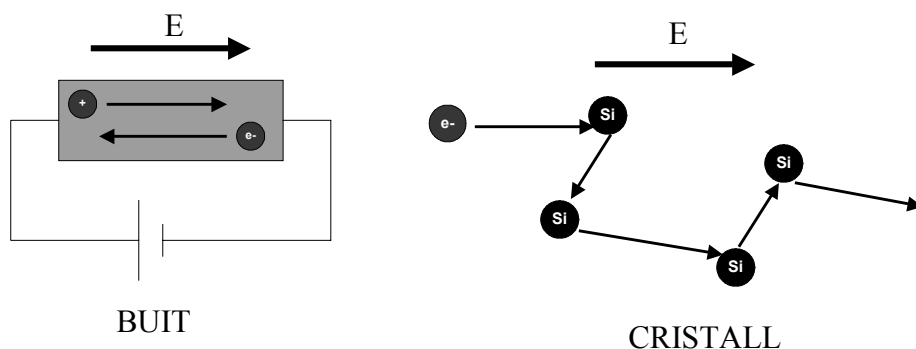


Tema 2: Acció dels portadors

- 1. Arrossegament
- 2. Difusió
- 3. Recombinació-Generació
- 4. Equacions d'Estat

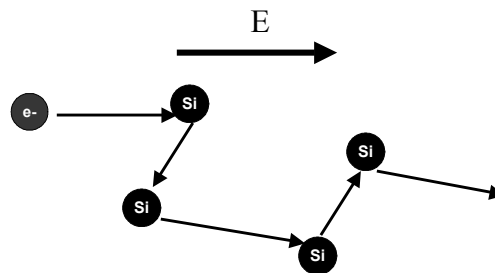
1. Arrossegament

- Moviment d'una partícula carregada en resposta a un camp elèctric E .



1. Arrossegament

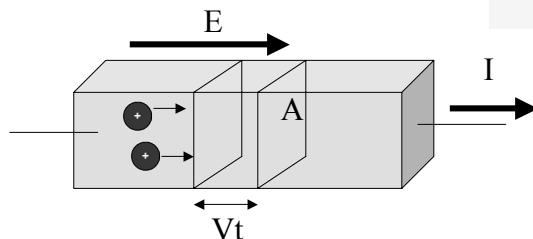
- Estudi microscòpic molt complicat
 - Macroscòpicament
 - L'efecte d'E es pot modelar com moviment de forats en la direcció del camp i moviment d'electrons en sentit contrari al camp, ambdós a velocitat constant
 - Moviment dels portadors també degut a agitació tèrmica (aleatori i en promig no contribueix al transport de càrrega)



1. Arrossegament

- Corrent d'arrossegament
 - I = càrrega per unitat de temps que creua un pla perpendicular a la direcció del fluxe de corrent
 - Tots els forats que es trobin a una distància Vt de A i anant a velocitat V creuaran el pla en un temps t .
 - Els forats dins del volum VtA creuen el pla A en un temps t
 - Això és : $pVtA$
 - Càrrega : $qpVtA$

$$I = \frac{\text{càrrega}}{t} = qpVA = I_{\text{Parrossegament}}$$

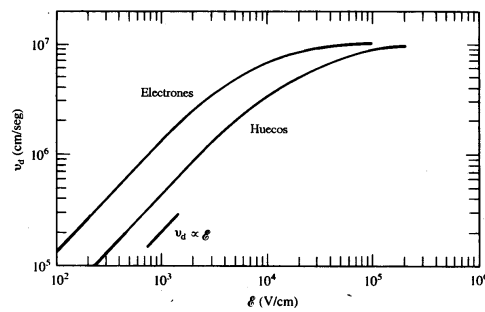


Densitat de corrent

$$J = \frac{I}{A} = qpV = J_{\text{Parrossegament}}$$

1. Arrossegament

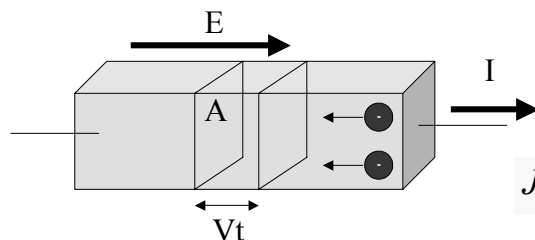
- Per valors petits de E, la velocitat d'arrossegament és proporcional al camp



$$\vec{V} = \mu_p \vec{E} \longrightarrow J_{Parrossegament} = qp\mu_p E$$

1. Arrossegament

- Pels portadors tipus electró
 - Contribució del mateix signe que forats
 - Electrons es mouen en sentit contrari, càrrega sentit contrari, contribució mateix signe



$$J_{Narrossegament} = qn\mu_n E$$

Densitat total de corrent d'arrossegament

$$J_{arrossegament} = J_{Parrossegament} + J_{Narrossegament} = qE(n\mu_n + p\mu_p)$$

