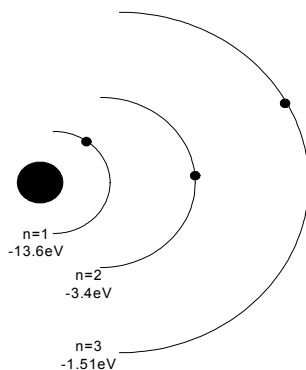


Tema 1: Models de portadors

- 1. Concepte de quantització
- 2. Models de semiconductors
- 3. Propietats dels portadors
- 4. Distribució d'estats i de portadors
- 5. Concentració de portadors en equilibri

1. El concepte de quantització

- Àtom d'hidrògen
 - Quan els electrons passen d'un estat a un altre s'emet llum d'unes determinades longituds d'ona
 - Els electrons es troben en estats discrets d'energia



$$E_H = \frac{-m_0 q^4}{2(4\pi\epsilon_0 \hbar n)^2} = \frac{-13.6}{n^2} eV$$

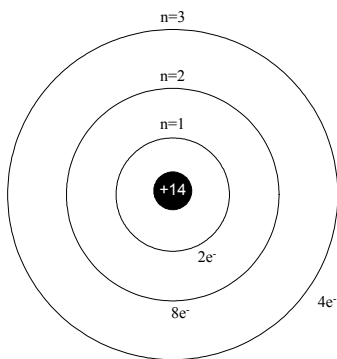
m_0 = massa d'un electró lliure
 q = càrrega electró
 ϵ_0 = permitivitat del buit
 h = constant de Planck
 n = nombre quàntic

1. El concepte de quantització

- Àtom de Silici

- Teoria quàntica : orbitals atòmics

- Nombres quàntics (n, l, m, s)-Orbitals atòmics (s, p, d, f, ...)



$n=1, l=0, m=0, s=+1/2, -1/2$ orbital 1s
 $n=2, l=0, m=0, s=+1/2, -1/2$ orbital 2s
 $n=2, l=1, m=0, s=+1/2, -1/2$ orbital 2p
 $n=2, l=1, m=-1, s=+1/2, -1/2$ orbital 2p
 $n=2, l=1, m=1, s=+1/2, -1/2$ orbital 2p
 $n=1, 2, 3, 4, \dots, l=0, 1, \dots, n-1, m=-l, -l+1, \dots, l-1, l$

10 e⁻ lligats al nucli

**4 e⁻ més deslligats : electrons valència
(enllaços amb altres àtoms)**

- Al Ge tenim 28 electrons lligats i 4 menys lligats (valència)

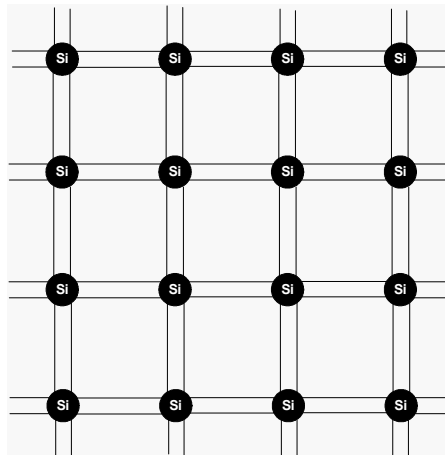
- Problema : Cristall de Si (xarxa amb $5 \cdot 10^{22}$ àtoms/cm³)

2. Models de semiconductors

- Model d'enllaç

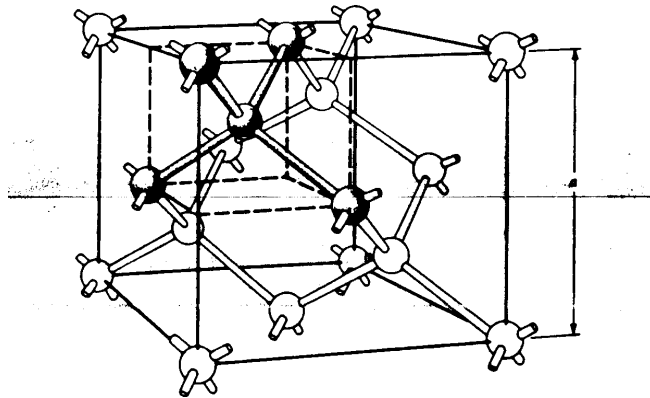
- Àtom Si comparteix 4e⁻ valència amb 4 àtoms propers

