

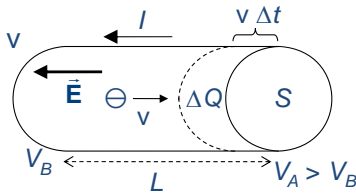
Resistència i resistivitat

Si a un cable conductor de longitud L i secció d'àrea S

li apliquem una ddp $V = V_A - V_B = EL$

els e^- es mouen amb velocitat mitjana constant v

i circula $I = \Delta Q / \Delta t$



Volum del cable (cilíndric) = SL

$N \equiv$ nombre de portadors de càrrega (e^-)

$n = N / \text{Volum} \equiv$ **densitat de portadors** (propietat de cada material)

$\mu \equiv$ **mobilitat** = propietat de cada material tal que $v = \mu E$

$$\Delta Q = (nSv\Delta t)e \rightarrow I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = nevS = ne\mu ES$$

$$R = \frac{V}{I} = \frac{EL}{ne\mu ES} = \frac{1}{ne\mu} \frac{L}{S} = \rho \frac{L}{S}$$

$$\rho = \frac{1}{ne\mu} \equiv \text{resistivitat del material}$$

Resistivitat en funció de la temperatura

Resistència $R = \rho L / S$ on $\rho \equiv$ resistivitat ; $L \equiv$ longitud ; $S \equiv$ àrea

Resistivitat $\rho = 1 / (ne\mu)$ on $n \equiv$ densitat de portadors de càrrega

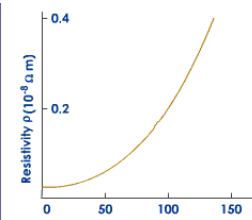
$$e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$$

Conductivitat $\sigma = 1 / \rho = ne\mu$

$\mu \equiv$ mobilitat

Conductors metàl·lics

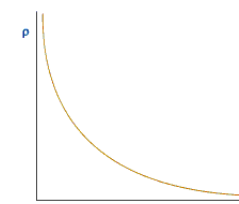
$\rho \sim 10^{-8} \Omega \text{cm}$
perquè $n \sim 10^{22} \text{cm}^{-3}$



ρ augmenta amb T
perquè μ disminueix

Semiconductors

$10^{-5} \sim \rho \sim 10^3 \Omega \text{cm}$
perquè $n \sim 10^{14} \text{cm}^{-3}$



ρ disminueix amb T
perquè n augmenta

Aïllants o dielèctrics

$10^8 \sim \rho \sim 10^{16} \Omega \text{cm}$
perquè n molt petita

Alguns dielèctrics a T altes poden arribar a conduir abans de fondre

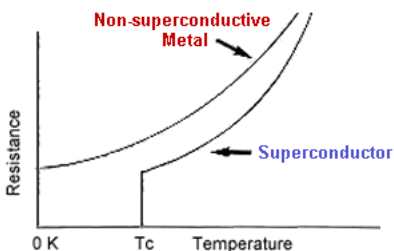
Si apliquem $E > E_{\text{Max}}$ (ruptura del dielèctric) poden conduir

No es pot explicar el comportament de $\rho(T)$ amb la física clàssica.
Cal fer-ho amb la física quàntica, com farem a les properes transparències.

Superconductors

Per $T < T_c$, la resistivitat ρ és nul·la

$$T(\text{K}) = 273.15 \text{ K} + T(^{\circ}\text{C})$$



Material	Type	$T_c(\text{K})$	$T_c(^{\circ}\text{C})$	any
Zinc	metall	0.88	-272.3	
Alumini	metall	1.19	-272.0	
Plom	metall	3.72	-269.4	
Mercuri (Hg)	metall	4.15	-269.0	1911
Niobi (Nb)	metall	9.2	-264.0	
NbGe	aleació	23.2	-250.0	1978
YBa ₂ Cu ₃ O ₇	ceramic	90	-183.1	1986
TlBaCaCuO	ceramic	125	-148.1	1993

77 K (N₂ líquid)

Efecte Meisner: Si un imant s'apropa a un superconductor, es repel·leixen. El superconductor expulsa el camp magnètic.



Levitació magnètica d'un superconductor

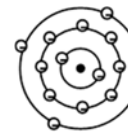
<http://www.youtube.com/watch?v=nWTSzBWEsms>

Tren superconductor de levitació magnètica

<http://www.youtube.com/watch?v=ybOHPLVzeMU&feature=related>

Estructura electrònica de la matèria

Model atòmic de Bohr:



- Els e^- descriuen òrbites amb energia E constant.
- L'energia E és quantitzada: només són possibles òrbites amb uns certs valors d' E .