1. Arrossegament

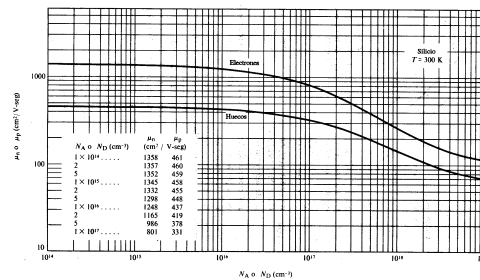
- Mobilitat

- Unitats [cm^2/Vs]. A Si (Tamb dopats N_A i N_D $10^{14} / \text{cm}^3$)

$$\mu_p = 460 \text{ cm}^2/\text{Vs}$$

$$\mu_n = 1360 \text{ cm}^2/\text{Vs}$$

- Mobilitat electrons major que mobilitat forats
- Augment del nombre de col.lisions (xarxes més denses) implica mobilitats menors



1. Arrossegament

- Mobilitat : dependència amb la temperatura

- Dopats baixos (10^{14} - $10^{17} / \text{cm}^3$)

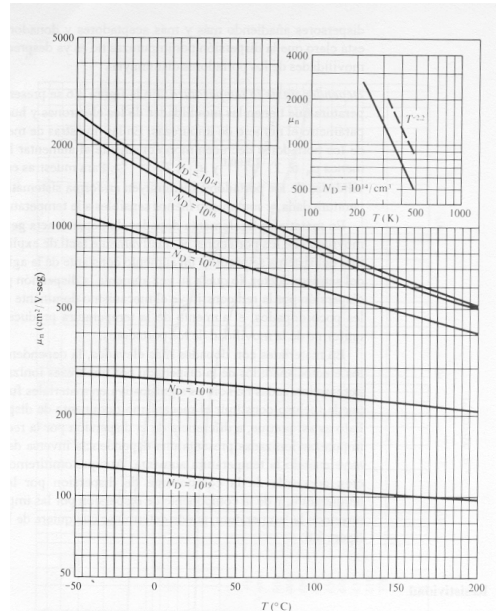
- Disminució de mobilitat amb T
 - Augmenta agitació tèrmica, augmenten col.lisions.

- Dopats alts

- A més de l'anterior, dispersió amb impureses ionitzades, la qual disminueix amb la T (al estar ionitzades les col.lisions disminueixen).
 - Conclusió, disminució amb la T però més suau que abans

1. Arrossegament

- Mobilitat: dependència amb la temperatura



1. Arrossegament

- Resistivitat d'un semiconductor
 - Resistivitat : mesura de la resistència d'un material a la circulació del fluxe de corrent

$$E = \rho J \quad \longrightarrow \quad J = \sigma E = \frac{1}{\rho} E$$

- La densitat de corrent és :

$$J_{\text{arrossegament}} = qE(n\mu_n + p\mu_p)$$

- Llavors, la resistivitat serà:

$$\rho = \frac{1}{q(\mu_n n + \mu_p p)}$$

Tipus N

→

$$\rho = \frac{1}{q\mu_n N_D}$$

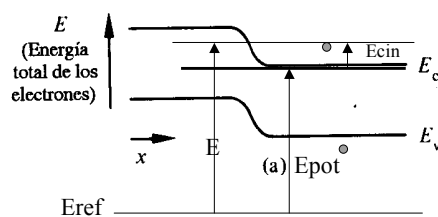
Tipus P

→

$$\rho = \frac{1}{q\mu_p N_A}$$

1. Arrossegament

- Corbatura de les bandes
 - E_C i E_V constants en funció de x
 - Aplicar un camp E implica una corbatura a les bandes
 - Si donem E_{gap} , un electró passa a la banda de conducció amb E_C , i queda un forat a banda valència amb E_V
 - Si donem $E_{gap} + dE$, $E_{electró} > E_C$ i $E_{forat} < E_V$.



