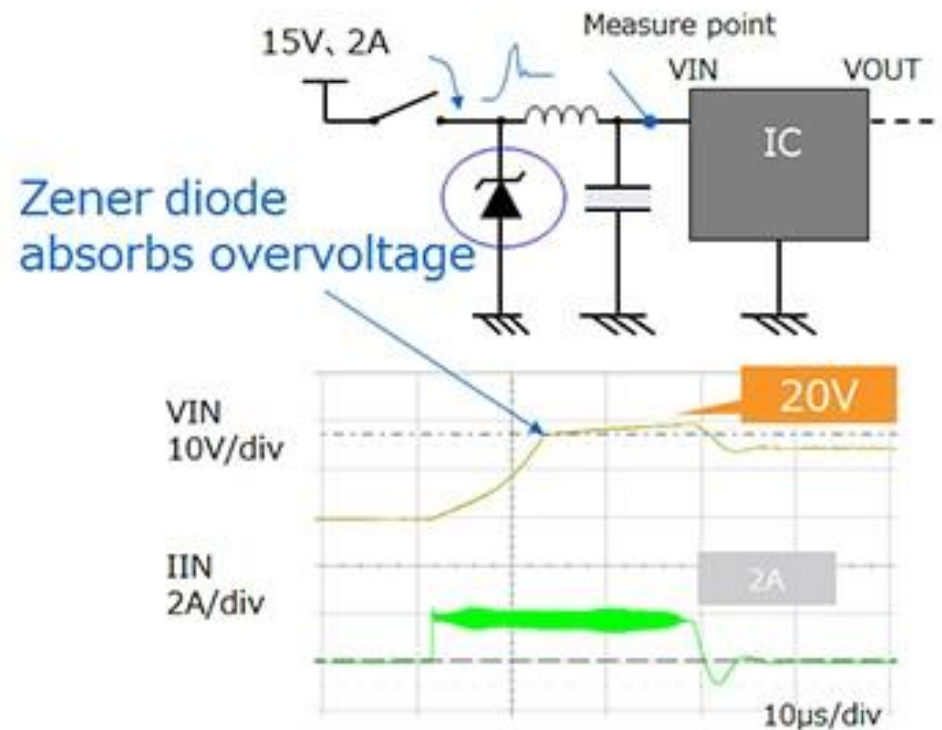
Perechile electron-gol nou create contribuie la generarea unui curent important, și se spune că dioda lucrează în regiunea Zener
Valoarea tensiunii de prag Zener depinde de gradul de dopare și poate avea valori de la 2V la sute de volți



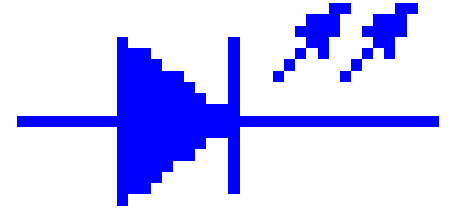
Without Zener Diode



With Zener Diode

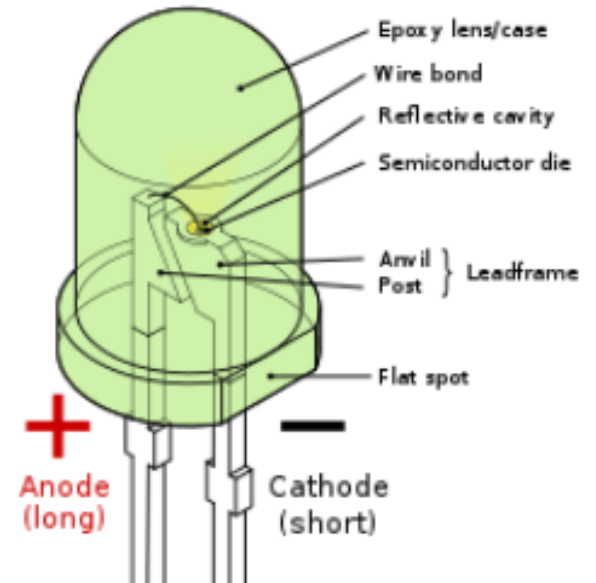
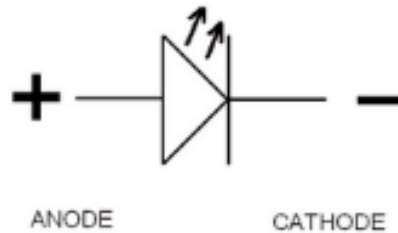
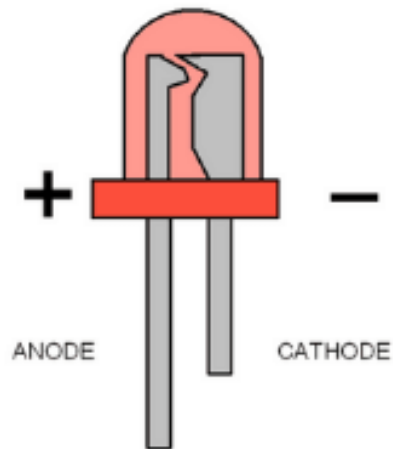


Diode luminiscente



- LED Light Emitting Diode
- La polarizarea directă electronii din regiunea n se recombina cu golurile din regiunea p eliberând energie sub forma căldurii și a luminii
- Prin adăugarea de impurități în procesul de dopare se poate determina lungimea de undă a luminii emise determinând în acest fel culoarea LED-ului
 - GaAsP – roșu/galben
 - GaP – roșu/verde
- Tensiunea directă este mai mare decât cea corespunzătoare diodelor cu siliciu (1,2V - 3,2V)
- Curentul direct trebuie să aibă o valoare relativ mare ($\geq 10\text{mA}$)

What is a LED?



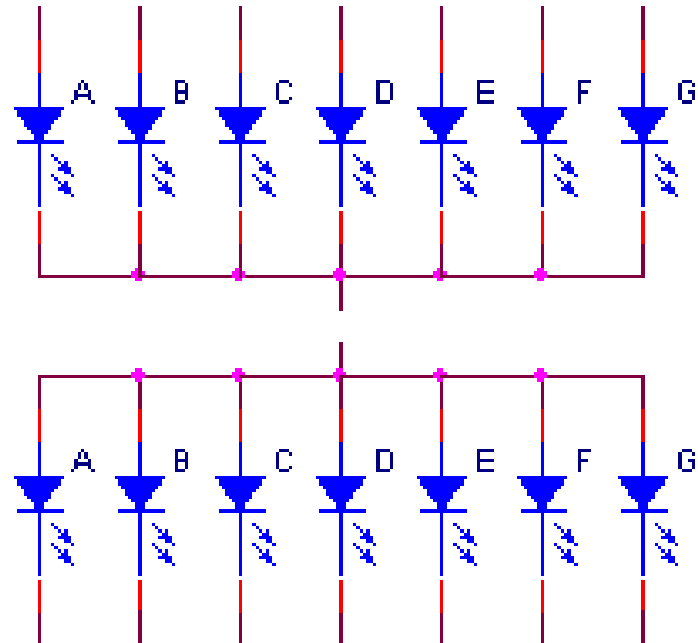
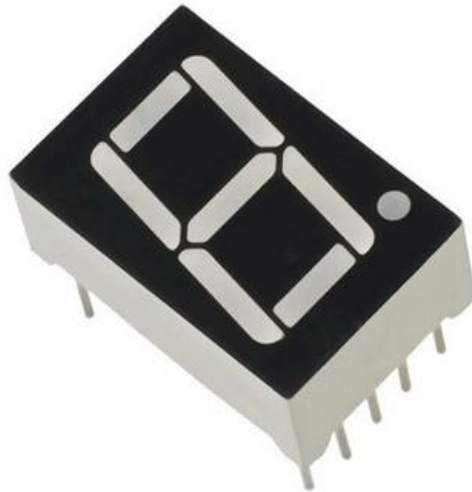
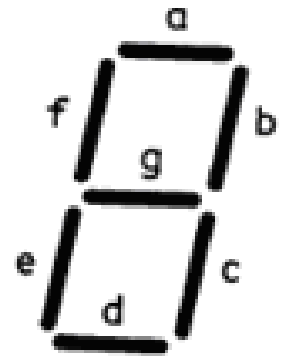
Electrical 4 U

