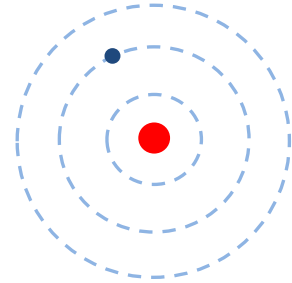


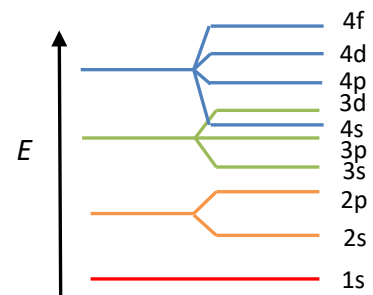
3.1 Estructura electrònica dels àtoms (1/2 h) (en realitat 1h)

electrons { Els **àtoms** estan formats per un **nucli** amb **Z protons** (partícules de càrrega positiva) i **electrons** (partícules carregades negativament i 1800 vegades més lleugeres que els protons) a fi de mantenir la **neutralitat elèctrica**.

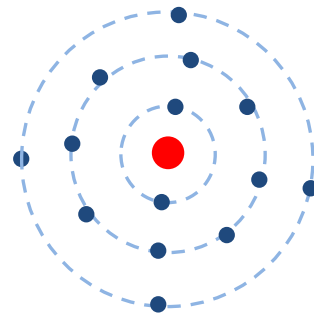
Nivells { Com a resultat de les forces electromagnètiques entre totes les partícules la **teoria quàntica** prediu que els electrons es disposen al voltant del nucli de manera que la seva energia **està quantitzada**. El model de Bohr (1913) en dona una imatge senzilla d'aquest concepte pel cas del àtom d'hidrogen (format només per un protó i un electró). Segons el model, l'electró només es pot moure en determinades òrbites estacionàries, i a cada una d'elles li correspon un determinat valor o nivell d'energia. Els valors més negatius corresponen a òrbites amb radis més petits.



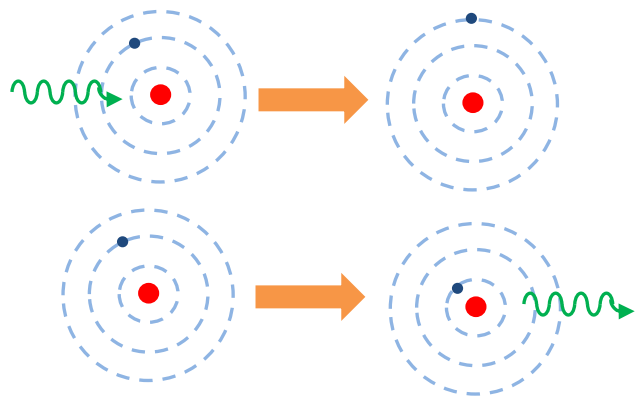
Capes { Per qualsevol àtom els **electrons** ocupen els diferents **nivells d'energia** obeit determinades regles derivades de la teoria quàntica. Els **nivells d'energia semblants s'agrupen en capes**, on només pot haver un **nombre discret d'electrons**: a la primera capa 2, a la segona 8, a la tercera 18, etc. Les capes més internes corresponen als electrons més propers al nucli. Les més externes corresponen a energies més altes, i per tant, als electrons més allunyats del nucli.



Capa de valència { La capa d'energia **més elevada que conté electrons** s'anomena **capa de valència**. L'estat d'ocupació d'aquesta capa determina si l'àtom s'associarà o no amb d'altres per formar **molècules i cristalls**.



Emissió { Un àtom **emet o absorbeix radiació** (1 fotó o corpuscle de llum) quan un electró experimenta una **transició** entre dos nivells d'energia. Quan un electró passa d'un estat **d'energia a un d'inferior** l'àtom es **desexcita i emet un fotó**, mentre que en cas **contrari** l'àtom **s'excita i absorbeix un fotó**. La **frequència ν** i la **longitud d'ona λ** de la radiació es calculen a partir de la diferència d'energia ΔE entre ambdós nivells:



$$\nu = \frac{\Delta E}{h} \rightarrow \lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{hc}{\Delta E}$$

on $h = 6.626 \cdot 10^{-34}$ J.s és la **constant de Planck** i c la **velocitat de la llum** al buit.

