

1. Purtători de sarcină în semiconductoare

- după conductibilitatea electrică corpurile solide sunt:

- conductoare
 - $\sigma > 10^3 / \Omega\text{cm}$ la t_{amb}
 - $n_e \sim 10^{22} / \text{cm}^3$ (electroni liberi)
 - neutre electric local și general
 - conductibilitatea scade cu temperatura

$$(j = qnv = qn\mu_n E = \sigma E = \frac{1}{\rho} E)$$

(în jurul ionilor pozitivi care nu participă la conducție se mișcă electroni mobili)

- semiconductoare
 - $\sigma \sim 10^{-10} \div 10^3 / \Omega\text{cm}$ (la temperatura ambiantă)
 - pentru $T < 100^0\text{K}$ rezultă $\sigma < 10^{-10} / \Omega\text{cm}$
 - σ depinde pronunțat de temperatură
- izolante
 - nici la temperaturi foarte mari nu prezintă o conductibilitate electrică importantă

Această comportare este determinată de natura legăturilor dintre atomi:

- la metale (conductoare) există legătura metalică, foarte slabă în care electronii formează un nor electronic și pot participa ușor la conducție;
- la izolatoare (materiale izolante) este specifică legătura ionică, foarte stabilă până la temperaturi foarte mari; poate să apară, eventual, o conducție ionică;
- semiconductoarele pot fi constituite:
 - dintr-un singur tip de atomi din grupa a patra (Ge sau Si)
 - din tipuri de atomi din grupe apropiate (de exemplu, din grupele III, V, exemplul tipic fiind semiconductorul GaAs);

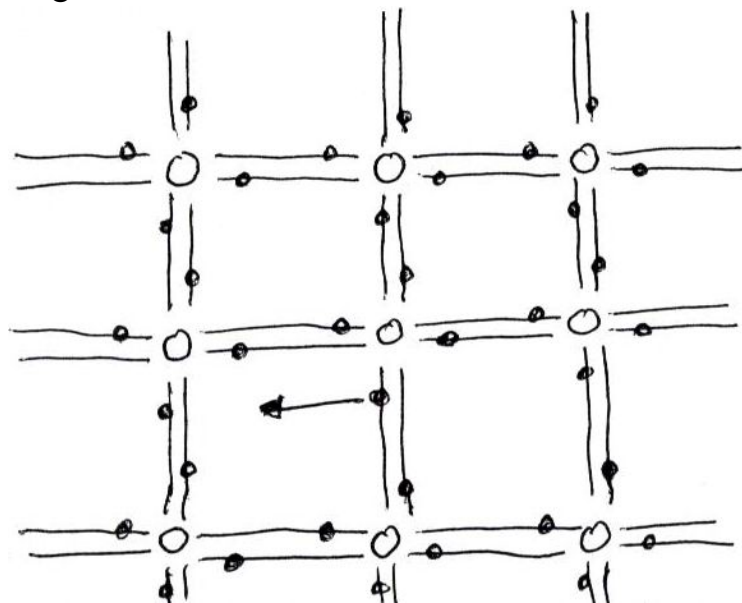
Între aceste tipuri de atomi se pot stabili legături covalente care constau din punerea în comun a unuia dintre electronii de valență.

Pentru a se elibera un electron din legătura covalentă este necesar un surplus de energie.