THD LED Diode

SMD Power LED Diode



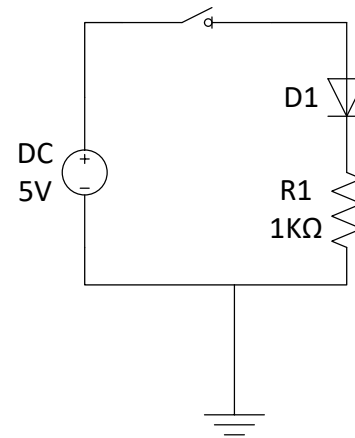
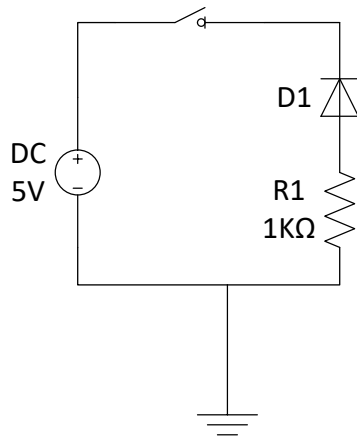
- Display cu LED-uri 7-segmente: 7 LED-uri aranjate astfel încât să poată fi afișate numerele zecimale
- două tipuri:
 - catod comun - comanda se face în anodul LED-urilor folosindu-se un semnal activ “1”
 - anod comun - comanda se face în catodul LED-urilor folosindu-se un semnal activ “0”



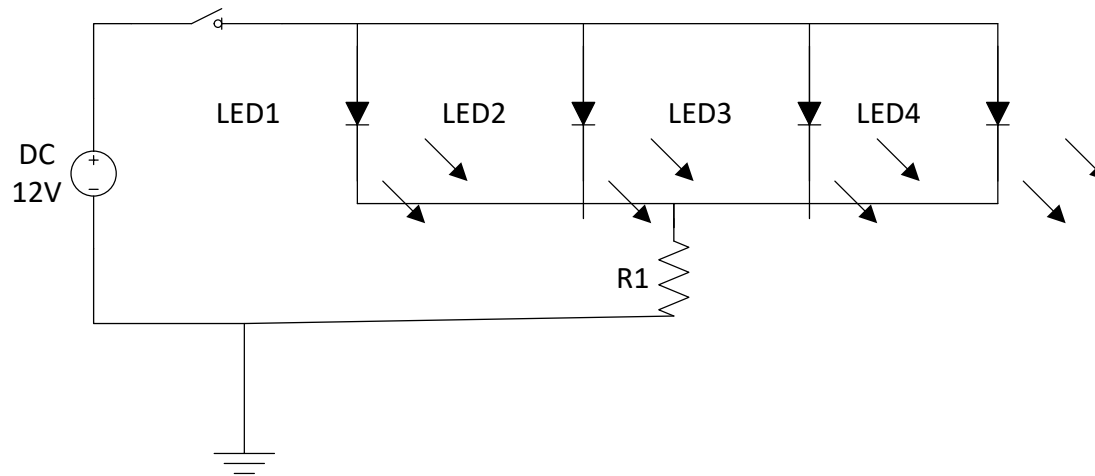
<https://ardushop.ro/ro/electronica/190-display-led-7-segmente.html>

Probleme

- Pentru schemele din figura sa se calculeze valoarea curentului prin dioda.

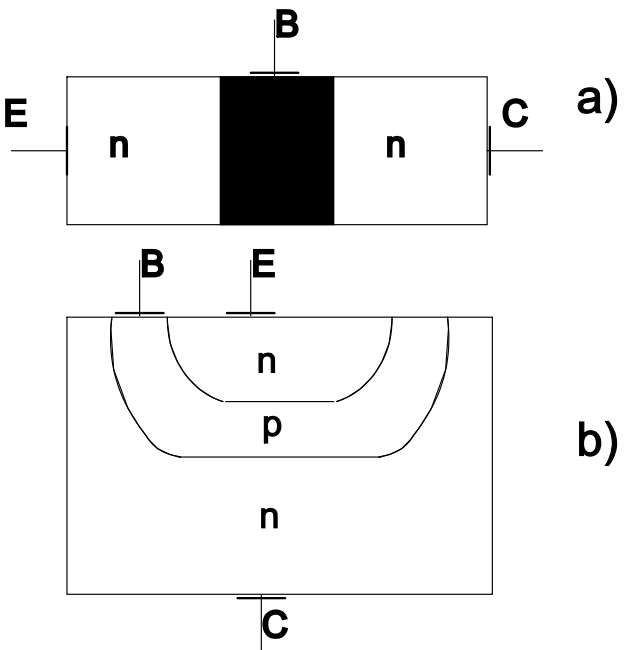


- Pentru schema din figura sa se calculeze valoarea rezistentei astfel incat prin fiecare LED intensitatea curentului sa fie 10 mA. Tensiunea directa corespunzătoare LED-urilor este de 1,6V.

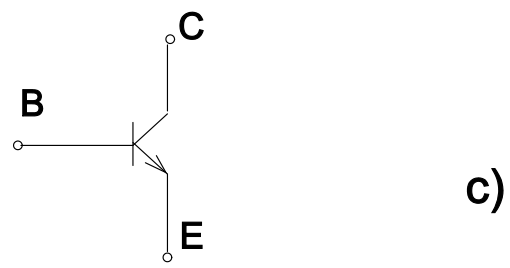


Tranzistorul bipolar în regim de comutație

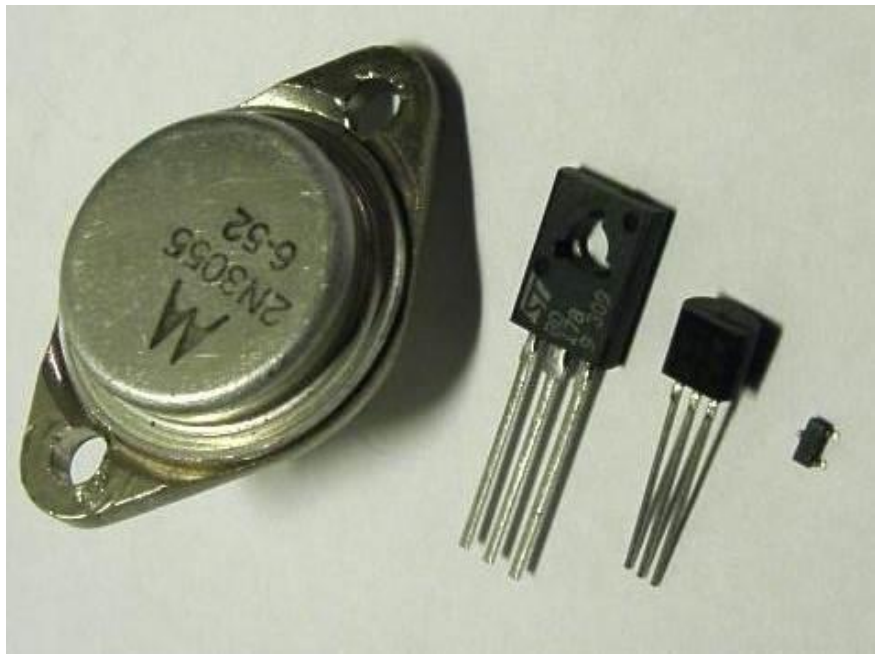
Regimurile de funcționare ale tranzistorului bipolar



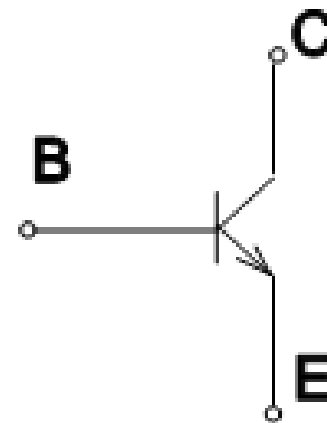
	Joncțiunea emitor-bază, polarizată direct	Joncțiunea emitor-bază, polarizată invers
Joncțiunea colector-bază, polarizată direct	Regiunea de saturație	Regiunea activă inversă
Joncțiunea colector-bază, polarizată invers	Regiunea activă normală	Regiunea de blocare