- Cristall perfecte i T=0°K



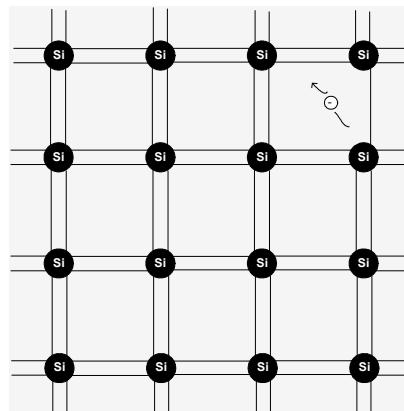
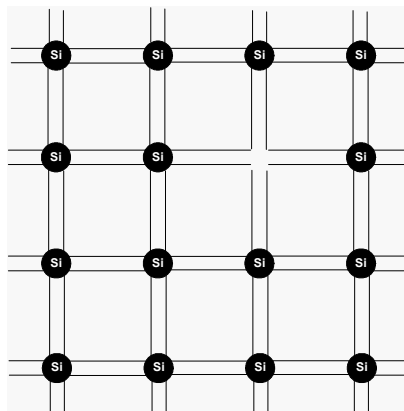
2. Models de semiconductors

- Cristall perfecte. Estructura tridimensional
 - Estructura diamant.



2. Models de semiconductors

- Realment : defectes com vacants (falta d'àtom de Si)
- A $T > 0^\circ\text{K}$, aportació energètica
 - Electrons poden sortir de l'enllaç i moure's pel cristall lliurement

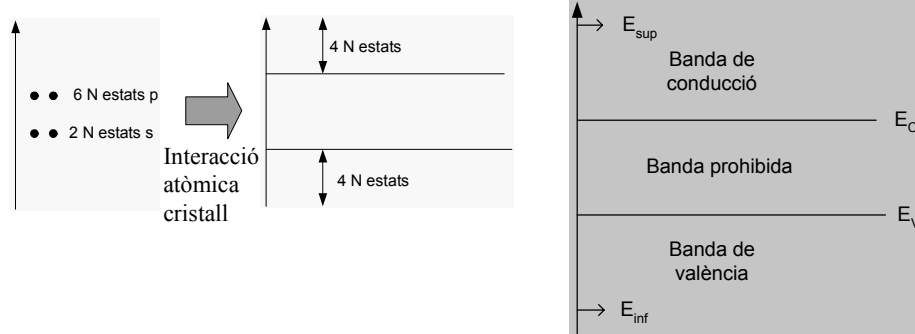


2. Models de semiconductors

- Model bandes energia

- Cristall Si . N àtoms

- Modificació dels estats energètics dels electrons de valència degut a les interaccions atòmiques dels àtoms



Concepte de Bandes d'energia

- A nivell de cristall, electrons de valència no estan associats cada un a un àtom, poden anar intercanviant d'enllaç. Té sentit parlar d'estructura i bandes d'energia

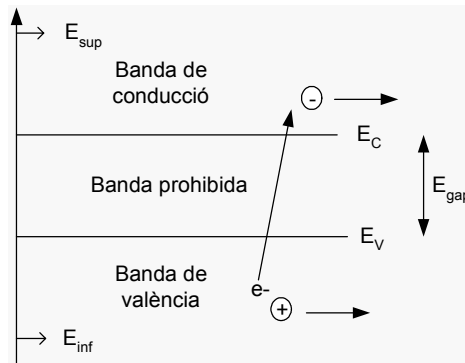
2. Models de semiconductors

- Portadors a un semiconductor

- Elements que intervenen en el transport de càrrega
 - A $T=0^\circ\text{K}$, banda de valència plena i banda conducció buida. No hi ha portadors
 - Si augmentam T , donam energia i qualche electró de la banda de valència pot passar a la banda de conducció. S'ha creat un portador.
 - El procés anterior implica que queda un enllaç buit a la banda de valència. Altres electrons de la banda de valència poden ocupar aquest enllaç.
 - Es veu un forat que es mou a la banda de valència. (nou portador)