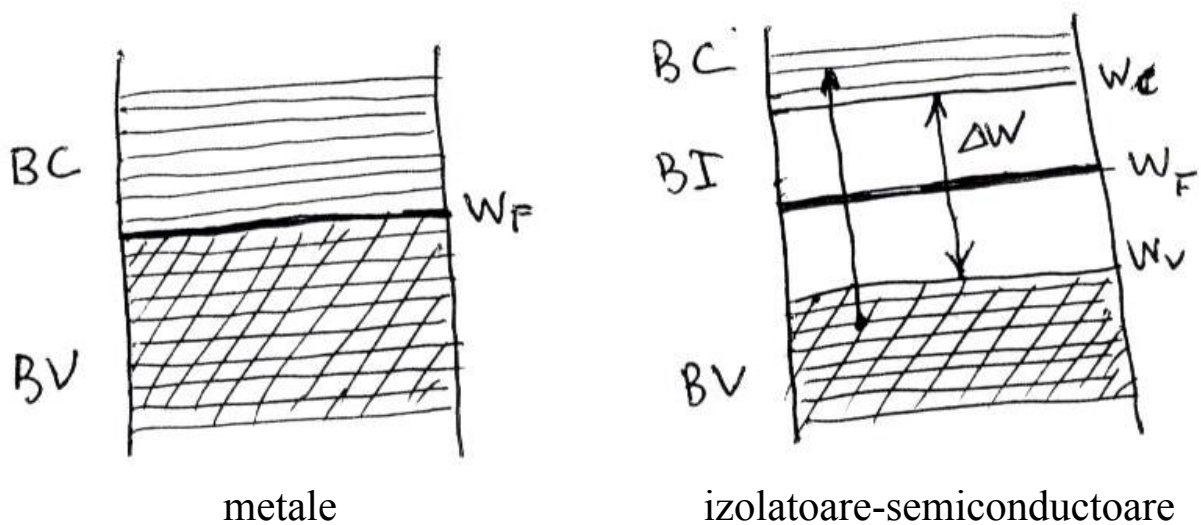
La temperaturi mai mari de 100^0K , datorită agitației termice, electronii din stratul de valență devin electroni liberi și formează o sarcină electronică reală mobilă.

În aceste condiții, la aplicarea unui câmp electric, electronii liberi se deplasează ordonat și formează un curent electric de natură electronică ;

Dar, un electron de valență vecin, de pe altă legătură covalentă, poate efectua o tranziție (tot datorită agitației termice) și ocupă locul rămas liber; sub influența câmpului electric, se constată că are loc o deplasare de sarcină pozitivă în sensul câmpului electric, adică un electron devenit liber determină efectuarea mai multor tranziții ca și când locurile libere s-ar deplasa. Se asociază acestei deplasări a unei sarcini pozitive noțiunea de **gol**, adică un purtător de sarcină pozitivă care determină o componentă a curentului electric. De remarcat că golul nu este o particulă elementară ci este un concept care simulează deplasarea locurilor goale din structura semiconductorului prin ocuparea lor de către electroni care se află deja pe alte nivele energetice.



O altă explicație a celor două componente ale curentului electric dintr-un semiconductor se poate da folosind teoria benzilor energetice dintr-un corp solid.



* **conductoare**: la temperatura absolută 0^0 Kelvin toate nivelele din BV sunt ocupate și cele din BC sunt libere; nivelul Fermi separă cele două benzi; dacă T crește, apar electroni de conducție care pot participa la conducție.

* **semiconductoare (izolatoare)**: la temperatura absolută 0^0 Kelvin toate nivelele din BV sunt ocupate și cele din BC sunt libere; poziția nivelului Fermi nu este precizată; electronii nu pot ocupa nivele din BI; la energie termică suficient de mare (foarte mare) este posibil ca unii electroni să treacă din BV în BC.

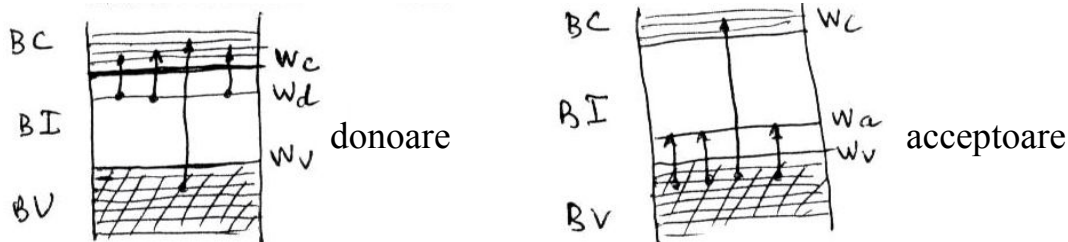
Numărul acestora depinde de ΔW :