Structura unui tranzistor bipolar

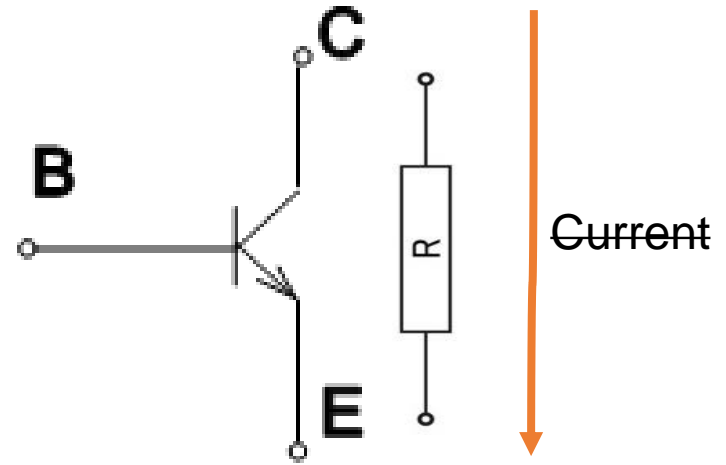


	EB direct	EB invers
CB direct	Regiunea de saturație $V_{BE} > V_{CE}$ $I_E = I_C + I_B$ $I_C < \beta \cdot I_B$ $V_{BE} \approx 0,75V$ $V_{CEs} \approx 0,2V$	Regiunea activă inversă Se echivalează cu o funcționare în RAN Utilizare mai rară deoarece amplificarea în curent are valori foarte mici ($\alpha_i \approx 0,1$)
CB invers	Regiunea activă normală $I_E = I_C + I_B$ $I_C = \alpha \cdot I_E$ $I_C = I_B \cdot (\alpha / (1 - \alpha)) = \beta \cdot I_B$ β este câștigul sau amplificarea în curent (valori 10-1000) $V_{BE} \approx 0,75V$	Regiunea de blocare $V_{BE} \leq 0$ $V_{CE} - V_{BE} > 0$



A. Daca TB este blocat ($V_{BE} < 0,6V$)

$\Rightarrow R_{CE}$ are o valoare foarte mare si V_{CE} poate avea diferite valori, in functie de alte componente din circuit; intre C si E nu va trece curentul



B. Daca TB este deschis

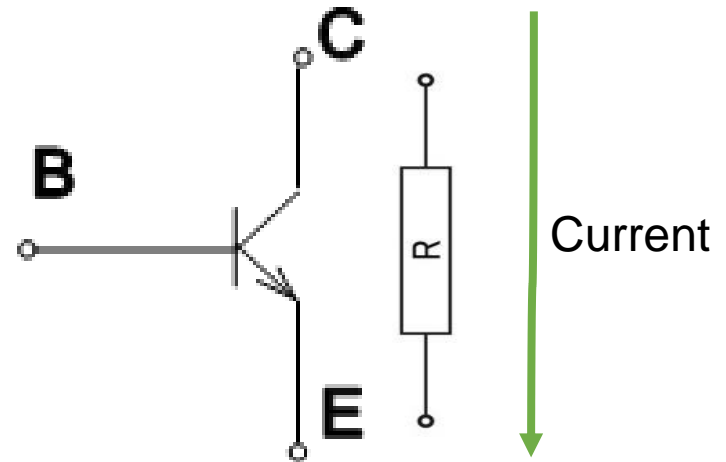
B1. $V_{BE} = 0,6V$

\Rightarrow valoarea R_{CE} scade si curentul va trece intre C si E; $I_C = \beta \cdot I_B$; V_{CE} poate avea diferite valori

B2. V_{BE} creste intre 0,6V si 0,75V (V_{BE} va fi limitat la 0,75V)

\Rightarrow valoarea R_{CE} scadea \Rightarrow curentul intre C si E creste; V_{CE} va scadea; $I_C = \beta \cdot I_B$;

\Rightarrow cand TB este complet deschis (la saturatie) V_{CE} va scadea la valoarea sa minima: $V_{CEs} \approx 0,2V$ si $I_C < \beta \cdot I_B$

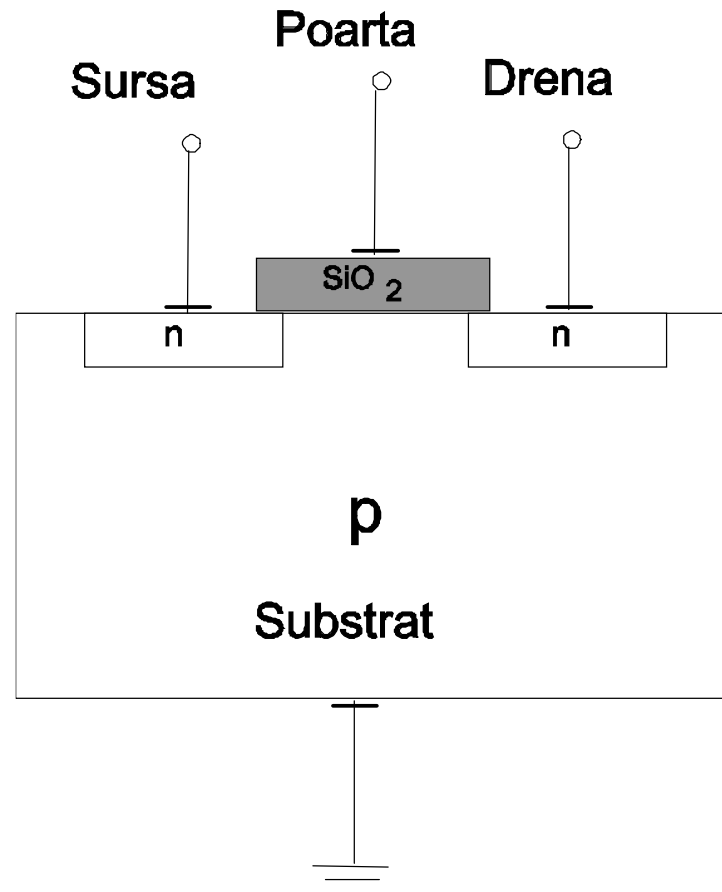


Tranzistorul cu efect de câmp

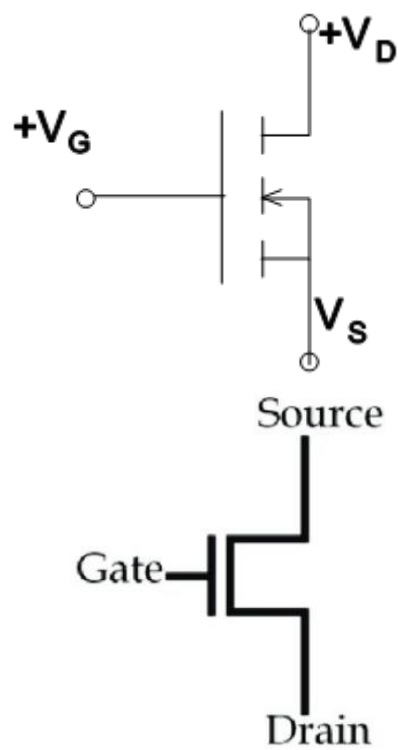
Secțiune transversală a unui tranzistor MOS cu canal indus **n**, numit și NMOS

Componente:

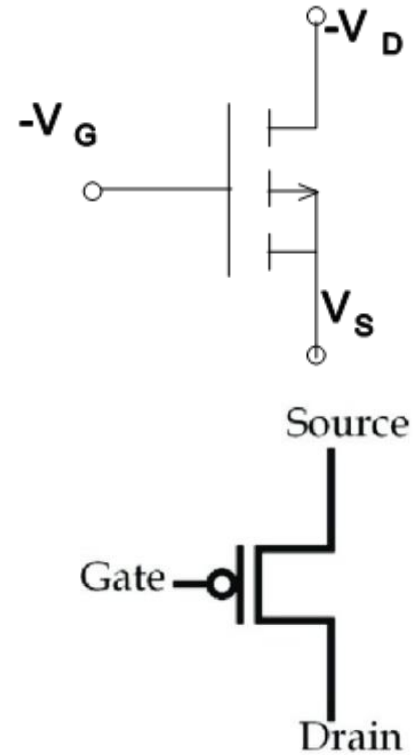
- substrat
- sursa
- drena
- grila (poarta)



Simbolurile tranzistoarelor MOS



NMOS

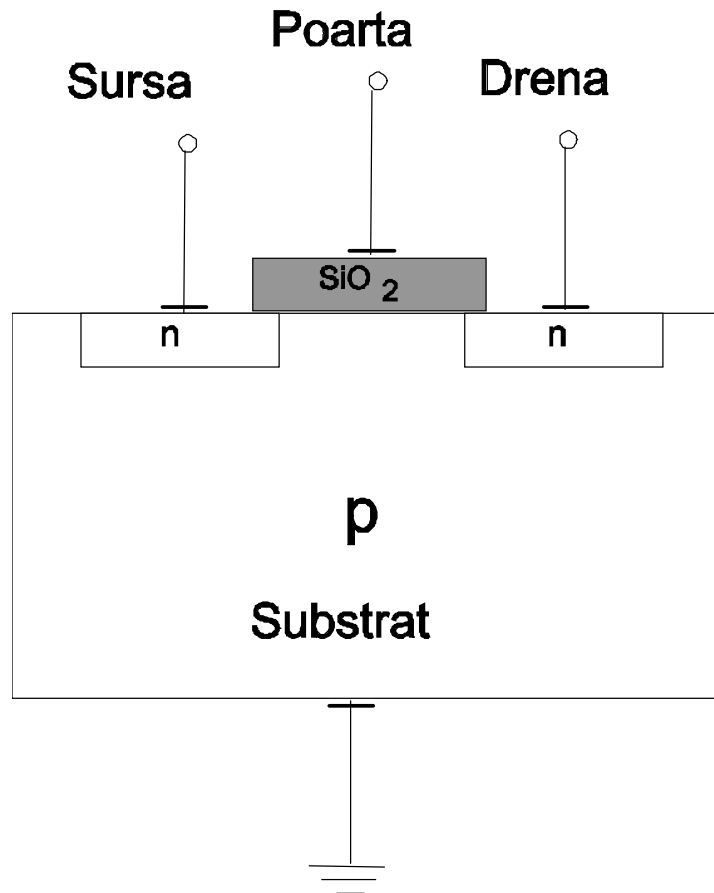


PMOS

Funcționarea tranzistorului MOS

Între sursă și drenă, prin intermediul substratului de bază, se pot pune în evidență două joncțiuni **pn**

Dacă între drenă și sursă se aplică o tensiune pozitivă, una din joncțiuni este polarizată invers; nu există curent între drenă și sursă; tranzistorul este blocat



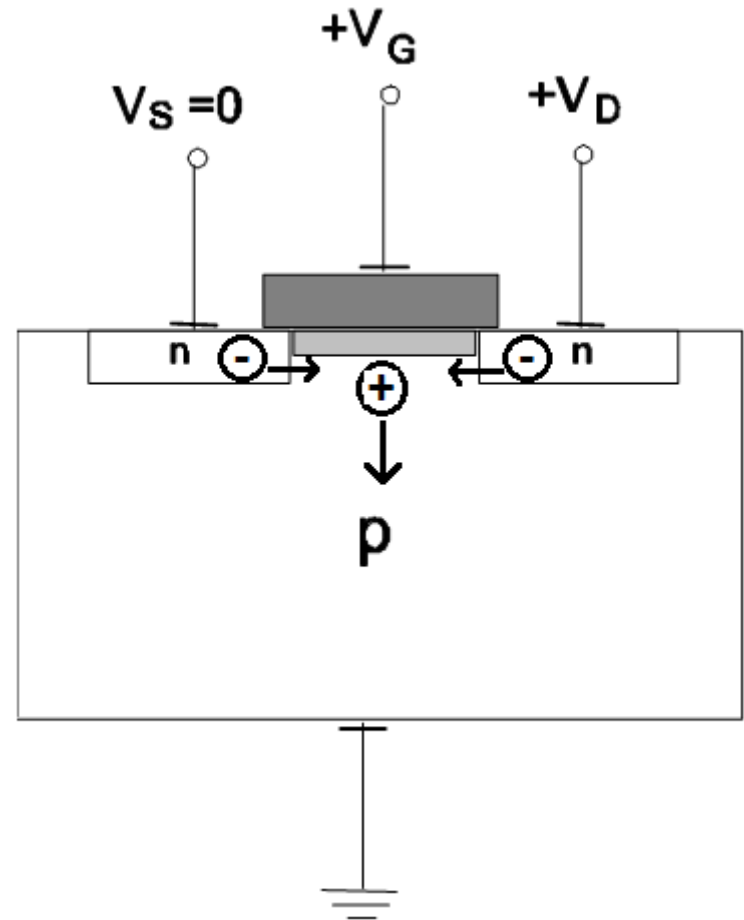
Dacă la poarta (grilă) se aplică un potențial pozitiv față de regiunile sursei și drenei, sarcinile electrice de tip **p** din substratul de bază vor fi respinse, iar electronii din regiunile drenei și sursei vor fi atrași către suprafața substratului de siliciu aflat sub poartă

Între drenă și sursă se formează un canal, a cărui adâncime crește odată cu tensiunea aplicată în poartă

Pentru o valoare a tensiunii grilă-sursă, numită **tensiune de prag** și notată V_T , concentrația de electroni din zona canalului va depăși concentrația de goluri și atunci această regiune își va inversa tipul, devenind regiune de tip **n**

Astfel s-a format un canal de tip **n** care unește regiunile de tip **n** ale drenei și sursei

Conductibilitatea între drenă și sursă crește, crescând curentul de drenă I_{DS}



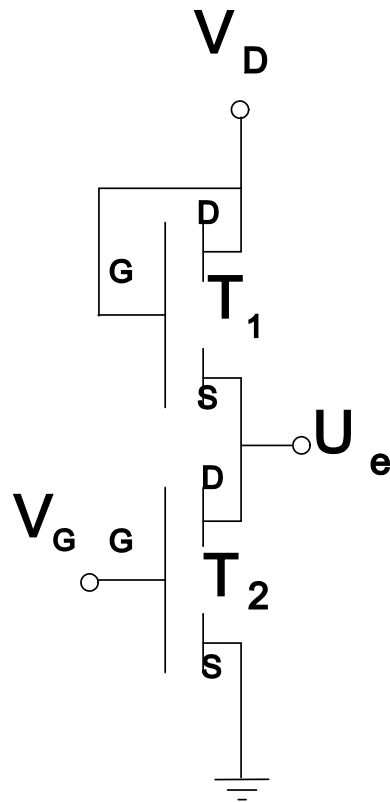
Avantaje ale folosirii tranzistoarelor MOS:

fabricate mai usor decat tranzistoarele bipolare

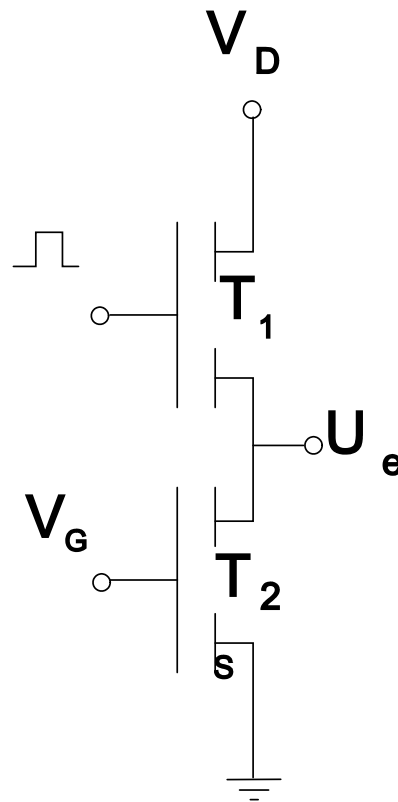
densitate de integrare mai mare

impedanta de intrare mare (10^{14} - $10^{16}\Omega$), curent de comanda mic

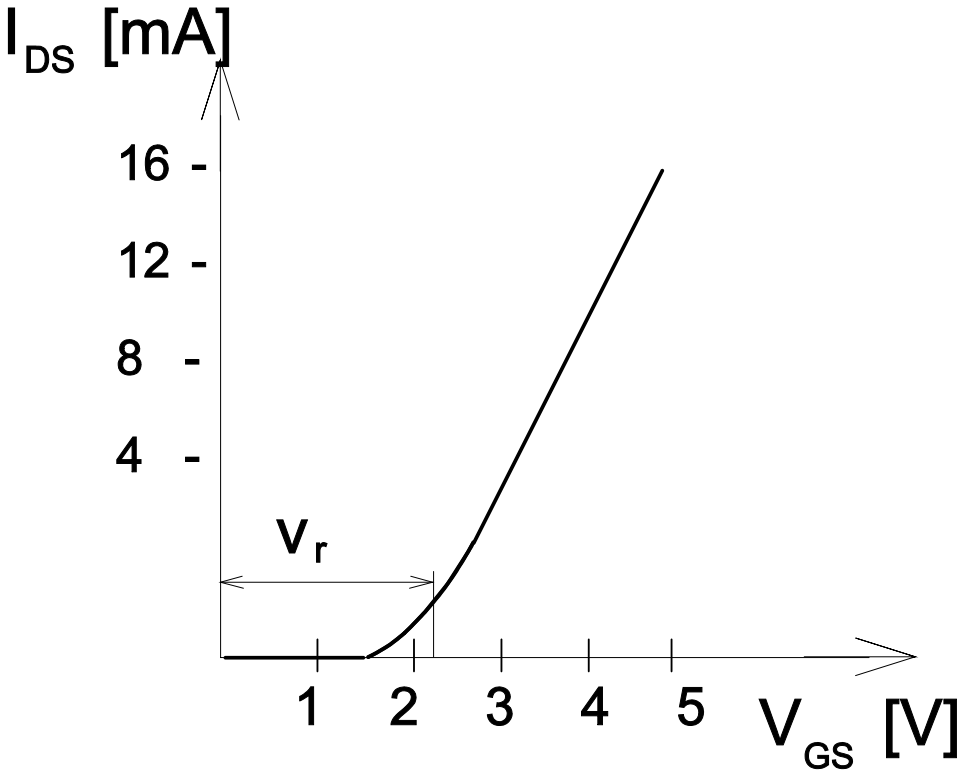
folosirea in structura MOS a unei rezistente active



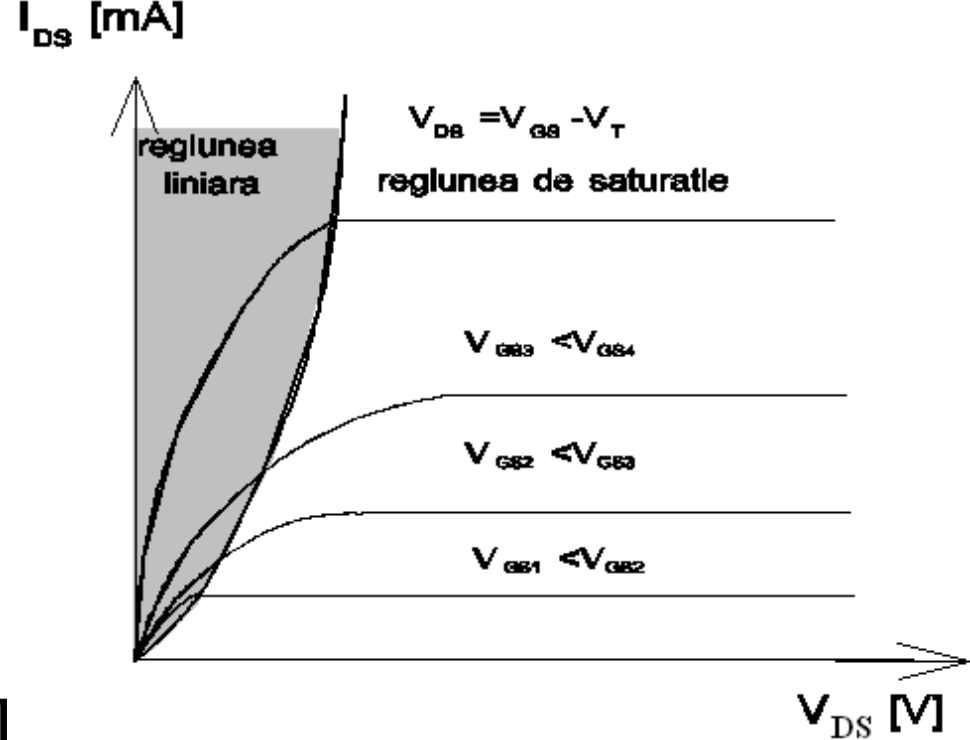
a)



b)



Caracteristica de intrare



Caracteristica de iesire

Din caracteristica de iesire, pot fi deduse si analizate trei regiuni:

Regiunea de blocare: curentul de iesire, curentul drena-sursa I_{DS} este aproximativ nul si tensiunea de intrare, V_{GS} , este mai mica decat tensiunea de prag: $V_{GS} < V_T$

Regiunea liniara (de trioda): regiunea situata la stanga caracteristicii de curent, cand $V_{DS} = V_{GS} - V_T$; curentul de drena I_{DS} creste rapid ca o functie de potential drena-sursa V_{DS}

$$I_{DS} = K((V_{GS} - V_T)V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2})$$

Deasemenea: $0 \leq V_{DS} \leq V_{GS} - V_T$

Regiunea de saturare: regiunea situata la dreapta caracteristicii de curent, cand $V_{GS} - V_T = V_{DS}$

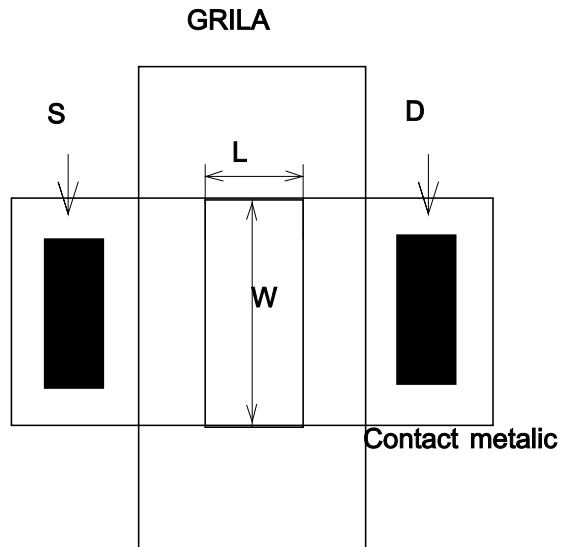
Urmatoarele relatii definesc aceasta stare:

$$0 \leq V_{GS} - V_T \leq V_{DS}$$

$$I_{DS} = \frac{K}{2} (V_{GS} - V_T)^2$$

K, factorul de conducție $\approx \beta \cdot (W/L)$, unde:

- β este factorul de conducție intrinsec; are valoarea aproximativă de $10 \mu A/V^2$
- W este lățimea canalului; poate fi în gama $10-200 \mu m$
- L este lungimea canalului, are valori în gama $1-10 \mu m$