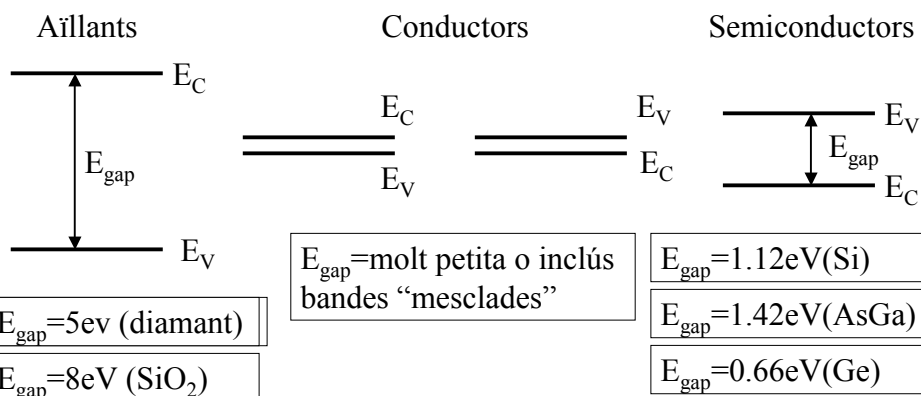
2. Models de semiconductors

- Portadors a un semiconductor
 - Generació parell electró-forat a un semiconductor



2. Models de semiconductors

- Classificació dels materials
 - Aïllants : a T ambient molt pocs e- a banda conducció
 - Conductors : a T ambient molts e- a banda conducció
 - Semiconductors : Situació intermija



3. Propietats dels semiconductors

- Càrrega
 - $q = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ ($e^- = -q$; $h^+ = +q$)
- Massa efectiva
 - Electrón al buit en presència d'un camp elèctric

$$\vec{F} = -q\vec{E} = m_e \frac{d\vec{v}}{dt}$$

- Dins un cristall, camps atòmics i múltiples col·lisions. Descripció mecànico-quàntica.
 - Simplificació : considerar efectes a la massa de l'electró

$$\vec{F} = -q\vec{E} = m_n \frac{d\vec{v}}{dt}$$

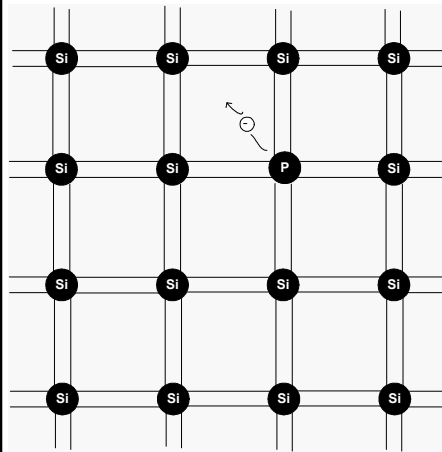
$$\begin{aligned} \text{electró : } \frac{m_n}{m_e} &= 1.18(\text{Si}) = 0.55(\text{Ge}) = 0.066(\text{AsGa}) \\ \text{forat : } \frac{m_n}{m_e} &= 0.81(\text{Si}) = 0.36(\text{Ge}) = 0.52(\text{AsGa}) \end{aligned}$$

3. Propietats dels semiconductors

- Concentració de portadors a un material intrínsec
 - Semiconductor intrínsec : no presenta impureses
 - $n = n^\circ \text{ electrons/cm}^3$ i $p = n^\circ \text{ forats/cm}^3$
 - A un semiconductor intrínsec en equilibri $n = p = n_i$
 - Generació d'un parell implica generació d'electró i de forat
 - $n_i = 1 \cdot 10^{10} / \text{cm}^3$ (Si), $n_i = 2 \cdot 10^{13} / \text{cm}^3$ (Ge), $n_i = 2 \cdot 10^6 / \text{cm}^3$ (AsGa)
 - Nota : valors de n_i petits si es comparen amb el nombre de possibles portadors de la xarxa
 - Si al Silici hi ha $5 \cdot 10^{22} \text{ àtoms/cm}^3$ això implica $2 \cdot 10^{23} \text{ portadors/cm}^3$