3.2 Teoria de la conducció: metalls, aïllants i semiconductors (1/2 h) (en realitat 1h30')

Segons el valor de la **conductivitat elèctrica** (que expressem en S/m, on $1 \text{ S} = 1\Omega^{-1}$) els materials es classifiquen en:

Conductors	Material	Conductivitat (S/m)	Tipus
Aïllants	Ag	$6.2 \cdot 10^7$	Conductors
	Cu	$5.9 \cdot 10^7$	
Semi-conductors	Ge	2.2	Semiconductors
	Si	$1.6 \cdot 10^{-3}$	
	Vidre	10^{-12}	Aïllants
	Quars (SiO_2)	10^{-17}	

Desdoblament

Quan s'apropen **dos àtoms idèntics** (exemple H) per formar una **molècula diatòmica** (H_2), cada nivell d'energia es desdobra en **dos subnivells** d'energies semblants.

Bandes

Pel cas d'un cristall amb **N àtoms** (10^{23}) cada nivell es desdobra en **N subnivells**. Per tant, hi haurà 10^{23} subnivells amb una diferència energètica entre ells de 10^{-23} eV ($1 \text{ eV} = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$), que es pot interpretar com una distribució contínua de nivells d'energia, que anomenarem **banda**. Per tant, **cada nivell d'energia de l'àtom individual dona lloc a una banda d'energia**.

Les **propietats conductores** dels materials venen determinades per:

BV i BC

- Si la **darrera banda** que conté electrons (que generalment correspon a la capa de valència), i que s'anomena **banda de valència (BV)**, està **totalment plena**.
- La **diferència d'energia**, també anomenada **banda prohibida** o **GAP** entre la BV i la primera banda sense electrons, que s'anomena **banda de conducció (BC)**.

Electrons lliures

Bandes buides

Banda de conducció

GAP

Banda de valència

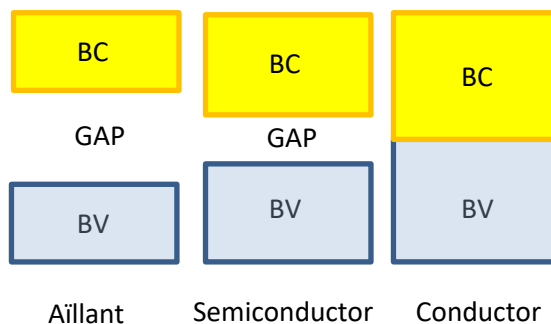
Bandes ocupades

Conductors

Els **materials conductors** tenen les dues bandes solapades. De forma que a l'aplicar un **camp elèctric** els electrons s'acceleren, augmenten la seva energia cinètica, i per tant **ocupen els nivells d'energia de la BC**. La conducció s'interpreta com la capacitat dels electrons per **ocupar** els diferents nivells de la BC.

Aïllants

A 0 K els **aïllants** tenen la **BV totalment plena** i la **BC totalment buida**. El **GAP** és de **5-10 eV** (pel quars 8 eV). Com l'energia tèrmica a 300 K és aproximadament $k_B T = 0.026$ eV ($k_B = 1.38065 \cdot 10^{-23}$ J/K) hi haurà molt pocs electrons (si n'hi ha) que passin de la BV a la BC, i per tant hi haurà una molt baixa conducció.

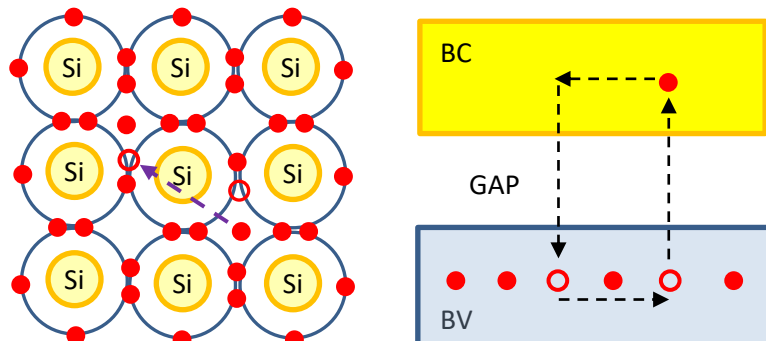
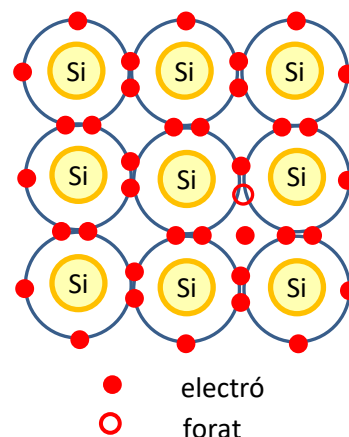


SC

A 0 K els **semiconductors** també tenen la **BV totalment plena** i la **BC totalment buida**. En canvi, el **GAP** és de **0.5-2 eV** (pel Ge 0.67 eV i pel Si 1.12 eV). En aquest cas la conducció és una mica més probable.