Probleme

1. Sa se proiecteze un circuit inversor realizat cu tranzistor bipolar și componente pasive
 - Etape:
 - proiectarea în regim static, studiind realizarea funcțiilor propuse
 - proiectarea în regim static, cu analiza cazului cel mai defavorabil de funcționare
 - analiza funcționării circuitului în regim dinamic, cu estimarea parametrilor dinamici

Proiectarea în regim static

- Dacă $U_i = 0V = '0'$, la ieșire trebuie să se obțină $U_e \approx E_C = '1'$, sau tranzistorul T să fie blocat
- Dacă $U_i \approx E_C = '1'$, la ieșire trebuie să se obțină $U_e \approx 0V = '0'$, fapt care impune ca tranzistorul T să fie saturat

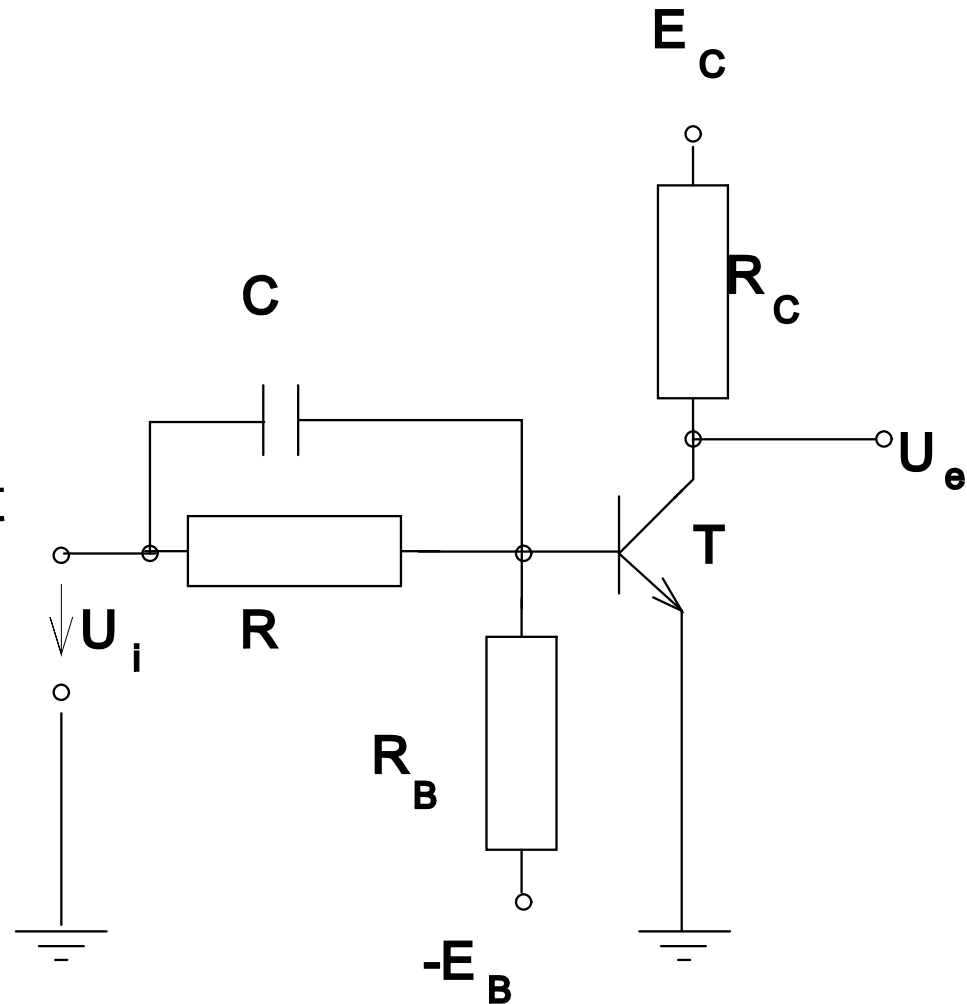
- Starea de blocare:

- $U_{BEb} \leq 0V$ și $I_B = I_{C0}$

- $I_R + I_{C0} = I_{RB}$

$$-\frac{U_{BEb}}{R} + I_{C0} = \frac{U_{BEb} + E_B}{R_B}$$

- deoarece $U_{BEb} \leq 0V$ $R_B \leq \frac{E_B}{I_{C0}}$



- Starea de blocare:

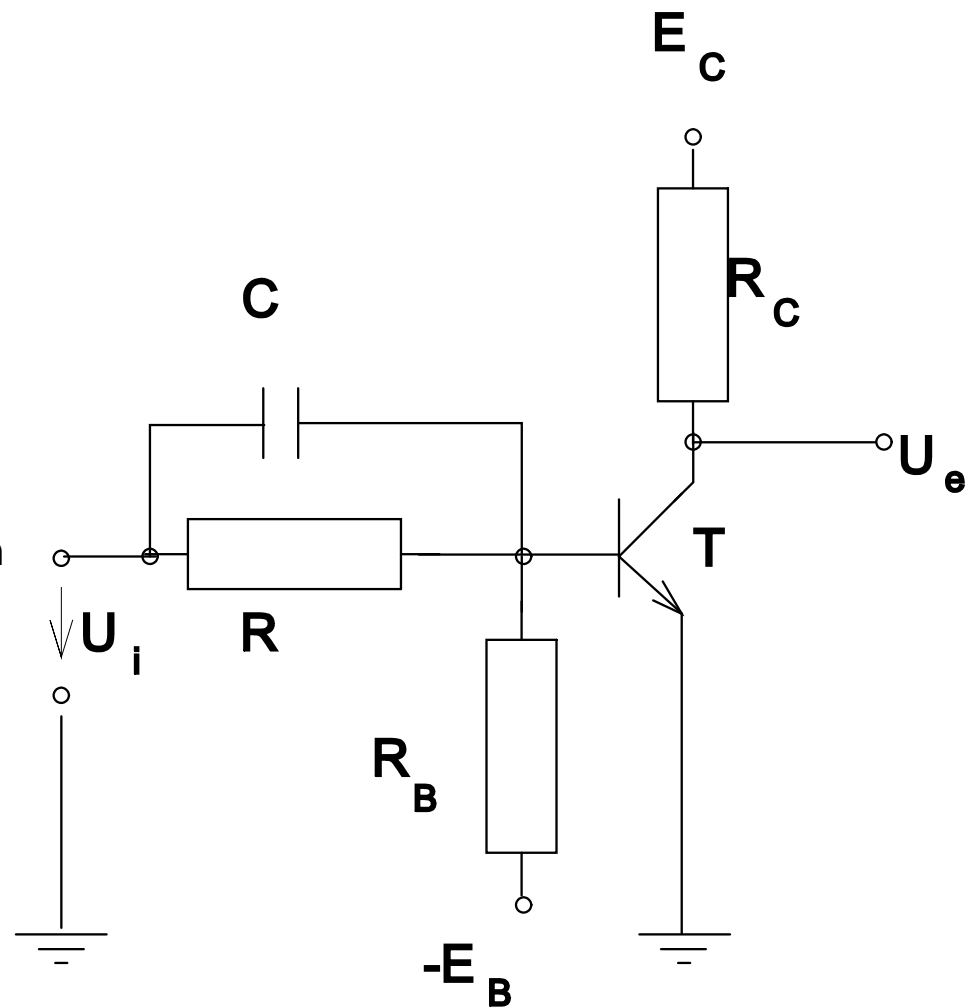
- $I_R - I_{RB} = I_B$
- $I_B \geq I_{Bs} = I_C / \beta_{N0}$

$$R \leq \frac{E_C - U_{BEs}}{\frac{E_C}{\beta_{N0} R_C} + \frac{U_{BEs} + E_B}{R_B}}$$

- Relațiile obținute pentru R și R_B trebuie să îndeplinească și pentru $I_{C0} = I_{C0max}$ și $\beta_{N0} = \beta_{N0min}$
- Rezistența R_C se calculează cu formula:

$$R_C = \frac{E_C - U_{CEs}}{I_{Cso}}$$

- I_{Cso} - curentul de colector de saturație 'optim', pentru care β are valoarea maximă