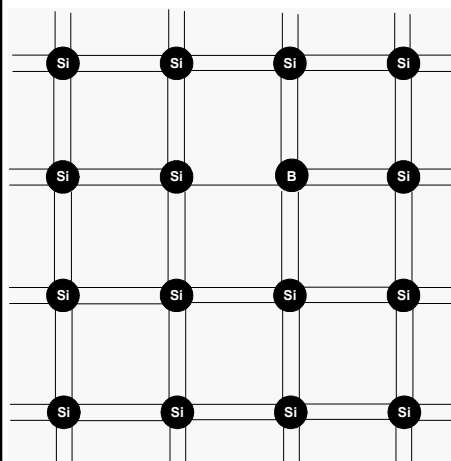
3. Propietats dels semiconductors

- Semiconductors extrínsecs : Dopatge
 - Dopar: afegir impureses dins la xarxa de manera control·lada.
 - Impureses normalment àtoms de la III (Bor) o V (Fósfor) columna de la taula periòdica



- Exemple I : Fósfor (P)
- Un àtom de P per un de Si
- 4 e- de valència
- Un 5^e e- molt més deslligat
- Poca aportació d'energia
 - e- passa banda conducció
 - No deixa forat a valència
 - Ara $n > p$ (semiconductor tipus N)
 - Impureses donants (donen electrons)
 - Electrons= portadors majoritaris
 - Forats= portadors minoritaris

3. Propietats dels semiconductors



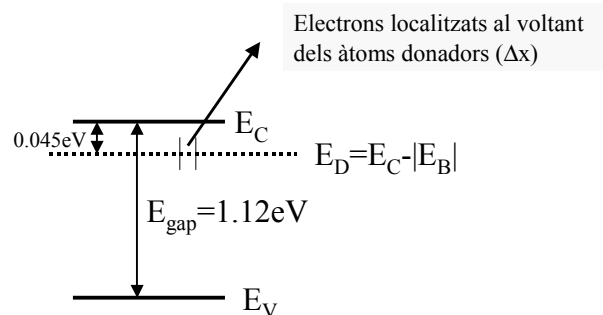
- Exemple II : Bor (B)
- Un àtom de B per un de Si
- 3 e- de valència
- Un forat generat (enllaç buit d'electró)
- Poca aportació d'energia
 - e- d'altres enllaços ocupen enllaç buit (forat), deixant un nou forat.
 - Forat activat a banda valència sense electró a la banda de conducció
 - Ara $p > n$ (semiconductor tipus P)
 - Impureses acceptants (accepten electrons)
 - Forats= portadors majoritaris
 - Electrons= portadors minoritaris

3. Propietats dels semiconductors

- Model de bandes

- Semiconductor tipus N

- $5^{\text{è}}$ electró genera un estat energètic al costat de E_C
 - Primera aproximació àtom hidrògen = -0.1 eV
 - Càlcul exacte (numèric) = 0.045 eV : $E_B = 1/20 E_C$
 - A $T=0^\circ\text{K}$ tots els $5^{\text{è}}$ s electrons a l'energia E_D
 - Si T augmenta comencen a passar a conducció i a T ambient quasi tots han passat a banda conducció

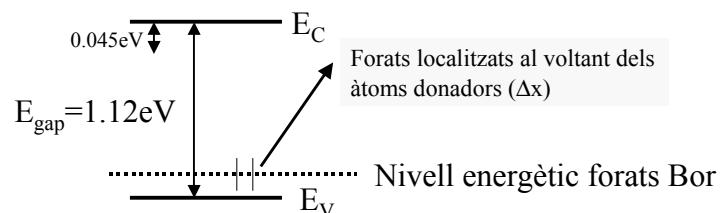


3. Propietats dels semiconductors

- Model de bandes

- Semiconductor tipus P

- Forats no ocupats generen un estat energètic proper a la banda de valència
 - A $T=0^\circ\text{K}$ tots els forats es troben desocupats
 - Si T augmenta comencen a passar electrons a aquest nivell quedant forats a la banda de valència.
 - A T ambient quasi tots els forats deguts al Bor es troben ocupats