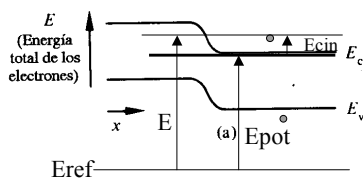
$$E_{cin} = E - E_C$$

$$E_{TOTAL} = E_{cin} + E_{pot}$$

$$E_C - E_{ref} = E_{pot}$$

$$E_{pot} = -qV = E_C - E_{ref}$$

1. Arrossegament



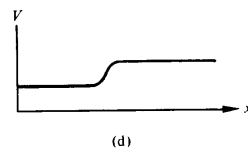
$$E_C - E_{ref} = E_{pot}$$

$$E_{pot} = -qV = E_C - E_{ref}$$

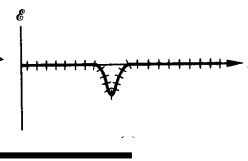
$$\vec{E} = -\nabla V \quad 1 \text{ dim} \quad \epsilon = -\frac{dV}{dx}$$

$$\epsilon = -\frac{dV}{dx} = \frac{1}{q} \frac{dE_C}{dx} = \frac{1}{q} \frac{dE_V}{dx} = \frac{1}{q} \frac{dE_i}{dx}$$

- Com V va com $E_{ref} - E_C$



- ϵ va com pendent de E_C
- Camp negatiu. Sentit -x



2. Difusió

- Procés pel qual les partícules tendeixen a redistribuir-se, movent-se des de zones on hi ha alta concentració a zones de baixa concentració

– Exemple intuïtiu

1024	0	0	0
------	---	---	---

512	512	0	0
-----	-----	---	---

512	256	256	0
-----	-----	-----	---

384	384	128	128
-----	-----	-----	-----

384	256	256	128
-----	-----	-----	-----

– Resultat final : distribució homogènea als 4 compartiments

– A un semiconductor

- Emigració de partícules de zones d'alta concentració a zones de baixa
- Moviment de càrregues
- Corrents de difusió

2. Difusió

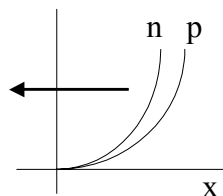
- Corrents de difusió i corrent total

– Corrents de difusió

- Condició , existència de gradient de portadors
- Major gradient implicarà major diferència de concentració, o sigui major corrent.

– Corrents de difusió són proporcionals als gradients de concentració de partícules

concentració



$$J_{p\text{dif}} = -qD_p \nabla p$$

$$J_{n\text{dif}} = qD_n \nabla n$$

- D_p i D_n constants de proporcionalitat cm^2/s

2. Difusió

- Corrents de difusió i corrent total

$$J_N = J_{N\text{arrossegament}} + J_{N\text{dif}} = qEn\mu_n + qD_N\nabla n$$

$$J_P = J_{P\text{arrossegament}} + J_{P\text{dif}} = qEp\mu_p - qD_P\nabla p$$

- Relació d'Einstein

– Relació entre mobilitats i constants de difusió

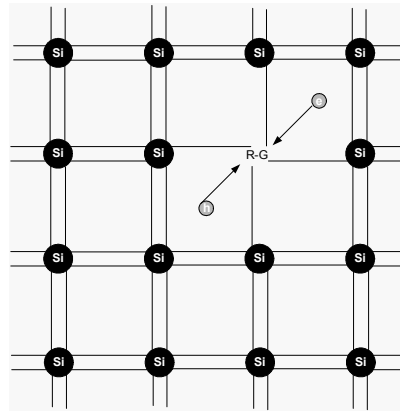
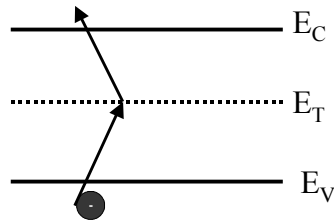
$$\frac{D_N}{\mu_n} = \frac{KT}{q} = \frac{D_P}{\mu_p}$$

- Demostrem-ho !!

3. Recombinació-Generació

- Generació:
 - Procés pel qual es creen electrons i forats (portadors)
- Recombinació:
 - Procés pel qual s'aniquilen electrons i forats (portadors)
- Generació (tipus)
 - Fotogeneració : absorció d'energia lumínica
 - Tèrmica directe : excitació provocada per calor
 - També recombinació tèrmica directe
 - Tèrmica indirecte:
 - Es produeix als centres de generació-recombinació (G-R) del cristall
 - Àtoms especials d'impureses
 - Defectes a la xarxa

3. Recombinació-Generació



- En equilibri, nombre de recombinacions és igual al nombre de generacions
 - Es mantenen constants les concentracions de portadors
- Perturbació del semiconductor
 - Alteració dels processos de G-R, i tendència al retorn a l'equilibri
 - Efecte en el fluxe de corrent, modificació de les concentracions de portadors, implicacions en difusió i arrossegament

