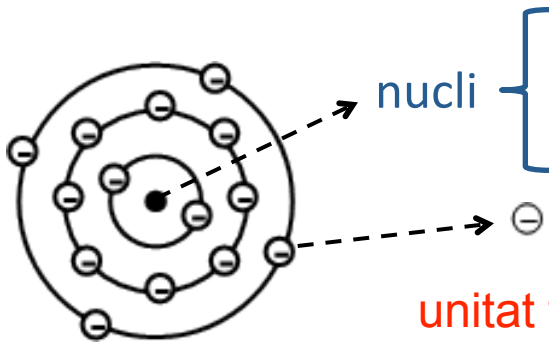




# Teoria de la Conducció en Cristalls

- **La matèria està formada per àtoms**



nucli	protons ( $p^+$ )	$m_p = 1.673 \times 10^{-27}$ kg	$q_p = e$
	neutrons ( $n^0$ )	$m_n = 1.675 \times 10^{-27}$ kg	$q_n = 0$
	electrons ( $e^-$ )	$m_e = 9.109 \times 10^{-31}$ kg	$q_e = -e$

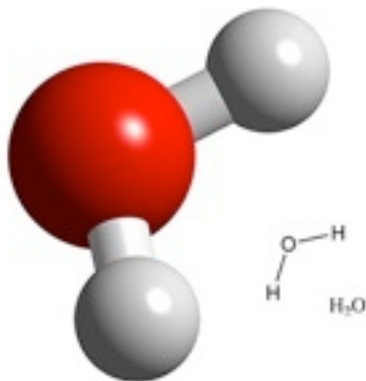
unitat fonamental de càrrega:  $e = 1.602 \times 10^{-19}$  C

La grandària dels àtoms és de l'ordre de  $10^{-10}$  m = 1Å = 1 angstrom

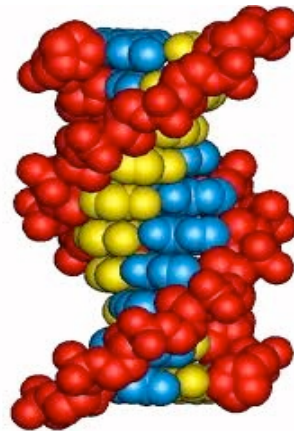
La grandària del nucli és de l'ordre de  $10^{-15}$  m = 1 fm = 1 fermi

- **Els àtoms formen molècules i cristalls**

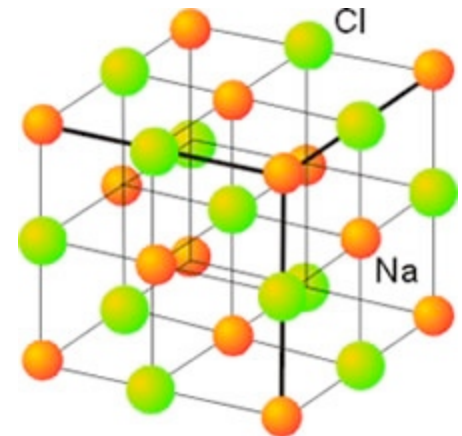
Aigua



ADN



Cristall de sal



$N_p = n^\circ$  protons ;  $N_e = n^\circ$  electrons

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

## ●La càrrega és quantitzada

àtom o molècula o cos neutre

ió  $\equiv$  àtom o molècula carregat

$$Q = N_p e - N_e e = (N_p - N_e) e$$

$$N_p = N_e \rightarrow Q = (N_p - N_e) e = 0$$

$$N_p \neq N_e \rightarrow Q = (N_p - N_e) e \neq 0$$

## ●La càrrega és conserva

Si un cos neutre perd electrons (es carrega positivament)

és perquè un altre els guanya (es carrega negativament)

## Materials conductors:

Permeten el moviment de càrrega, com per exemple els **metalls** que tenen electrons lliures (que es poden moure)

## Materials aïllants (o dielèctrics):

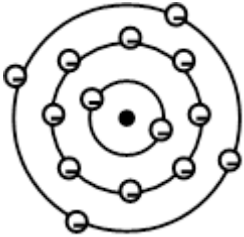
NO permeten el moviment de càrrega perquè tots els electrons estan lligats a un àtom o molècula.

Es caracteritzen per la **constant dielèctrica**  $\epsilon_r > 1$  (al buit, o a l'aire,  $\epsilon_r \approx 1$ ) i per

$E_{\text{Max}} \equiv$  **Ruptura del dielèctric**. El dielèctric pot conduir si apliquem  $E > E_{\text{Max}}$ .