4. Distribució d'estats i de portadors

- Tractament quantitatiu del problema
- Densitat d'estats
 - Nombre d'estats a cada banda = $4 N$ (N =nombre d'àtoms del cristall)
 - Com es distribueixen aquests estats en quan a energia ?
 - Solució : Mecànica quàntica.
 - $g_C(E)$ i $g_V(E)$ densitat d'estats per una energia E a la banda de conducció i valència respectivament
 - $g_C(E)dE$ nombre d'estats banda conducció amb energia entre E i $E+dE$
 - $g_V(E)dE$ nombre d'estats a banda valència amb energia entre E i $E+dE$

$$g_C(E) = \frac{m_n \sqrt{2m_n(E - E_C)}}{\pi^2 \hbar^3} \quad E \geq E_C$$

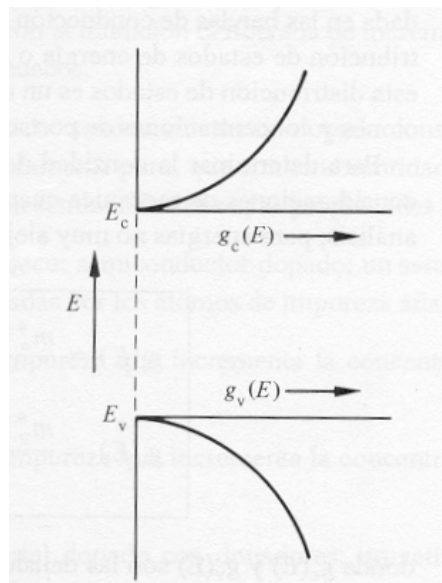
$$g_V(E) = \frac{m_p \sqrt{2m_p(E_V - E)}}{\pi^2 \hbar^3} \quad E \leq E_V$$

4. Distribució d'estats i de portadors

- Densitat d'estats

$$g_C(E) = \frac{m_n \sqrt{2m_n(E - E_C)}}{\pi^2 \hbar^3} \quad E \geq E_C$$

$$g_V(E) = \frac{m_p \sqrt{2m_p(E_V - E)}}{\pi^2 \hbar^3} \quad E \leq E_V$$



4. Distribució d'estats i de portadors

- Funció de Fermi

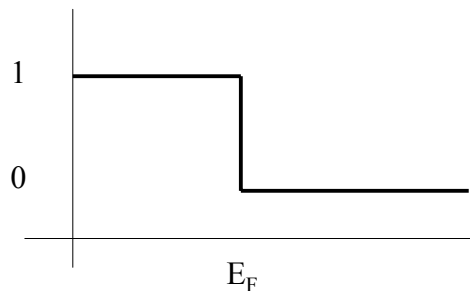
- Quants dels estats existents a energia E estaran ocupats per un electró ?
- $f(E)$ especifica en condicions d'equilibri la probabilitat de que un estat permès d'energia E estigui ocupat per un electró
- $f(E)$ és una funció de distribució.
 - E_F energia o nivell de Fermi, K ctant Boltzmann $8.62 \cdot 10^{-5} \text{ eV/}^\circ\text{K}$,
 T temperatura en $^\circ\text{K}$

$$f(E) = \frac{1}{1 + e^{(E - E_F)/KT}}$$

4. Distribució d'estats i de portadors

- Funció de Fermi

- A $T=0^\circ\text{K}$ (concepte de nivell de Fermi)
 - $f(E < E_F) = 1$
 - $f(E > E_F) = 0$



4. Distribució d'estats i de portadors

- Funció de Fermi

– A $T > 0^\circ\text{K}$

$$1) \text{ Si } E = E_F \quad f(E) = \frac{1}{2}$$

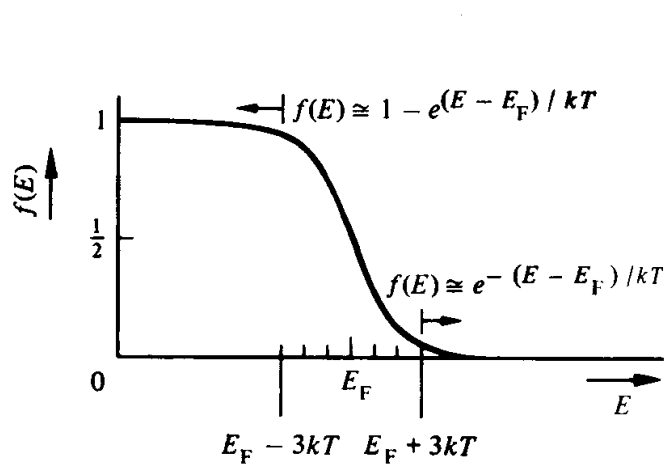
$$2) \text{ Si } E \geq E_F + 3KT \quad f(E) \approx e^{-(E-E_F)/KT}$$