3. Recombinació-Generació

- Estadística R-G
 - Fotogeneració : produeix un nombre igual de forats i d'electrons. (en il.luminació uniforme G_L és constant)

$$\left. \frac{\partial n}{\partial t} \right|_{\text{fotogeneració}} = \left. \frac{\partial p}{\partial t} \right|_{\text{fotogeneració}} = G_L$$

- Generació tèrmica indirecte

n_0, p_0 concentracions en equilibri

n, p concentracions en condicions arbitràries

$\Delta n, \Delta p$ variacions de concentracions respecte a l'equilibri

N_T nombre de centres R-G

$\left. \frac{\partial n}{\partial t} \right|_{R-G}, \left. \frac{\partial p}{\partial t} \right|_{R-G}$ velocitat de variació de les concentracions

3. Recombinació-Generació

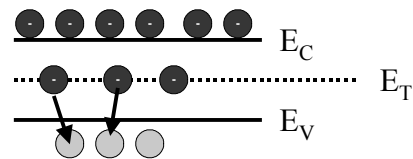
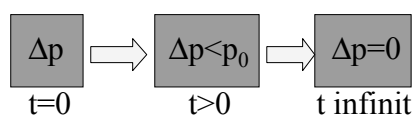
– Generació tèrmica indirecte (continuació)

- Suposem un semiconductor N (o P) sotmés a una perturbació petita que produeix injecció de baix nivell

$$\begin{array}{ll} \text{a un semiconductor N} & n \approx n_0 \quad i \quad \Delta p \leq n_0 \\ \text{a un semiconductor P} & p \approx p_0 \quad i \quad \Delta n \leq p_0 \end{array}$$

• Exemple :

- Silici a T ambient, $N_D = 10^{14} / \text{cm}^3$ $\Delta p = \Delta n = 10^9 / \text{cm}^3$ (Tipus N)
- Comprovem que estam en condicions d'injecció de baix nivell ??



- Forats en excés, eliminació amb electrons atrapats als centres R-G
- Major nombre de centres implica major probabilitat d'aniquilació, més ràpid retorn a l'equilibri
- Durant el procés de relaxació, tots els N_T centres estaran ocupats per electrons (nivell energètic menor)

3. Recombinació-Generació

- Durant aquest procés de relaxació (tornada a l'equilibri)

- Nombre de centres ocupats serà el total N_T

$$\left. \frac{\partial p}{\partial t} \right|_{R-G\text{èrmica}} \propto N_T$$

- Quan major sigui Δp , major la velocitat d'aniquilació

$$\left. \frac{\partial p}{\partial t} \right|_{R-G\text{èrmica}} \propto \Delta p$$

- Per tant, a un semiconductor N pels portadors minoritaris (forats)

$$\left. \frac{\partial p}{\partial t} \right|_{R-G\text{èrmica}} = -C_p N_T \Delta p$$

3. Recombinació-Generació

- Semiconductor N pels portadors minoritaris (forats)

$$\left. \frac{\partial p}{\partial t} \right|_{R-Gtèrmica} = -C_p N_T \Delta p$$

- Semiconductor P pels portadors minoritaris (electró)

$$\left. \frac{\partial n}{\partial t} \right|_{R-Gtèrmica} = -C_n N_T \Delta n$$

- C_N i C_P coeficients de captura d'electrons i forats
- $C_P N_T$ i $C_N N_T$ unitats t^{-1}
 - Introducció de constants de temps

$$\tau_p = \frac{1}{C_p N_T} \quad i \quad \tau_n = \frac{1}{C_n N_T}$$

3. Recombinació-Generació

- En termes de constants de temps

$$\left. \frac{\partial p}{\partial t} \right|_{R-Gtèrmica} = -\frac{\Delta p}{\tau_p}$$

$$\left. \frac{\partial n}{\partial t} \right|_{R-Gtèrmica} = -\frac{\Delta n}{\tau_n}$$

- Si $\Delta p < 0$ llavors $dp/dt > 0$
 - Si llevam portadors, la tendència és afegir-ne
- Si $\Delta p > 0$ llavors $dp/dt < 0$
 - Si afegim portadors, la tendència és aniquilar-ne
- Interpretació de les constants de temps (τ)
 - Temps de vida mitja d'un portador minoritari en excés abans de ser aniquilat
 - Dependrà de N_T i no de N_A o N_D .
 - Dificultat, N_T variable no controlada en el procés
 - Són per tant variables i es solen determinar experimentalment