# 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.

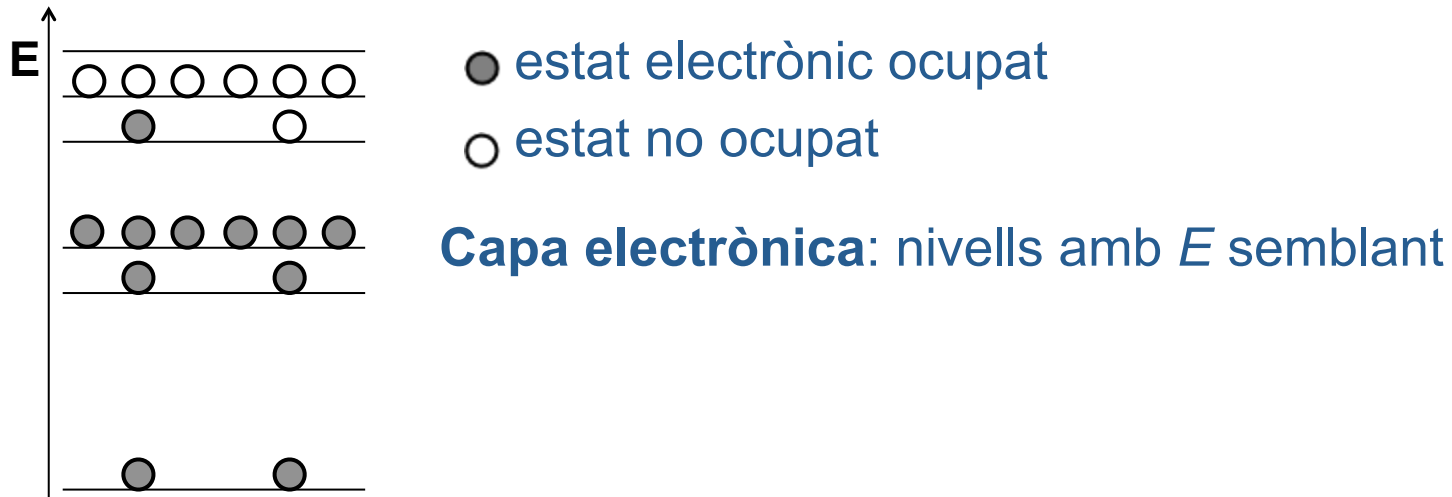
**Orbitals o estats:** - Els  $e^-$  ocupen un orbital o estat electrònic.



- 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  $E$

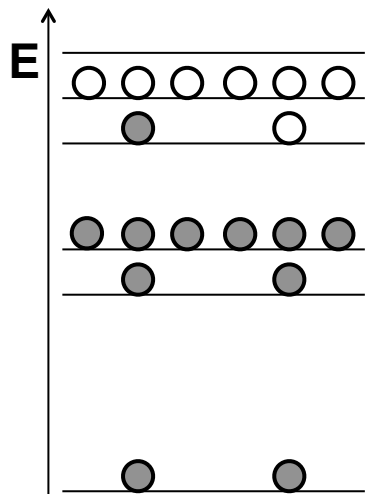


**Principi d'exclusió de Pauli:** un estat només pot estar ocupat per un  $e^-$

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

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

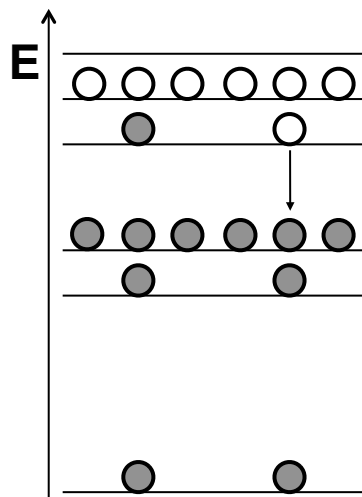
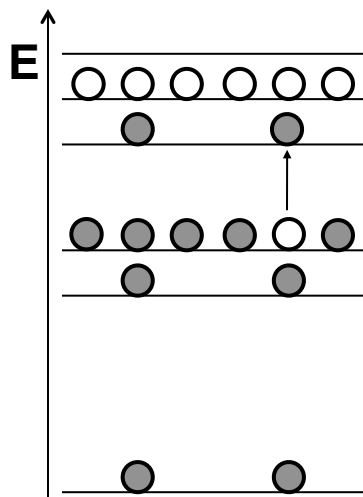
## Estat atòmic fonamental