- la germaniu: $\Delta W = 0,67 \text{ eV}$
- la siliciu: $\Delta W = 1,1 \text{ eV}$
- diamant: $\Delta W = 6-7 \text{ eV}$

Prin impurificare (procedee tehnologice), proprietățile electrice ale semiconductoarelor se modifică foarte mult fiind două posibilități:

* În cazul în care se introduc impurități ale căror nivele energetice permise în BV sunt foarte aproape de BC (elemente pentavalente, Bi, Sb, As, P) în care al cincilea electron trece ușor în banda de conducție, se obțin electroni de conducție chiar la temperaturi scăzute deși nu au apărut goluri în banda de valență adică procesul de generare de perechi de purtători nu este semnificativ. Se spune că impuritățile sunt de tip **donor** și că, la temperatura camerei, sunt ionizate complet. Rezultă că, în semiconductor, numărul de purtători mobili electroni este mai mare decât cel de goluri.

- a) impurificare cu substanțe pentavalente (Bi, Sb, As, P) - donoare
- al 5-lea electron trece ușor în BC – apar electroni de conducție
 - la temp. camerei – toate impuritățile sunt ionizate
 - procesul de generare de perechi nesemnificativ (încă)
- semiconductor extrinsec
- purtătorii majoritari – electronii – semic de tip N
 - purtătorii minoritari – golurile $n \gg p$



- b) impurificare cu substanțe trivalente (B, Al, In, Ga) - acceptoare
- apare ușor un gol în BV – pot participa la conducție
 - la temp. camerei – toate impuritățile sunt ionizate
 - procesul de generare de perechi nesemnificativ (încă)

- semiconductor extrinsec
- purtătorii majoritari — golurile - semic de tip P
- purtătorii minoritari – electronii $n \ll p$

- c) fără impurificare – semiconductor intrinsec
- numărul golurilor egal cu al electronilor $n = p = n_i$

În fizica corpului solid se calculează concentrațiile de electroni și de goluri în funcție de poziția nivelului Fermi:

$$n_0 = \nu_n e^{-\frac{W_c - W_F}{kT}} \quad p_0 = \nu_p e^{-\frac{W_F - W_v}{kT}}$$

$$\nu_n = 2 \left(\frac{2\pi m_n kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \quad \nu_p = 2 \left(\frac{2\pi m_p kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}}$$

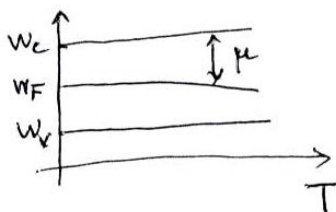
cu $n_0 p_0 = n_i^2$ (independent de W_F)

Semiconductor intrinsec

$$n_0 = p_0 \rightarrow \nu_n e^{-\frac{W_c - W_F}{kT}} = \nu_p e^{-\frac{W_F - W_v}{kT}} \rightarrow$$

$$W_F = \frac{W_c + W_v}{2} + \frac{3}{2} \frac{kT}{q} \ln \frac{m_p}{m_n}$$

la $0^\circ K \rightarrow W_F = \frac{W_c + W_v}{2};$



T crește $\rightarrow W_F$ scade ($m_p < m_n$)

concentrația intrinsecă de purtători n_i :

$$n_i^2 = n_0 p_0 = \nu_n \nu_p e^{-\frac{W_c - W_F}{kT}} = \nu_n \nu_p e^{-\frac{\Delta W}{kT}}$$

$$n_i^2 = const. T^3 e^{-\frac{\Delta W}{kT}} \rightarrow n_i = const. T^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{\Delta W}{2kT}}$$

$$n_i(Si) \cong 1.5 \cdot 10^{10} / cm^3 \quad n_i(Ge) \cong 2.5 \cdot 10^{13} / cm^3$$