Studierea cazului cel mai defavorabil

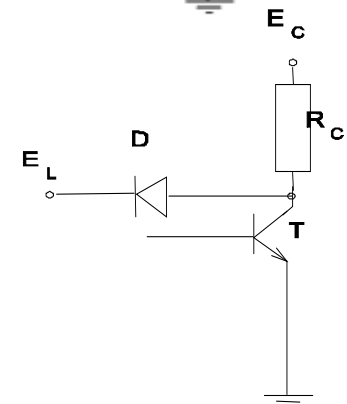
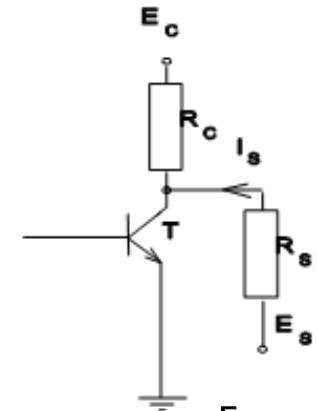
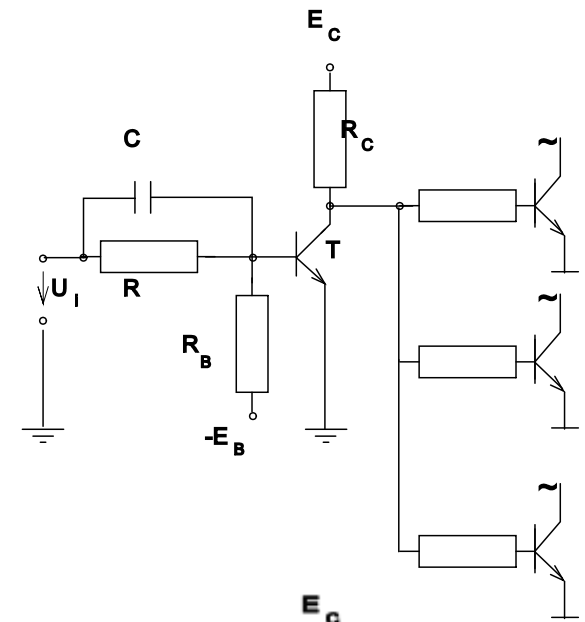
- Se impune datorită multiplelor posibilități de modificare a valorilor ce caracterizează elementele unui circuit
- Elementele circuitului nu au valorile calculate, ideale, iar o însumare nefericită a anumitor abateri poate duce la schimbarea regimului de funcționare a circuitului
- Obiective:
 - analiza influenței pe care o are modificarea valorilor elementelor din schemă asupra condițiilor de funcționare
 - determinarea combinației cele mai defavorabile pentru un anumit caz
- Pentru R_B , în cazul blocării tranzistorului:
 - tranzistorul funcționează la temperatura maxim admisă, ceea ce face ca valoarea I_{CB} la blocare să fie maximă, I_{CBmax}
 - E_B este la valoarea minimă (90% din normal)
 - toleranța R_B este la limita superioară din câmpul de toleranțe

- Pentru R în cazul saturării tranzistorului:

- I_C are valoare maximă, dat de o valoare maxim admisă pentru E_C și o valoare minimă pentru R_C (în câmpul de toleranțe admis)
- factorii β iau valori extreme β_{N0min}
- alimentarea bazei se face de la E_{Bmin}

- **Studiul influenței sarcinii asupra comportării circuitului**

- Portile comandate de către inversor sunt echivalate prin R_s conectat la E_s
- Când T este blocat, U_{CEb} depinde de R_s
- U_{CEb} intervine în calculul rezistenței R
- Influența sarcinii trebuie să fie estompată
- Conectarea unei diode D, având catodul conectat la o tensiune de limitare E_L
- $V_{Cb} \approx E_L + V_D$



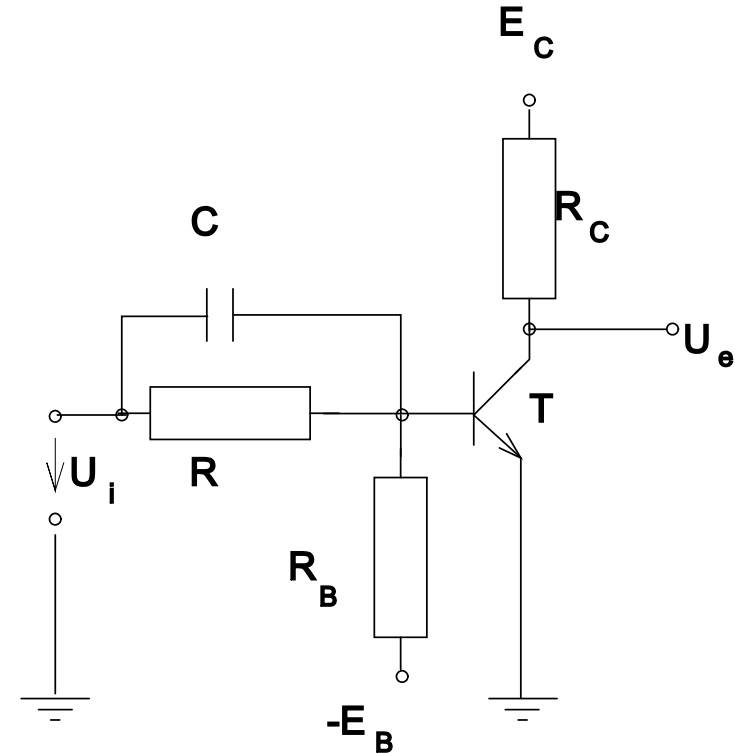
Comportarea în regim dinamic

- Trebuie să ai în vedere parametri dinamici de funcționare ai tranzistorului, respectiv timpii de comutare reprezentați funcție de curenții de bază:

- pentru deblocare $t_r = f(I_{Bd})$
- pentru blocare: $t_c = f(I_{Bi})$ și $t_s = f(I_{Bi})$

$$R_B \leq \frac{E_B}{I_{C0}} = \frac{E_B}{I_{Bi}}$$

$$R \leq \frac{E_C - U_{BEs}}{\frac{E_C}{\beta R_C} + \frac{U_{BEs} + E_B}{R_B}} \approx \frac{E_C}{I_{Bd} + I_{Bi}}$$



- Tensiunea la intrarea inversorului variază de la 0V la E_C
- Deblocarea tranzistorului se face în δt egal cu t_r
- Blocarea tranzistorului se face în δt egal cu $t_c + t_s$

- Cazul deblocării:

$$\frac{du_c}{dt} \approx \frac{E_C}{\delta t}$$

$$I_c = C_1 \frac{du_c}{dt} = C_1 \frac{E_C}{t_{db}}$$

$$I_C = I_{Bd0} - I_{Bd}$$

- I_{Bd0} curentul de bază direct de supra-acționare la deblocare

$$I_{Bd0} = \frac{N_d I_{Cs}}{B_{N0}}$$

- N_d factorul de supra-acționare la deblocare
- I_{Bd} curentul de bază direct la frontiera dintre regimul activ normal și cel de saturație

$$C_1 = \frac{(I_{Bd0} - I_{Bd}) t_r}{E_C}$$

- Cazul blocării:

$$C_2 = \frac{(I_{Bi0} - I_{Bi})(t_f + t_s)}{E_C}$$

$$C = \max(C_1, C_2)$$

2. Pentru schema din figura sa se determine I_C si V_{CE} , stiind ca $\beta=200$, $V_1=+12V$ si $V_2=5V$.

Ce se intampla daca $V_2=0V$?