Física quàntica (Heisenberg i Schrödinger):

Només sabem la probabilitat de trobar e^- més o menys a prop del nucli.

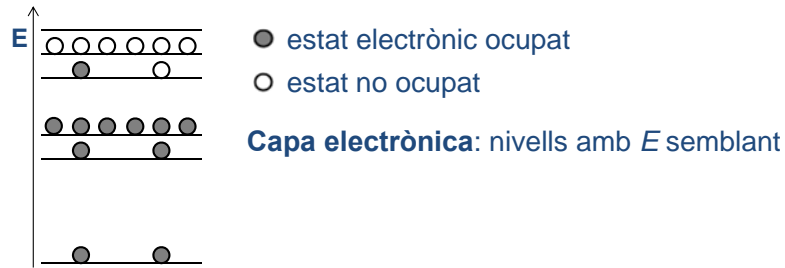
Orbitals o estats:

- Els e^- ocupen un orbital o estat electrònic.
- Cada estat electrònic té un cert valor de E .
- En un àtom són possibles tota una sèrie d'estats electrònics amb valors discrets (**quantitzats**) de E que poden estar ocupats o no.



En un àtom són possibles tota una sèrie d'estats electrònics amb valors discrets (**quantitzats**) de E que poden estar ocupats o no.

Nivells d'energia degenerats: possibles estats amb la mateixa E

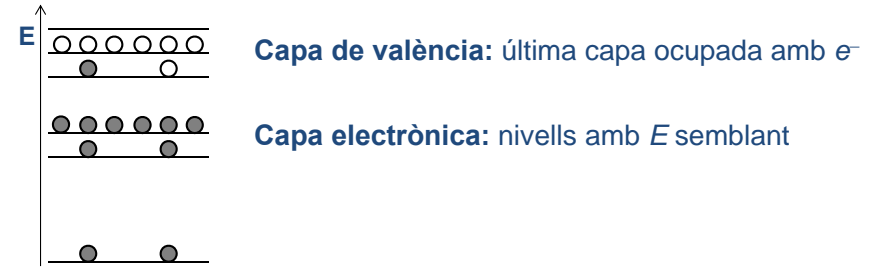


Principi d'exclusió de Pauli: un estat només pot estar ocupat per un e^-

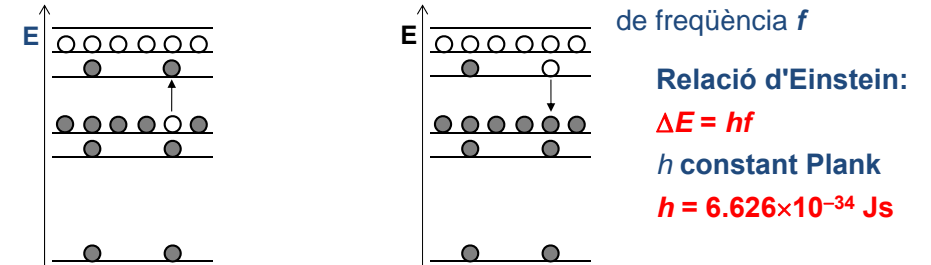
Estat atòmic fonamental: els e^- ocupen els nivells de menor energia

Capa de valència: última capa ocupada amb e^- (a l'estat fonamental)

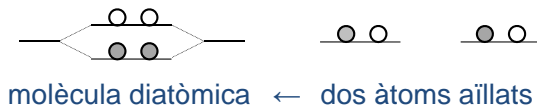
Estat atòmic fonamental



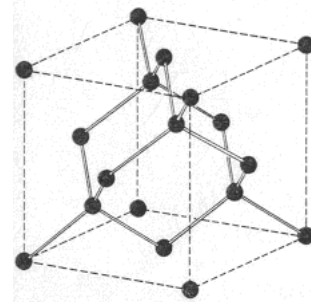
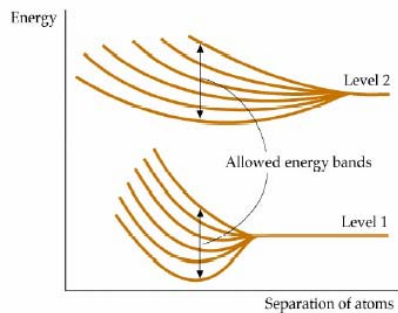
Estat excitat (no fonamental) → **Desexcitació:** emissió d'un fotó de freqüència f