**Capa de valència:** última capa ocupada amb  $e^-$

**Capa electrònica:** nivells amb  $E$  semblant

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



de freqüència  $f$

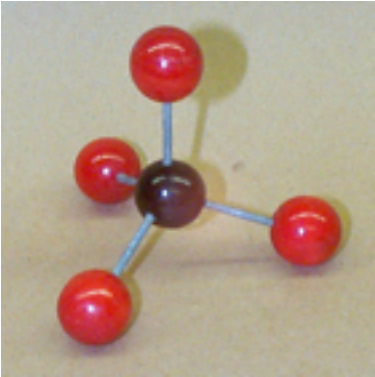
**Relació d'Einstein:**

$$\Delta E = hf$$

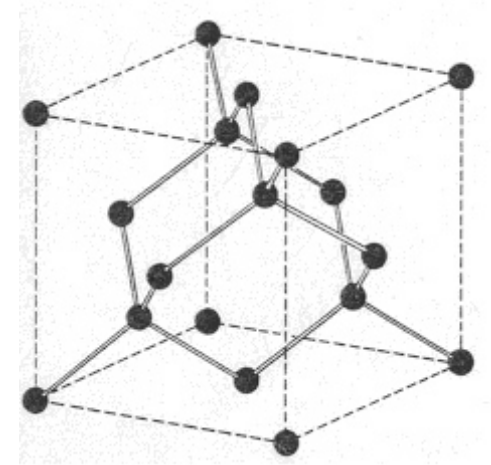
$h$  constant Plank

$$h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ Js}$$

# Aparició de bandes d'energia en un cristall

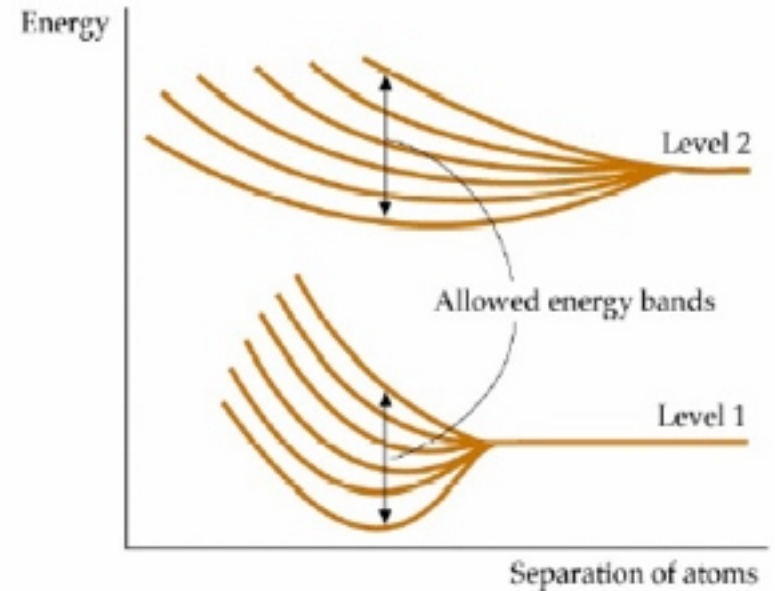
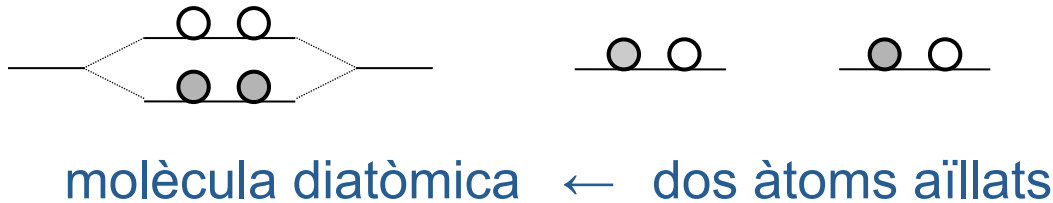