$$3) \text{ Si } E \leq E_F - 3KT \quad f(E) \approx 1 - e^{(E-E_F)/KT}$$

4. Distribució d'estats i de portadors

- Funció de Fermi a $T > 0^\circ\text{K}$

$$3KT = 0.078\text{eV}$$

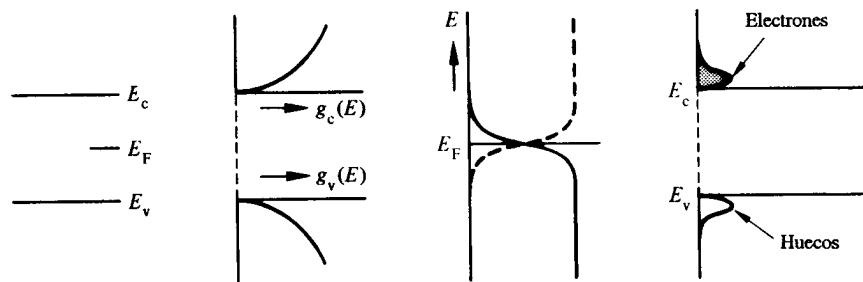


4. Distribució d'estats i de portadors

- Distribució de portadors en equilibri
 - Producte densitat d'estats x funció de Fermi

$$g_c(E)f(E) \quad i \quad g_v(E)(1-f(E))$$

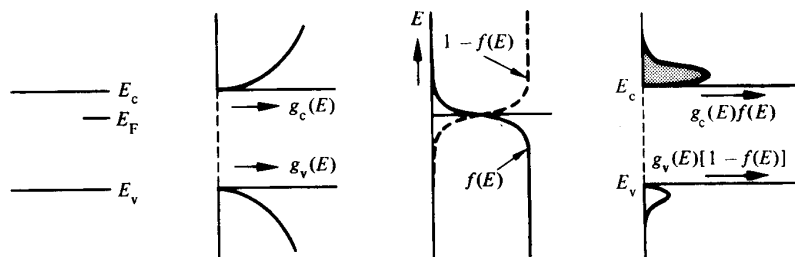
- Cas 1 : E_F a la mitat de la banda prohibida



ES TRACTA D'UN SEMICONDUCTOR INTRÍNSEC

4. Distribució d'estats i de portadors

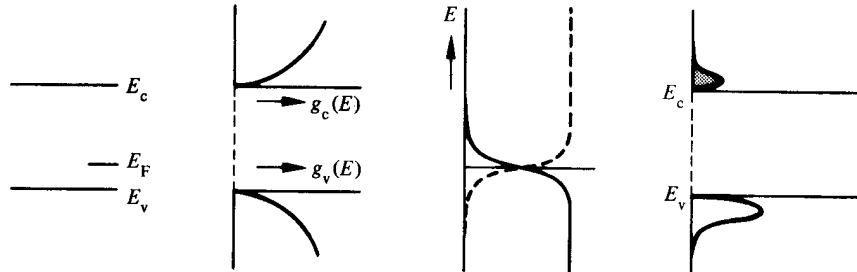
- Cas 2. E_F proper a la banda de conducció ($E_F > E_i$)



ES TRACTA D'UN SEMICONDUCTOR TIPUS N (EXTRÍNSEC)

4. Distribució d'estats i de portadors

- Cas 3. E_F proper a la banda de valència ($E_F < E_i$)



ES TRACTA D'UN SEMICONDUCTOR TIPUS P (EXTRÍNSEC)

- A tots els casos:
 - Màxim a energia superior a E_C pels electrons
 - Màxim a energia inferior a E_V pels forats
 - Distribució igual a 0 a E_C i a E_V

5. Concentració de portadors en equilibri

- Expressions per n i p (Càlcul engorrós-Integral de Fermi-Dirac d'ordre 1/2)