Desdoblament de nivells



Aparició de bandes d'energia en un cristall

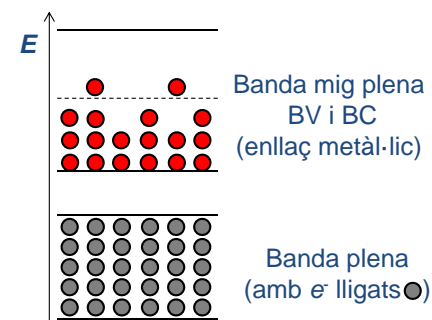


Model de conducció en cristalls

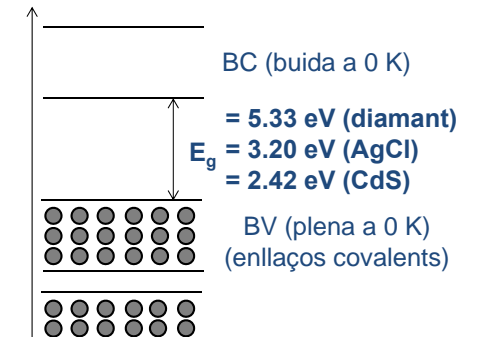
BV ≡ banda de valència: última banda amb electrons

BC ≡ banda de conducció: banda on els electrons ● poden desplaçar-se

Conductors



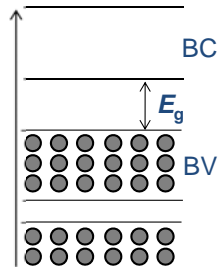
Aïllants



$$1 \text{ eV} = (1.6 \times 10^{-19} \text{ C})(1 \text{ V}) = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

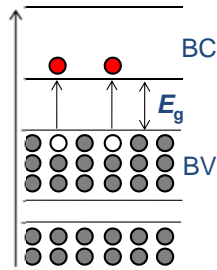
Semiconductors

$T = 0 \text{ K}$
són aïllants



Silici: $E_g = 1.14 \text{ eV}$
Germani: $E_g = 0.67 \text{ eV}$
Teluri: $E_g = 0.33 \text{ eV}$

$T > 0 \text{ K}$
poden conduir

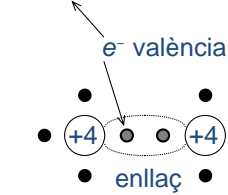


Formació de parells electró-forat

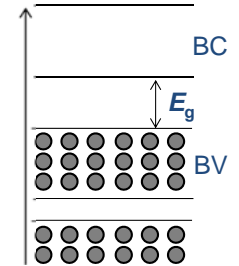
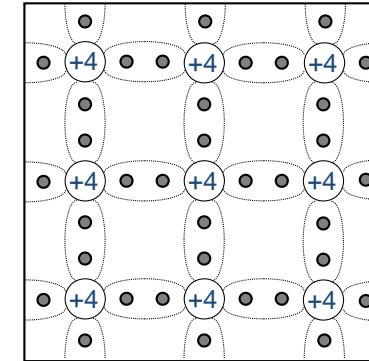
● electrons (lliures) ○ forats
Quan més petit és E_g ,
més fàcil és que puguin conduir.

Cristalls semiconductors

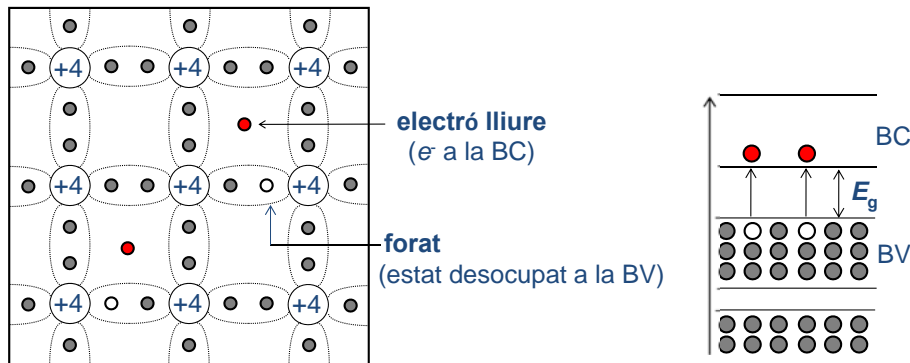
àtom neutre
amb 4 e^- de valència
com el silici (Si) o
el germani (Ge)



$T = 0 \text{ K}$ (són aïllants)



$T > 0 \text{ K} \rightarrow$ Es formen **parells electró-forat** (que augmenten amb T)

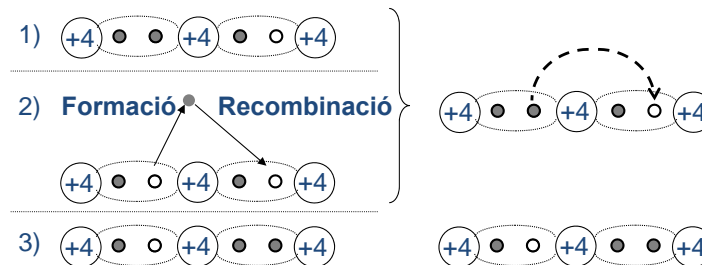


electrons de conducció o lliures ●: poden desplaçar-se pel cristall i
en presència d'un camp E produeixen un corrent