Molècula de Silici



Cristall de Silici

## Desdoblament de nivells



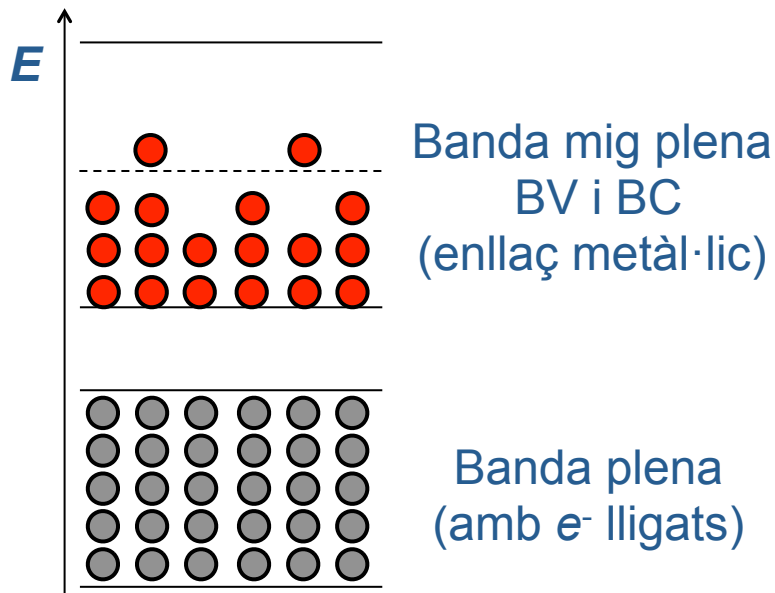
# Model de conducció en cristalls

BV  $\equiv$  banda de valència: última banda amb electrons

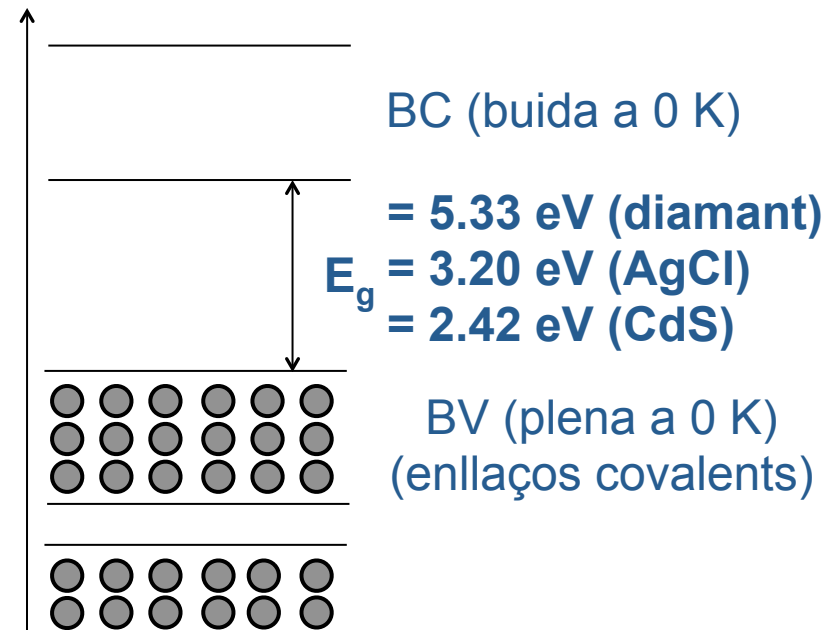
BC  $\equiv$  banda de conducció: banda on els electrons poden desplaçar-se

$E_g$  = Band Gap

## Conductors



## Aïllants ( $E_g$ Molt gran)

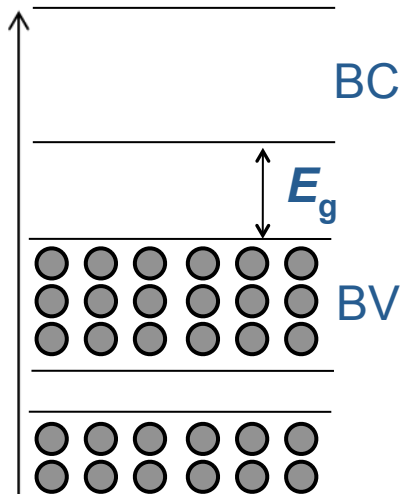


$$1 \text{ eV} = (1.6 \times 10^{-19} \text{ C})(1 \text{ V}) = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