* $n_i(Si) \ll n_i(Ge)$

* dependența de temperatură

Se mai pot scrie și sub forma:

$$n_0 = v_n e^{-\frac{\mu}{kT}} \quad p_0 = v_p e^{-\frac{\Delta W - \mu}{kT}}$$

Semiconductor extrinsec

* de tip N : $n_0 = p_0 + N_d^+$

- proveniți prin generare de perechi

- proveniți prin ionizarea impurităților donoare

* la temperatură ambiantă

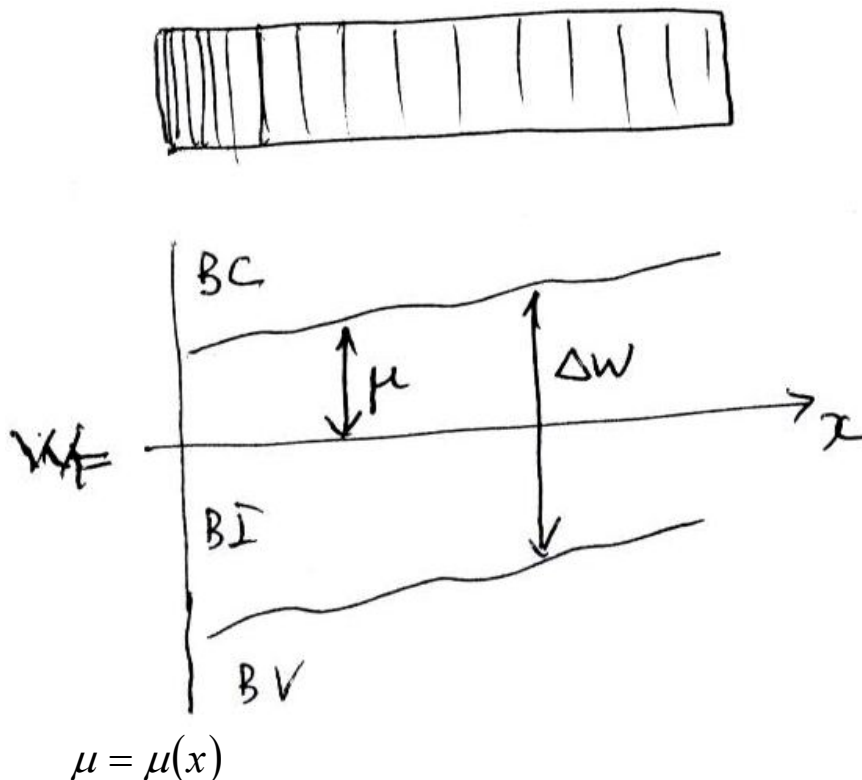
$$n_0 \cong N_d^+$$

* la temperatură mare

$$n_0 \cong p_0$$

Analog pentru semiconductor extrinsec de tip P

Observație: poziția nivelului Fermi depinde de concentrațiile de impurități. Dacă semiconductorul este dotat neuniform cu impurități, la echilibru termic poziția nivelului Fermi rămâne fixă și se modifică fundul BC și vârful BV.



2. Conductibilitatea electrică a semiconductoarelor

- T mic – număr mic de purtători – nu este curent electric
- T ambiantă – numărul de purtători mobili de sarcină crește prin ionizarea impurităților obținuți datorită agitației termice