Els forats ○ **també contribueixen al corrent !!!**

Contribució dels forats al corrent

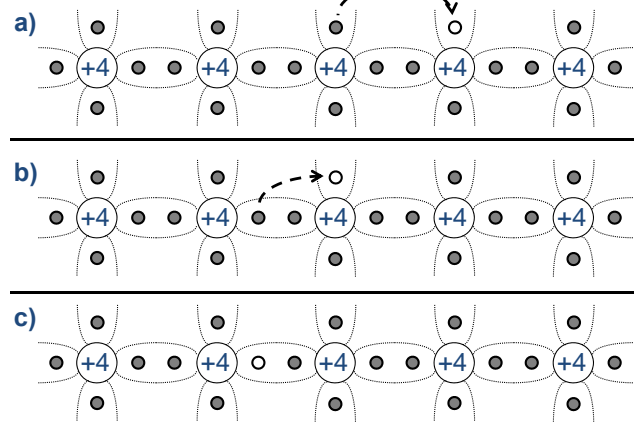
Hi ha un procés dinàmic de **formació i recombinació de parells** on els electrons lligats (no els lliures) salten a un forat,



i els forats canvien de lloc.

En presència d'un camp E els forats produeixen un corrent.

En presència d'un camp E ←



els forats es comporten com una càrrega positiva.

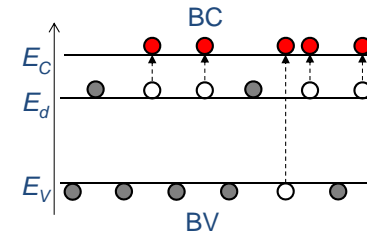
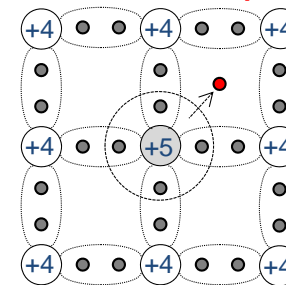
En els semiconductors hi ha dos tipus de portadors de càrrega:

- $n_n \equiv$ densitat d'electrons lliures $\rightarrow I_n = n_n e v_{dn} A$
- $n_p \equiv$ densitat de forats $\rightarrow I_p = n_p e v_{dp} A \rightarrow I = I_n + I_p$

Semiconductors intrínsecs \equiv purs, amb un sol tipus d'àtom ($n_n = n_p$)

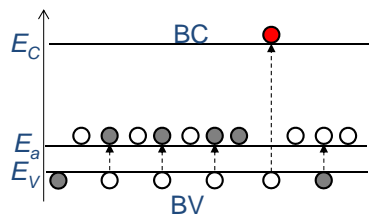
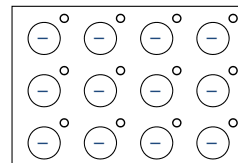
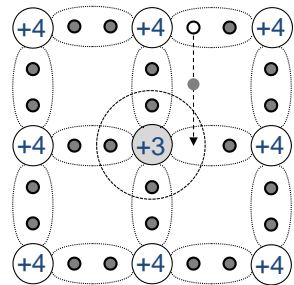
Semiconductors extrínsecs \equiv dopats amb impureses poden ser de tipus n o tipus p

- **Semiconductors tipus n:** dopats amb **àtoms donadors** amb 5 e^- de valència com el fòsfor (P) o l'arsènic (As)
forats \rightarrow portadors minoritaris
 e^- conducció \rightarrow portadors majoritaris



Pràcticament tots els àtoms donadors aporten un electró a BC.

- **Semiconductors tipus p:** dopats amb **àtoms acceptadors** amb 3 e^- de valència com el gali (Ga), l'indi (In) o l'alumini (Al)
 e^- conducció \rightarrow portadors minoritaris
forats \rightarrow portadors majoritaris



Pràcticament tots els àtoms acceptadors aporten un forat.

Enllaços a vídeos resum

- **Semiconductors: 3D Animation**
<http://www.youtube.com/watch?v=MCe1JXaLEwQ&feature=fvw>
- **Semiconductores**
<http://www.youtube.com/watch?v=t3RhM3FNB0w>
- **Introducción a los Semiconductores**
<http://www.youtube.com/watch?v=rm8V7aBWvXM&feature=related>
- **From sand to chip - How a CPU is made**
<http://www.youtube.com/watch?v=-GQmtITMdas&feature=related>