$$n = \int_{E_C}^{E_{\max}} g_C(E) f(E) dE$$

$$p = \int_{E_{\min}}^{E_V} g_V(E) (1 - f(E)) dE$$

$$n = N_C \frac{2}{\sqrt{\pi}} F_{1/2}(\eta_C)$$

$$p = N_V \frac{2}{\sqrt{\pi}} F_{1/2}(\eta_V)$$

$$N_C = 2 \left(\frac{2\pi m_n KT}{h^2} \right)^{3/2}$$

$$N_V = 2 \left(\frac{2\pi m_p KT}{h^2} \right)^{3/2}$$

$$\eta_C = \frac{E_F - E_C}{KT}$$

$$\eta_V = \frac{E_V - E_F}{KT}$$

5. Concentració de portadors en equilibri

- Aproximacions

- Si $E_F < E_C - 3KT$

$$F_{1/2}(\eta_C) \approx \frac{\sqrt{\pi}}{2} e^{(E_F - E_C)/KT}$$

- Si $E_F > E_V + 3KT$

$$F_{1/2}(\eta_V) \approx \frac{\sqrt{\pi}}{2} e^{(E_V - E_F)/KT}$$

- Per tant si $E_V + 3KT < E_F < E_C - 3KT$

$$n = N_C e^{(E_F - E_C)/KT}$$

$$p = N_V e^{(E_V - E_F)/KT}$$

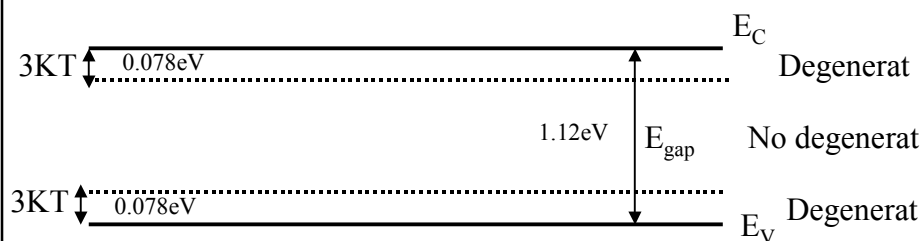
- En termes de E_i (energia de Fermi a un intrínsec)

$$n = n_i e^{\frac{E_F - E_i}{KT}}$$

$$p = n_i e^{\frac{E_i - E_F}{KT}}$$

5. Concentració de portadors en equilibri

- Sempre aproximació de semiconductor no degenerat



5. Concentració de portadors en equilibri

- Llei d'acció de masses

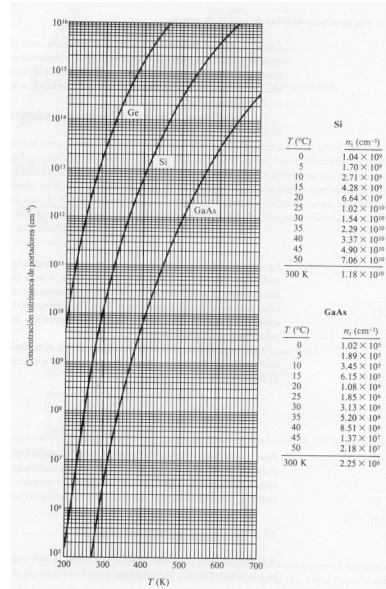
- Operant

$$n_i = \sqrt{N_C N_V} e^{\frac{-E_{gap}}{2KT}}$$

- Llei d'acció de masses:

- El producte de les concentracions de portadors és igual al quadrat de la concentració intrínseca

$$n \cdot p = n_i^2$$



5. Concentració de portadors en equilibri

- Equació de neutralitat de càrrega

- Càrrega a un cristall, en equilibri nul·la

$$\frac{\text{càrrega}}{\text{cm}^3} = qp - qn + qN_D^+ - qN_A^- = 0$$

forats

electrons

Nuclis d'àtoms
de fósfor ionitzats

Nuclis d'àtoms
de Bor ionitzats

$$p - n + N_D^+ - N_A^- = 0$$

- A T ambient totes les impureses ionitzades, per tant:

$$p - n + N_D - N_A = 0$$

5. Concentració de portadors en equilibri

- Càlcul de la concentració de portadors
 - Semiconductors uniformement dopat i no degenerats
 - Condicions d'equilibri i ionització total a T ambient

$$\left. \begin{array}{l} n \cdot p = n_i^2 \\ p - n + N_D - N_A = 0 \end{array} \right\} \rightarrow \begin{array}{l} n = \frac{N_D - N_A}{2} + \sqrt{\left(\frac{N_D - N_A}{2}\right)^2 + n_i^2} \\ p = \frac{N_A - N_D}{2} + \sqrt{\left(\frac{N_A - N_D}{2}\right)^2 + n_i^2} \end{array}$$