Se aplică și câmp electric → peste mișcarea de agitație termică dezordonată se suprapune o mișcare dirijată a purtătorilor mobili de sarcină careia îi corespunde o viteză medie de deplasare. Se constată proporționalitatea cu câmpul electric:

$$\vec{v} = \mu \vec{E} \quad v \text{ viteza medie} \quad \vec{E} \text{ câmp electric aplicat}$$

$$\mu \text{ mobilitate} \left[\frac{m^2}{Vs} \right] \quad - \text{mărimde de material:}$$

$$\mu_p \cong \frac{1}{2} \mu_n (Ge); \mu_p < \frac{1}{2} \mu_n (Si)$$

- depinde de:
- temperatură (scade)
 - defectele structurii cristaline (scade)
 - concentrația purtătorilor liberi

Din vitezele medii → curentul de câmp:

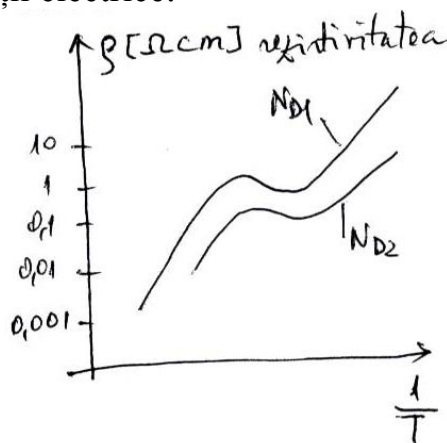
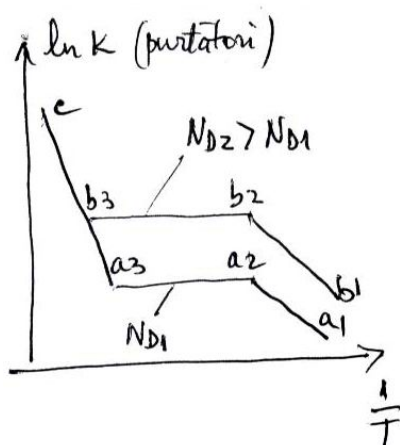
$$\vec{j}_{n \text{ camp}} = qn\mu_n \vec{E}; \quad \vec{j}_{p \text{ camp}} = qp\mu_p \vec{E}$$

$$\vec{j} = qn\mu_n \vec{E} + qp\mu_p \vec{E} = q(n\mu_n + p\mu_p) \vec{E} = \sigma \vec{E}$$

$$\sigma = qn\mu_n + qp\mu_p$$

- semiconductor intrinsec: $\sigma_i = qn_i(\mu_n + \mu_p)$
- semiconductor de tip N: $\sigma \cong qn\mu_n \cong qN_d\mu_n$
- semiconductor de tip P: $\sigma \cong qp\mu_p \cong qN_a\mu_p$
- impurități de ambele tipuri – se compensează

Variația cu temperatura a conductibilității electrice:



- a₁-a₂ temp. joasă – ionizare imp.
 a₂-a₃ temp. ambiantă – toate imp. sunt ionizate rezistivitatea scade la temp. ambiantă deoarece mobilitatea
 a₃-c temp. mare – crește conc. de purtători intrinseci scade cu temperatura
 b conc. imp. mai mare

3. Difuzia purtătorilor de sarcină

- semic. dopat neuniform cu impurități, fără câmp electric din exterior

a) tendința de uniformizare (ca la gaze) prin proces de difuzie → **curent de difuzie**;

b) apare câmp electric sarcini electrice pozitive fixe (stânga) și sarcini electrice negative mobile (dreapta) care are tendința de a aduce înapoi electronii spre stânga → **curent de câmp**.

c) rezultă proces de uniformizare dinamică

d) regim staționar (de echilibru) când transportul de purtători prin difuzie = transportul de purtători prin câmp.