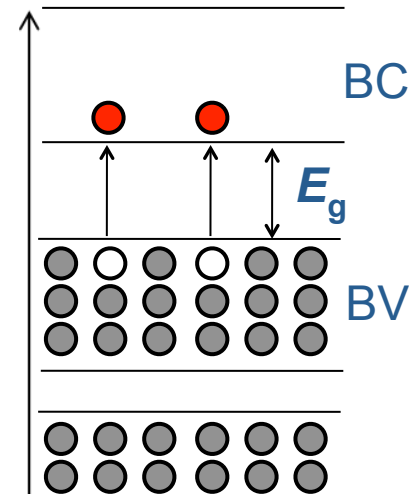


# Semiconductors ( $E_g$ Petit)

$T = 0$  K  
són aïllants



$T > 0$  K  
poden conduir



Silici:  $E_g = 1.14$  eV

Germani:  $E_g = 0.67$  eV

Teluri:  $E_g = 0.33$  eV

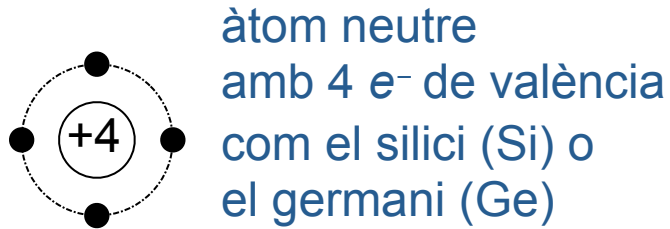
## Formació de parells electró-forat

● electrons      ○ forats

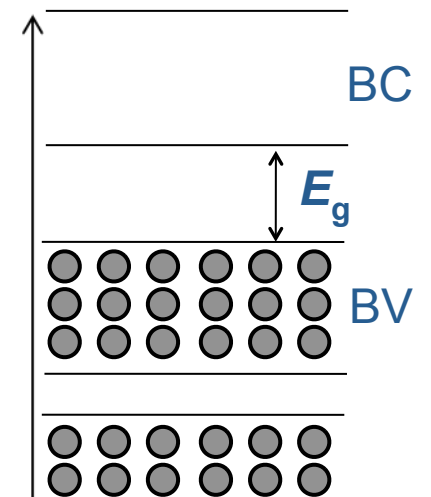
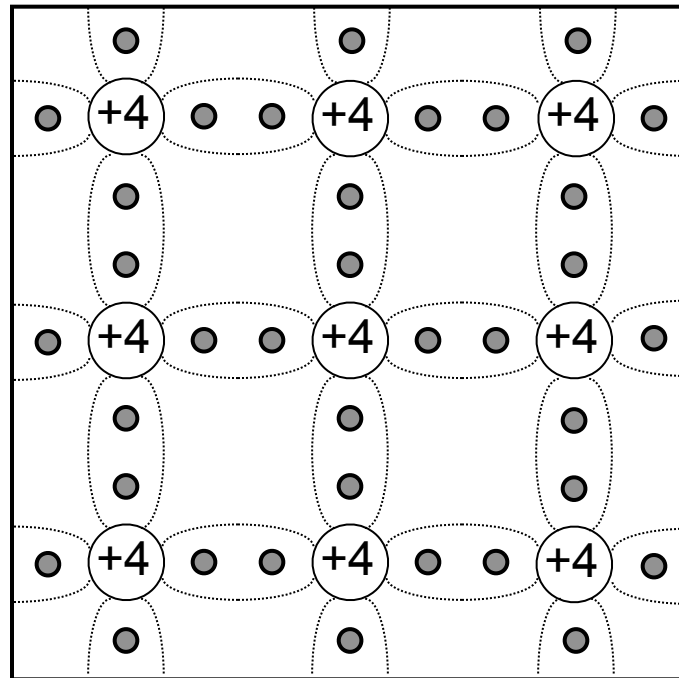
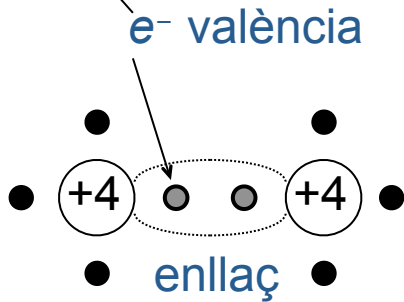
Quan més petit és  $E_g$ ,

més fàcil és que puguin conduir.