4. Equacions d'estat

- Consideren tots els processos fins aquí presentats
- Equacions de continuïtat
 - Considerant tots els processos, es pot escriure

- Pels electrons

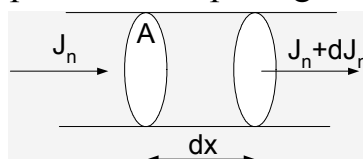
$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{\partial n}{\partial t} \Big|_{\text{arrossegament}} + \frac{\partial n}{\partial t} \Big|_{\text{dif}} + \frac{\partial n}{\partial t} \Big|_{R-\text{Gèrmica}} + \frac{\partial n}{\partial t} \Big|_{\text{fotogeneració (altres)}}$$

- Pels forats

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\partial p}{\partial t} \Big|_{\text{arrossegament}} + \frac{\partial p}{\partial t} \Big|_{\text{dif}} + \frac{\partial p}{\partial t} \Big|_{R-\text{Gèrmica}} + \frac{\partial p}{\partial t} \Big|_{\text{fotogeneració (altres)}}$$

4. Equacions d'estat

- Els e^- i h^+ no poden apareixer en un punt, han de ser transportats al punt o creats per algun tipus d'acció



$n^\circ e^-$ desapareixen = $n^\circ e^-$ que se'n van del corrent + $n^\circ e^-$ recombinats

$$-\frac{dn}{dt} A dx = \frac{A}{-q} dJ_n + \left[\frac{-\partial n}{\partial t} \Big|_{R-\text{Gèrmica}} + \frac{-\partial n}{\partial t} \Big|_{\text{altres processos}} \right] A dx$$

$$\frac{dn}{dt} = \frac{1}{q} \frac{dJ_n}{dx} + \frac{\partial n}{\partial t} \Big|_{R-\text{Gèrmica}} + \frac{\partial n}{\partial t} \Big|_{\text{altres processos}}$$

4. Equacions d'estat

- Similarment, pels forats tendrem

$$\frac{dp}{dt} = -\frac{1}{q} \frac{dJ_p}{dx} + \left. \frac{\partial p}{\partial t} \right|_{R-Gèrmica} + \left. \frac{\partial p}{\partial t} \right|_{altres processos}$$

- I en el cas tridimensional :

$$\frac{dp}{dt} = -\frac{1}{q} \nabla \cdot J_p + \left. \frac{\partial p}{\partial t} \right|_{R-Gèrmica} + \left. \frac{\partial p}{\partial t} \right|_{altres processos} \quad \frac{dn}{dt} = \frac{1}{q} \nabla \cdot J_n + \left. \frac{\partial n}{\partial t} \right|_{R-Gèrmica} + \left. \frac{\partial n}{\partial t} \right|_{altres processos}$$

- Les equacions de continuïtat són el punt de partida de la majoria de problemes
 - Generalment es precisa càlcul numèric per a la seva solució
 - Solucions analítiques $\longrightarrow$ aproximacions i simplificacions

4. Equacions d'estat

- Equacions de difusió per portadors minoritaris
 - Equacions de continuïtat amb les següents simplificacions
 - Sistema unidimensional
 - Només per portadors minoritaris
 - Camp elèctric aplicat nul
 - Concentració de minoritaris en equilibri no depèn de x
 - Baix nivell d'injecció
 - No hi ha altres processos de generació excepte fotogeneració

$$\frac{\partial \Delta n}{\partial t} = D_N \frac{\partial^2 \Delta n}{\partial x^2} - \frac{\Delta n}{\tau_n} + G_L$$

Tipus P : minoritaris n

$$\frac{\partial \Delta p}{\partial t} = D_P \frac{\partial^2 \Delta p}{\partial x^2} - \frac{\Delta p}{\tau_p} + G_L$$

Tipus N : minoritaris p

4. Equacions d'estat

- Equacions difusió portadors minoritaris
 - Simplificacions i solucions (a un tipus N)

- 1) Règim estacionari sense il.luminació

$$\Delta p(x) = Ae^{-\frac{x}{\sqrt{D_p \tau_p}}} + Be^{\frac{x}{\sqrt{D_p \tau_p}}}$$

- 2) Sense gradient de concentració i sense il.luminació

$$\Delta p(t) = \Delta p(o) e^{-\frac{t}{\tau_p}}$$

- 3) Règim estacionari sense gradient de concentració

$$\Delta p = \tau_p G_L$$

- 4) Règim estacionari, sense R-G i sense il.luminació

$$\Delta p(x) = A + Bx$$