Curentul de difuzie este proporțional cu gradientul concentrației de purtători:

$$\vec{j}_{n\ dif} = qD_n \nabla n; \quad \vec{j}_{p\ dif} = -qD_p \nabla p$$

$D_n, D_p \rightarrow$ constante de difuzie, $\left[\frac{cm^2}{s} \right]$ (depind de material)

Ecuatiile de transport

$$\vec{j}_n = \vec{j}_{n\ camp} + \vec{j}_{n\ dif} = qn\mu_n \vec{E} + qD_n \nabla n$$

$$\vec{j}_p = \vec{j}_{p\ camp} + \vec{j}_{p\ dif} = qp\mu_p \vec{E} - qD_p \nabla p$$

$$\vec{j} = \vec{j}_n + \vec{j}_p$$

La echilibru termic: $\vec{j}_n = \vec{j}_p = 0$

Legătura dintre constanta de difuzie și mobilitate

Ambele sunt mărimi care caracterizează același proces fizic cu caracter statistic al mișcării dezordonate a purtătorilor de sarcină.

- energia potențială: $W_p = ct. + \mu(x)$ Dar: $W_p = -qU$

- potențialul intern: $U = -\frac{W_p}{q}$ deci: $U(x) = ct. - \frac{\mu(x)}{q}$

- câmpul intern: $E = -grad U = \frac{\mu'(x)}{q}$

- curentul de electroni la echilibru termic:

$$j_n = qD_n \nabla n + qn\mu_n E = qD_n \frac{dn}{dx} + qn\mu_n E = 0$$

- din: $n = v_n e^{-\frac{\mu(x)}{kT}}$ se deduce: $\ln n = \ln v_n - \frac{\mu(x)}{kT}$ și apoi:

$$\frac{dn}{n} = -\frac{\mu'(x)}{kT} dx \text{ sau: } \frac{dn}{dx} = -\frac{n}{kT} \mu'(x)$$

- curentul de electroni devine:

$$-qD_n \frac{n}{kT} \mu'(x) + qn\mu_n \frac{\mu'(x)}{q} = 0,$$

de unde, pentru: $\mu'(x) \neq 0$, rezultă:

$$\mu_n = \frac{D_n}{kT}; \text{ la fel: } \mu_p = \frac{D_p}{kT} \quad (\text{relații Einstein})$$

Ecuatiile de transport:

$$j_n = qD_n \left(\nabla n + \frac{q}{kT} E n \right)$$

$$j_p = qD_p \left(-\nabla p + \frac{q}{kT} E p \right)$$

- echilibrul termic nu depinde de mobilitate sau de constanta de difuzie

4. Ecuatiile de continuitate

- variația în timp a concentrației de purtători:

- generare de purtători (termic, iradiere, etc.) – G_n, G_p

- recombinare de purtători (gol + electron \rightarrow dispar + foton) – R_p, R_n

- deplasare de purtători ($div j \neq 0$)

$$\frac{\partial p}{\partial t} = G_p - R_p - \frac{\text{div } \vec{j}_p}{q} = S_p - \frac{\text{div } \vec{j}_p}{q}$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = G_n - R_n - \frac{\text{div } \vec{j}_n}{-q} = S_n - \frac{\text{div } \vec{j}_n}{-q}$$

$$S_p = G_p - R_p \quad \text{viteza efectivă de creștere}$$

- Recombinare:
- directă
 - indirectă: - centri de recombinare
 - capcane
 - centri de alipire

Fie o generare de purtători care, la un moment dat, se oprește. Există $p_1 > p_0$ (concentrația la echilibru)

S_p va fi proporțională cu concentrația de purtători în exces, $p - p_0$, de forma:

$$S_p = -\frac{p - p_0}{\tau_p}$$

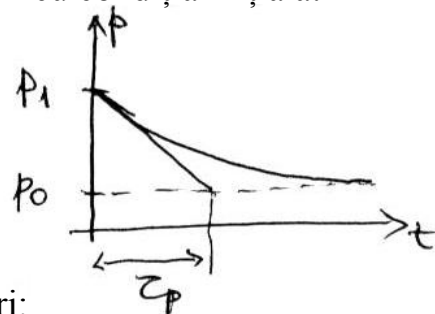
τ_p este durata efectivă de viață a purtătorilor în exces