Forats

Pels **semiconductors** com Ge o Si cada àtom està unit a 4 més mitjançant **enllaços covalents**. Quan un **electró** passa de la **BV a la BC** es trenca parcialment un enllaç, quedant l'electró lliure. Per tant, a la **BV** es crea una absència d'electró, que anomenem **forat**. En poc temps (entre 1 ms i 1 μ s) l'electró es recombina amb aquest o un altre forat. Per tant, la conducció en un **semiconductor** s'interpreta com **mobilitat d'electrons** (als diferents nivells buits) **que hi ha a la BC i de forats a la BV** (ja que hi haurà electrons de nivells inferiors d'aquesta banda que aniran ocupant aquests forats).



SC

intrín-
secs

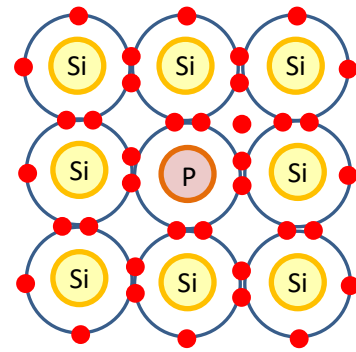
Els **semiconductors** pels que el nombre d'**electrons** és **igual** al de **forats** s'anomenen **intrínsecs**.

La **densitat electrònica** dels **semiconductors intrínsecs** és **molt menor** que la dels **conductors**:

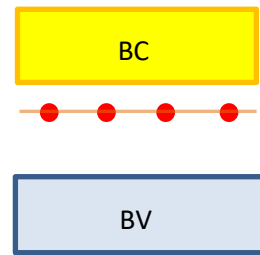
Material	Densitat electrònica
Cu	$8.4 \cdot 10^{22}$ elec/cm ³
Ge	$6 \cdot 10^{13}$ elec/cm ³
Si	$7 \cdot 10^9$ elec/cm ³

SC
extrín-
secs
tipus n

Per augmentar-la se segueix un procés de **dopatge**, consistent en substituir alguns àtoms per **impureses** (àtoms de mida semblant i valència diferent). Així, si se substitueix un àtom de Ge o Si (**valència 4**) per un de **valència 5** (P-Fòsfor, As-Arsènic, Sb-Antimoni), a la capa de valència hi haurà un **electró de més**, que estarà feblement lligat al seu àtom i que per efecte tèrmic serà **lliure**, quedant l'àtom d'**impuresa ionitzat positivament**.



Des del punt de vista de la **teoria de bandes** s'interpreta com que a prop de la **BC** apareix un conjunt de nivells energètics que **donen electrons** (tants nivells com àtoms d'impureses). Les **impureses** s'anomena **donadores**, i el material es diu **semiconductor extrínsec tipus n**. En aquest cas hi ha **més electrons que forats** i el corrent és **majoritàriament** degut a **electrons**, essent per tant, els **forats portadors minoritaris**.



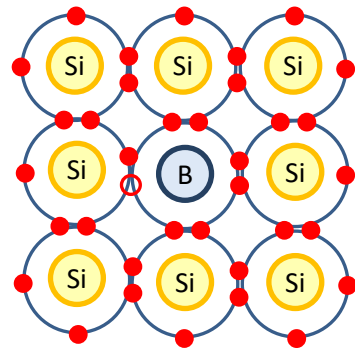
La diferència d'energia entre els nivells donadors i la BC pel cas de Si dopat amb P és 0.045 eV, amb As 0.049 eV i amb Sb 0.039 eV. Com l'energia cinètica d'un electró a 300 K és de 0.026 eV, hi haurà molts més electrons ara que pel cas del Si pur (densitat 2.33 g/cm³ i massa atòmica 28 g/mol). Així, si el nivell de dopat és d'1 àtom per cada 10⁷, el nombre d'electrons lliures serà:

$$\rho_{dopat} = 2.33 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \cdot \frac{1 \text{ mol}}{28 \text{ g}} \cdot \frac{6.022 \times 10^{23} \text{ atoms}}{\text{mol}} \cdot \frac{1 \text{ elect}}{10^7 \text{ atoms}} = 5 \times 10^{15} \text{ elect/cm}^3$$

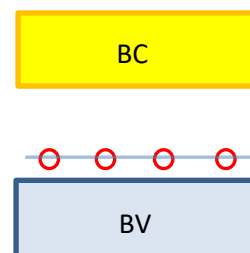
Aquesta densitat electrònica és sis ordres de magnitud superior a la del Si pur ($7 \times 10^9 \text{ elect/cm}^3$).