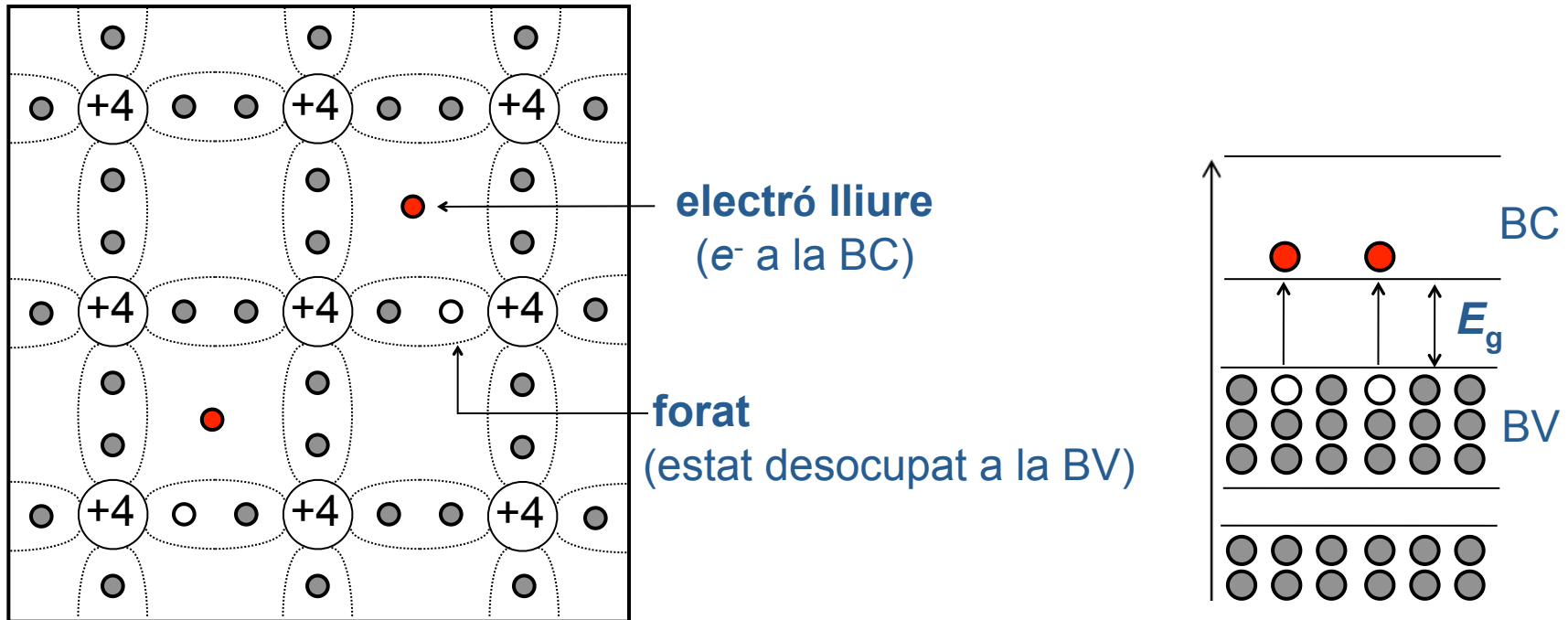
# Cristalls semiconductors



**T = 0 K (són aïllants)**



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

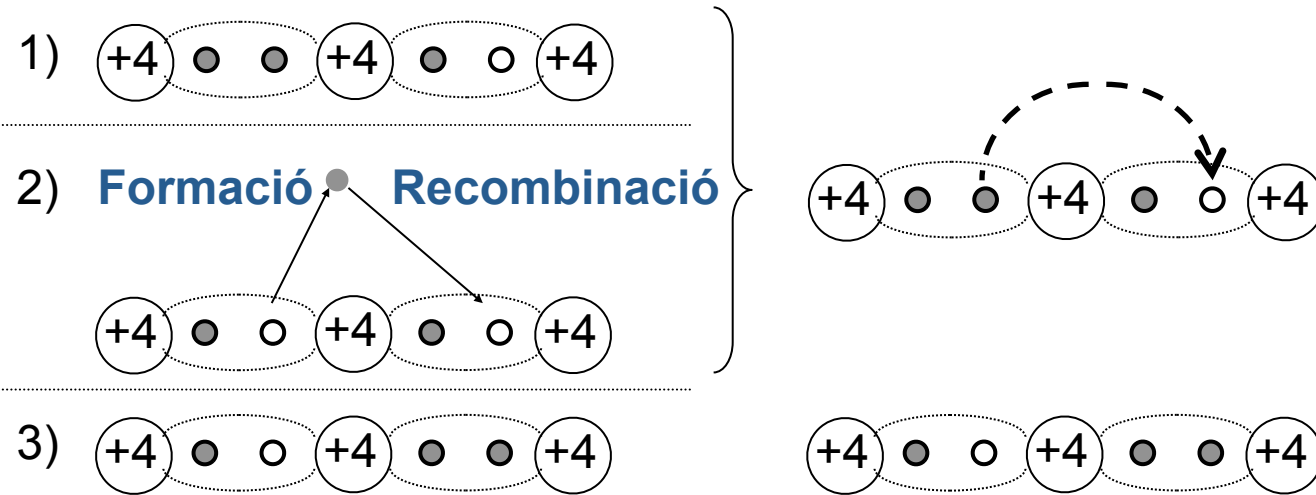


**electrons de conducció** o lliures ●: poden desplaçar-se pel cristall i en presència d'un camp  $E$  produeixen un corrent