Dacă: $\text{div } \vec{j}_p = 0$, se obține ec. dif.: $\frac{dp}{dt} = -\frac{p - p_0}{\tau_p}$ cu condiția inițială:

$$p(0) = p_1$$

Soluția: $p(t) = p_0 + (p_1 - p_0)e^{-\frac{t}{\tau_p}}$

- semnificația lui τ_p



Recombinarea depinde de concentrațiile de purtători:

$$R_p = \gamma pn, \quad \gamma \text{ este coef. de proporționalitate}$$

Generarea se face pe cale termică și viteza de generare depinde doar de temp.:

$$G_p = \gamma p_0 n_0$$

Rezultă: $S_p = G_p - R_p = -\gamma(pn - p_0 n_0)$

Fie: $\Delta p = p - p_0, \quad \Delta n = n - n_0$

$$S_p = -\gamma(n_0 \Delta p + p_0 \Delta n + \Delta n \Delta p) \cong -\gamma(n_0 \Delta p + p_0 \Delta n)$$

Semic. de tip N:

$$n_0 \gg p_0 \rightarrow S_p \cong -\gamma n_0 \Delta p = -\gamma n_0 (p - p_0)$$

Dar: $S_p = -\frac{p - p_0}{\tau_p} \rightarrow \tau_p = \frac{1}{\gamma n_0} \cong \frac{1}{\gamma N_d}$ (concluzie)

Forma generală a ecuațiilor de continuitate:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{p - p_0}{\tau_p} - \frac{\text{div} \vec{j}_p}{q}$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\frac{n - n_0}{\tau_n} + \frac{\text{div} \vec{j}_n}{q}$$

Aplicație:

- regim staționar
- semic. de tip N
- model unidimensional
- câmp electric slab

$$j_p = qp_n \mu_p E - qD_p \frac{dp_n}{dx} \cong -qD_p \frac{dp_n}{dx}$$

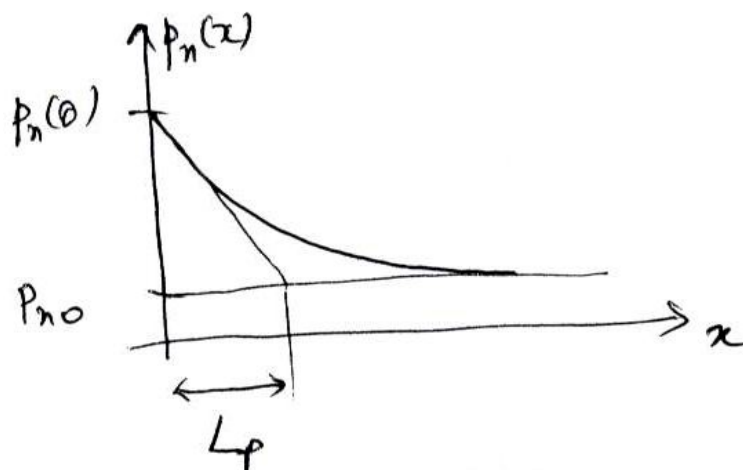
$$0 = -\frac{p_n - p_{n0}}{\tau_p} - \frac{1}{q} \frac{dj_p}{dx}$$

$$\frac{p_n - p_{n0}}{\tau_p} + \frac{1}{q} \frac{d}{dx} \left(-qD_p \frac{dp_n}{dx} \right) = 0$$

$$\frac{d^2 p_n}{dx^2} - \frac{p_n - p_{n0}}{D_p \tau_p} = 0$$

Se notează: $L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$ lungimea de difuzie a golurilor

$$p_n(x) = p_{n0} + [p_n(0) - p_{n0}] e^{-\frac{x}{L_p}}$$



- x -

Noțiuni de electronica corpului solid

1. Purtători de sarcină în semiconductoare
2. Conductibilitatea electrică a semiconductoarelor
3. Difuzia purtătorilor de sarcină
4. Ecuațiile de continuitate