SC
extrín-
secs
tipus p

Si se substitueix un àtom de Ge o Si (de **valència 4**) per un de **valència 3** (B-Bor, Al-Alumini, Ga-Gal·li), a la darrera capa hi faltará un **electró**, i per tant tindrem un **forat de més**. Quan un electró l'ocupi l'àtom d'**impuresa**, quedarà **ionitzat negativament**.



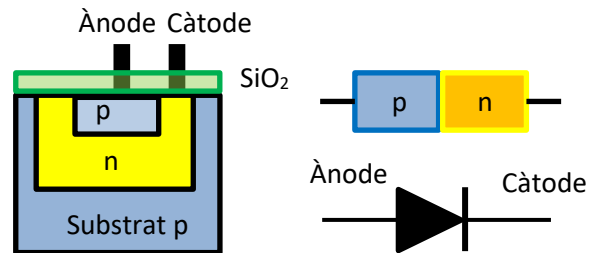
Des del punt de vista de la **teoria de bandes** s'interpreta que prop de la **BV** apareix un conjunt de nivells energètics que **accepten electrons**. Les **impureses** s'anomena **acceptores**, i el material es diu **semiconductor extrínsec tipus p**. En aquest cas hi ha **més forats que electrons** i el corrent és **majoritàriament** causat per **forats**, essent per tant, els **electrons portadors minoritaris**.



La diferència d'energia entre els nivells acceptors i la BV pel cas de Si dopat amb B és 0.045 eV, amb Al 0.057 eV i amb Ga 0.065 eV.

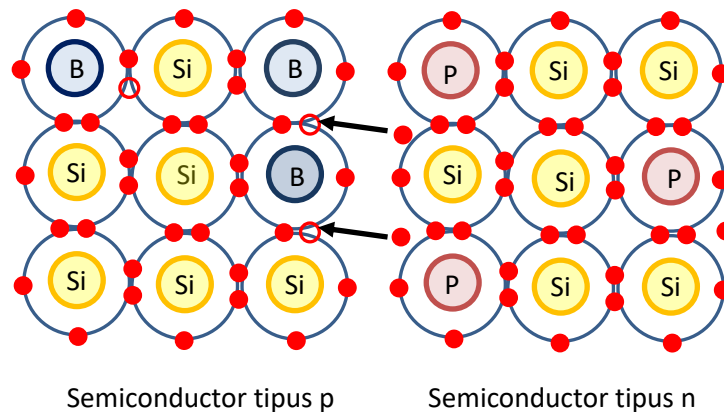
3.3 Díode d'unió p-n: rectificació de corrent i portes lògiques (5/2 h T i 1h P) (en realitat 2h15')

Consisteix en un sol cristall de **semiconductor** de Ge o Si dopat per un costat amb impureses acceptores (per tant, és un semiconductor **p**) i per l'altre amb donadores (per tant, és un semiconductor **n**).



Símbol: l'ànode o part p es representa amb una fletxa i el càtode per un segment.

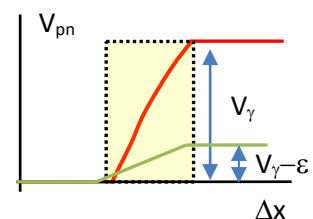
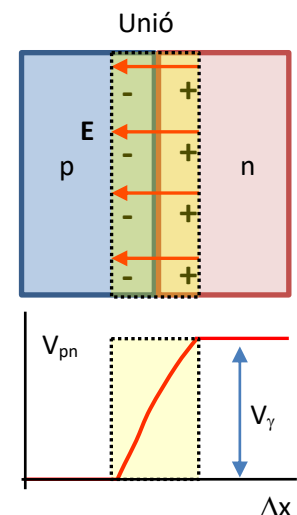
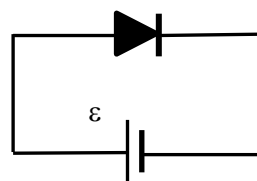
La zona on el cristall **canvia de semiconductor p a n** es diu **unió**. Al seu voltant apareix una distribució de càrrega que es crea com a resultat de la difusió d'electrons de la part n, que s'han recombinat amb forats de la part p. En fer-ho les **impureses donadores s'ionitzen positivament**, mentre que les **acceptores ho fan negativament**. Per tant, al voltant de la unió es crea un **camp elèctric** que va de la part **n** a la part **p**. Les característiques d'aquesta zona són:



1. S'anomena **zona de transició**, esgotament, buidatge o deflexió
2. La **mida** és d' $1 \mu\text{m}$.
3. El **camp** pot valdre entre 10^3 i 10^5 V/m
4. Com el camp elèctric va de la part n a la part p, es diu que la **part n està a més potencial que la p**. La diferència de potencial s'anomena **potencial de contacte** o barrera de potencial (V_γ).
5. A 300 K els valors del **potencial de contacte** pel Ge i el Si són respectivament $V_\gamma = 0.3 \text{ V}$ i $V_\gamma = 0.7 \text{ V}$.

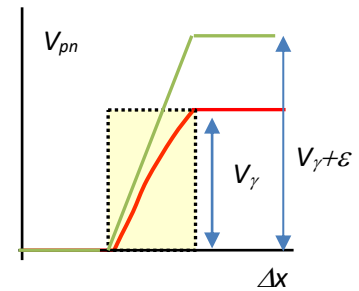
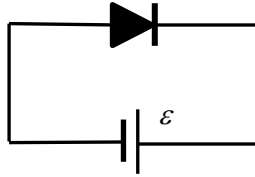
Quan un díode es connecta a una **bateria**, es diu que està **polaritzat**. Segons la connexió, el díode està en:

- **Polarització directa:** La **part p** es connecta al **pol +** de la bateria i la **part n** al **-**. D'aquesta forma es **redueix la barrera de potencial**, així com la mida de la **zona de transició**. Si el voltatge extern aplicat és V_γ la barrera es fa nul·la. Per **tensions més grans el díode condueix**,



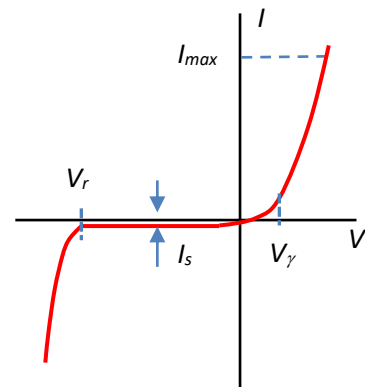
augmentant considerablement el valor de la intensitat a mida que la tensió aplicada es fa més gran.

- **Polarització inversa:** La **part p** es connecta al **pol** - de la bateria i la **part n** al **+**. D'aquesta forma la **barrera de potencial** així com la mida de la **zona de transició** augmenten, i el díode **no condueix**.



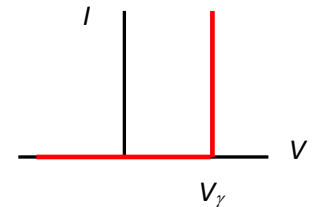
El comportament es resumeix a la **corba característica** (V, I), on cal destacar els valors:

1. V_γ - **Potencial de contacte**
2. I_{max} - **Intensitat màxima** que pot circular sense que es cremi per efecte Joule
3. I_s - **Intensitat de saturació** (1 μA). Els díodes de Si es caracteritzen per uns valors de I_s menors que els de Ge (ja que la densitat electrònica és menor), i per tant són més recomanables.
4. V_r - **Tensió de ruptura** en inversa (el díode es malmet per efecte allau) $> 50 V$.



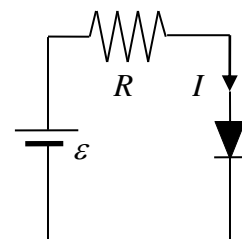
Una **aproximació** al comportament real és el del **model de díode simplificat**, pel que se suposa:

1. El díode **no condueix en polarització inversa**.
2. El díode **condueix en polarització directa** quan la **diferència de potencial** als seus extrems és més gran que V_γ . El valor de la **diferència de potencial** es manté **constant** en V_γ per qualsevol valor de la **intensitat** que circuli pel díode.



Tenint en compte aquest model, la **intensitat** que circula per un circuit sèrie format per un generador de fem ε , una resistència R i un díode en polarització directa, amb un potencial de contacte V_γ , és:

$$\varepsilon = RI + V_\gamma \rightarrow I = \frac{\varepsilon - V_\gamma}{R}$$



Aplicació 1: rectificació de corrent (conversió d'un corrent altern a un de continu)

Si es connecta un **díode** a la sortida d'un generador de corrent altern tindrem un senyal **rectificat** en **mitja ona**, ja que mentre el díode es trobi en polarització directa conduirà, mentre que en inversa no ho farà.