5. Concentració de portadors en equilibri

$$n = \frac{N_D - N_A}{2} + \sqrt{\left(\frac{N_D - N_A}{2}\right)^2 + n_i^2} \quad p = \frac{N_A - N_D}{2} + \sqrt{\left(\frac{N_A - N_D}{2}\right)^2 + n_i^2}$$

• Aproximacions

- Semiconductor intrínsec $n=p=n_i$
- Semiconductor dopat tipus N
 - $N_D \gg N_A$ i $N_D \gg n_i$

$$n = N_D \quad i \quad p = \frac{n_i^2}{N_D}$$

- Semiconductor dopat tipus P
 - $N_A \gg N_D$ i $N_A \gg n_i$

$$p = N_A \quad i \quad n = \frac{n_i^2}{N_A}$$

5. Concentració de portadors en equilibri

- Determinació de E_F a semiconductors no degenerats
 - Semiconductor intrínsec

$$E_i = \frac{E_C + E_V}{2} + \frac{3KT}{4} \ln\left(\frac{m_p}{m_n}\right)$$

- Semiconductors dopats

- Tipus N

$$E_F - E_i = KT \ln\left(\frac{N_D}{n_i}\right)$$

$N_D \uparrow$

$E_F \uparrow$

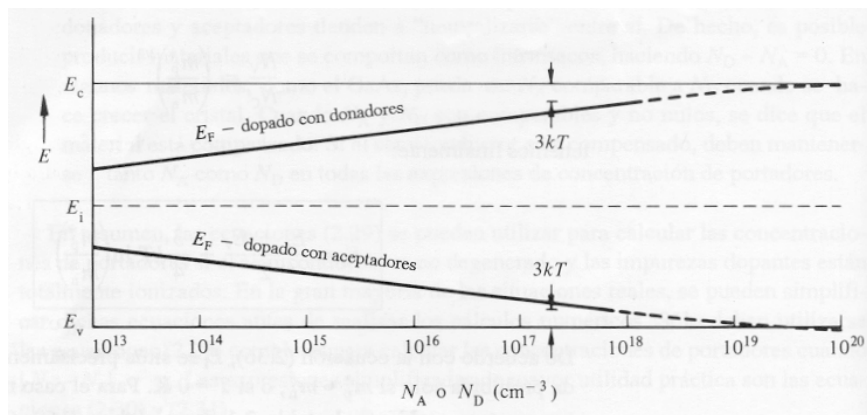
- Tipus P

$$E_i - E_F = KT \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right)$$

$N_A \uparrow$

$E_F \downarrow$

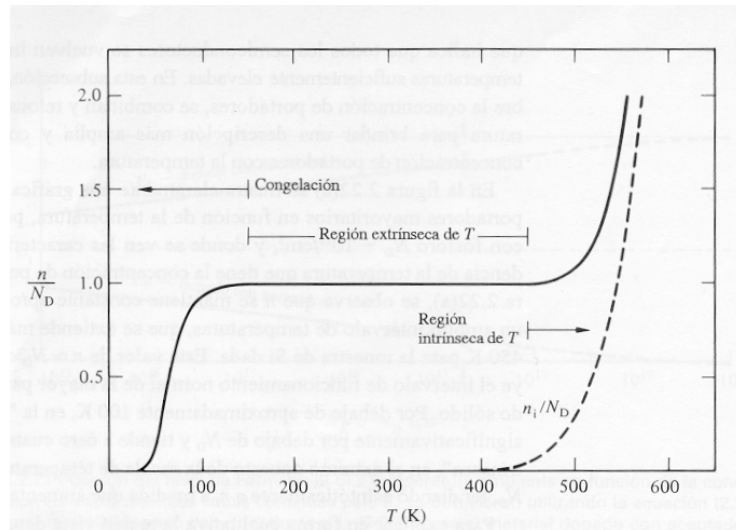
5. Concentració de portadors en equilibri



- A partir d'una concentració de dopat
passam a Silici degenerat (Exercici)
 - $N_D < 1.6 \cdot 10^{18} / \text{cm}^3$ i $N_A < 9.1 \cdot 10^{17} / \text{cm}^3$

5. Concentració de portadors en equilibri

- Dependència concentració de portadors amb T



5. Concentració de portadors en equilibri

- Dependència concentració de portadors amb T