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

## Contribució dels forats al corrent

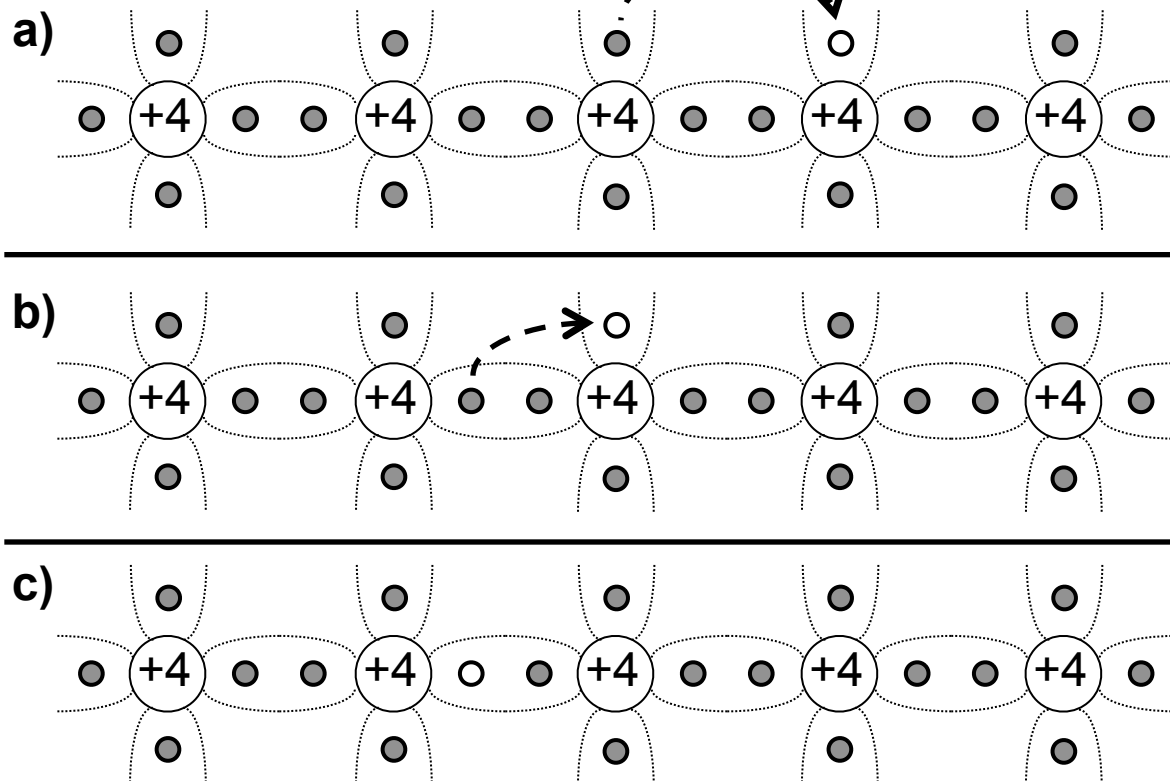
Hi ha un procés dinàmic de **formació i recombinació de parells** on els electrons lligats (no els lliures) salten a un forat,