Ce se intampla daca $V_2=12V$?

$$V_2 = I_B R_B + V_{BE} + (\beta + 1) R_E I_B$$

$$I_B \approx 0,02mA$$

$$I_C = \beta I_B = 4mA$$

$$V_E = I_E R_E = 4V$$

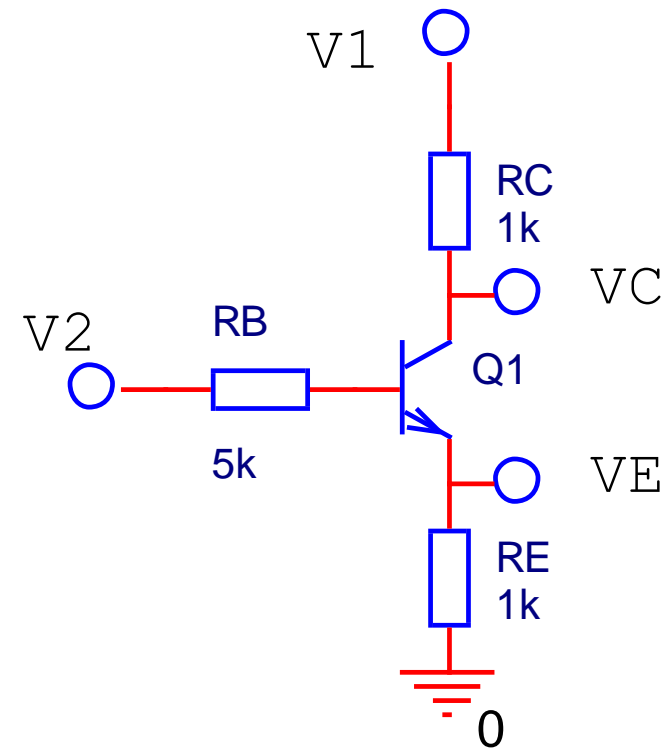
$$V_C = V_1 - R_C I_C = 8V$$

$$V_{CE} = V_C - V_E = 4V$$

• Daca $V_2=0V$ tranzistorul este blocat

$$I_C \approx I_E \approx 0V$$

$$V_E = 0V, V_C = 12V, V_{CE} = 12V$$



- Dacă $V_2=12V$ trebuie sa determinam daca tranzistorul se afla in regiunea activa normala sau in saturatie
- Presupunem ca tranzistorul se afla in regiunea activa normala

$$V_2 = I_B R_B + V_{BE} + (\beta + 1) I_B R_E$$

$$I_B = 0.05mA$$

$$I_C = \beta I_B = 10mA$$

$$V_C = V_1 - I_C R_C = 2V$$

$$V_E = I_E R_E = 10V$$

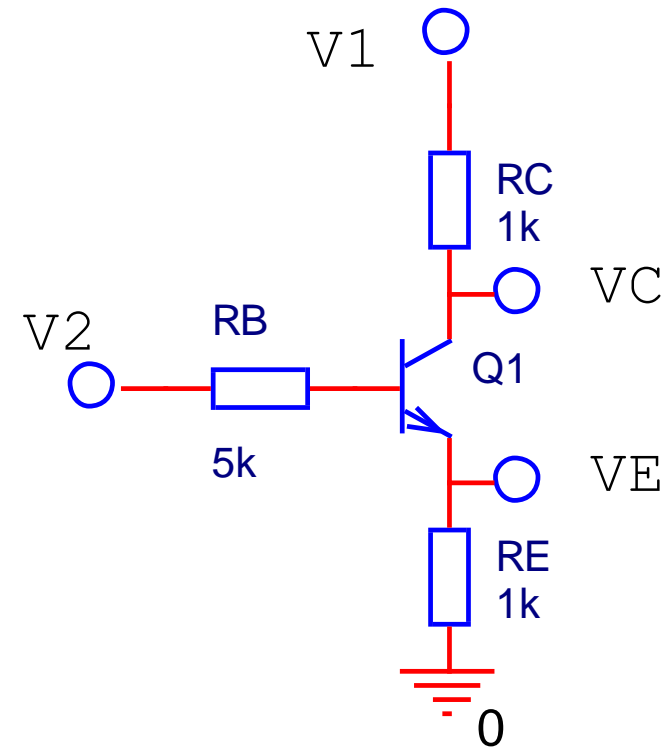
- Prin urmare tranzistorul este saturat

$$\begin{cases} V_1 = R_C I_{Csat} + V_{CEsat} + R_E (I_{Csat} + I_{Bsat}) \\ V_2 = R_B I_{Bsat} + V_{BEsat} + R_E (I_{Csat} + I_{Bsat}) \end{cases}$$

$$I_{Csat} = 5,3mA$$

$$I_{Bsat} = 1mA$$

$$V_{CEsat} = 0,2V$$



3. Pentru schema din figura sa se determine I_D si V_{DS} , stiind ca $V_T=4V$ si $K=400\mu A/V^2$.

$$V_G = \frac{R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} V_{DD} = 10V$$

$$V_S = R_S I_D = R_S \frac{K}{2} (V_{GS} - V_T)^2$$

$$V_{GS} = V_G - V_S = V_G - R_S \frac{K}{2} (V_{GS} - V_T)^2$$

$$(V_{GS} - 4)^2 + (V_{GS} - 4) - 6 = 0$$

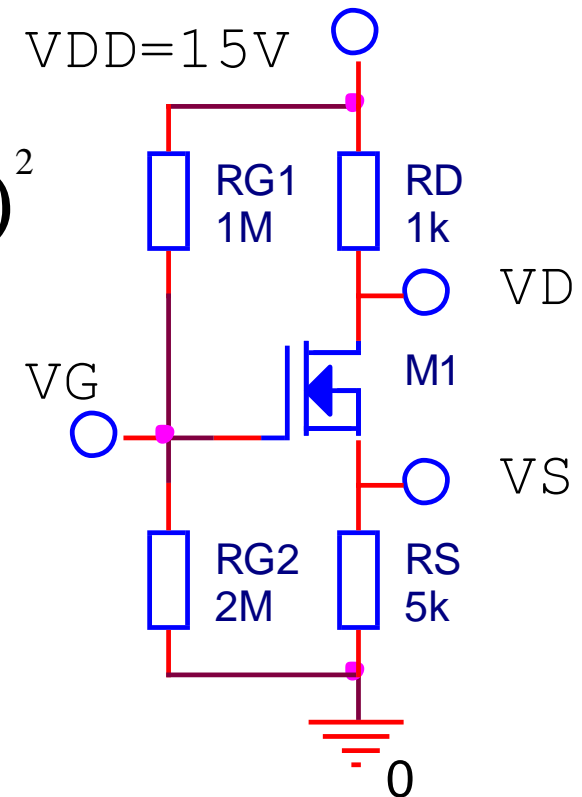
$$V_{GS} = 1, V_{GS} = 6$$

$$V_{GS} > V_T$$

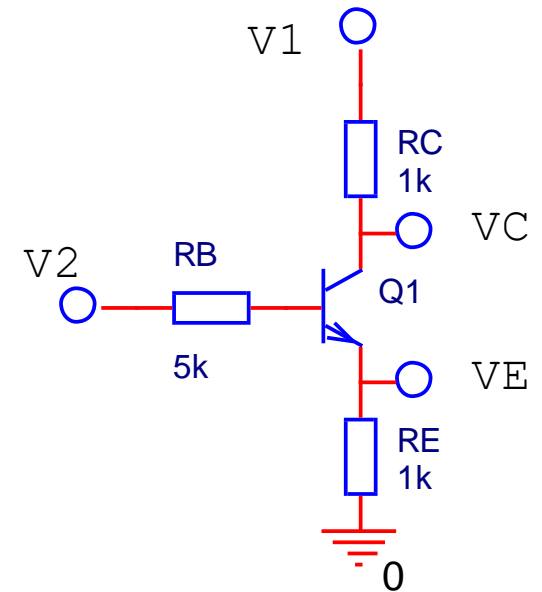
$$V_{GS} = 6$$

$$I_D = \frac{K}{2} (V_{GS} - V_T)^2 = 0,8mA$$

$$V_{DS} = V_{DD} - (R_D + R_S) I_D = 10,2V$$



4. Pentru schema din figura sa se determine I_C si V_{CE} , stiind ca $\beta=100$, $V_1=12V$ si $V_2=10V$.



5. Pentru schema din figura sa se determine I_D si V_{DS} , stiind ca $V_T=3V$ si $K=800\mu A/V^2$.