**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**

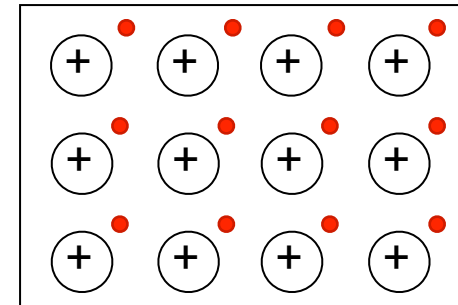
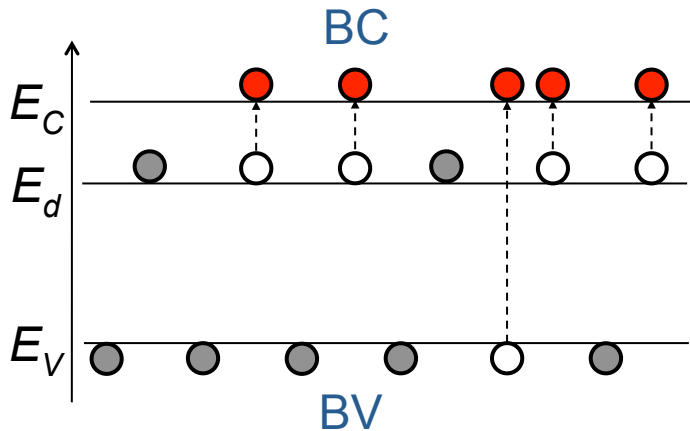
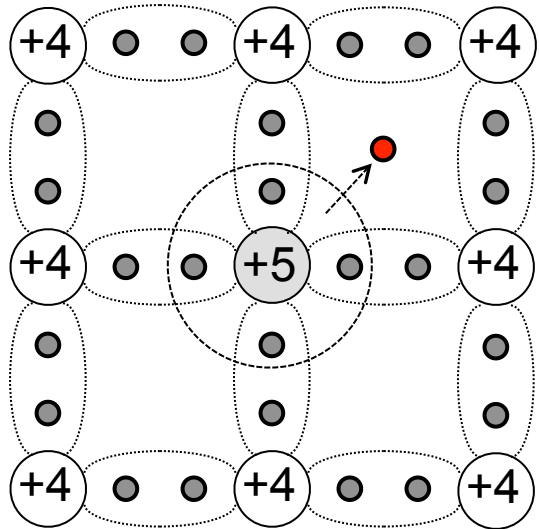
• **Semiconductors tipus n:** dopats amb **àtoms donadors**

amb 5 e<sup>-</sup> de valència

com el fòsfor (P) o l'arsènic (As)

forats  $\rightarrow$  **portadors minoritaris**

e<sup>-</sup> conducció  $\rightarrow$  **portadors majoritaris** •



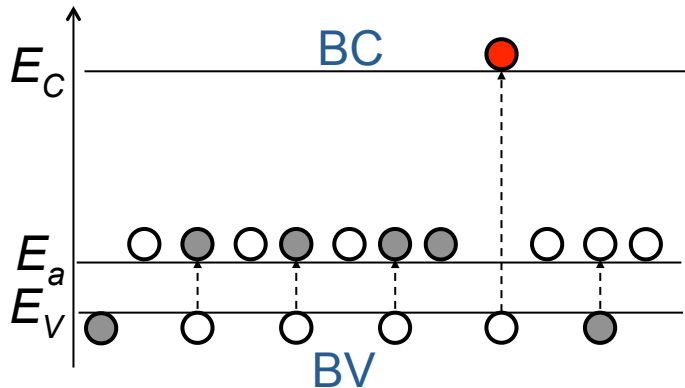
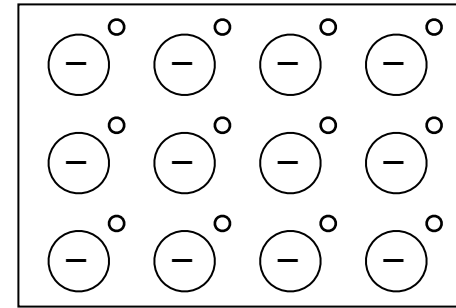
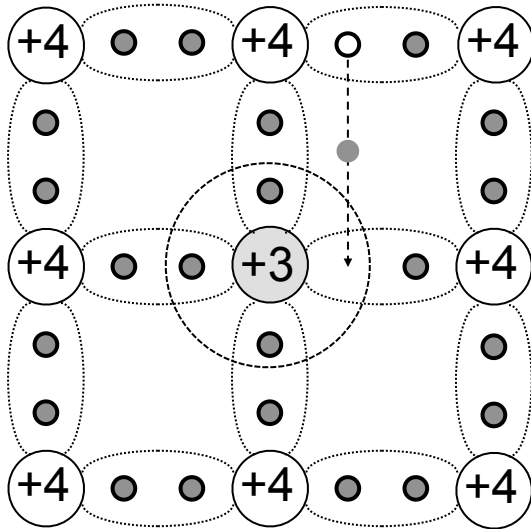
Pràcticament tots els àtoms donadors aporten un electró a BC.

- Semiconductors tipus p:**

dopats amb **àtoms acceptadors**  
amb 3 e<sup>-</sup> de valència  
com el gali (Ga), l'indi (In) o l'alumini (Al)

e<sup>-</sup> conducció → **portadors minoritaris**

**forats** → **portadors majoritaris** ○



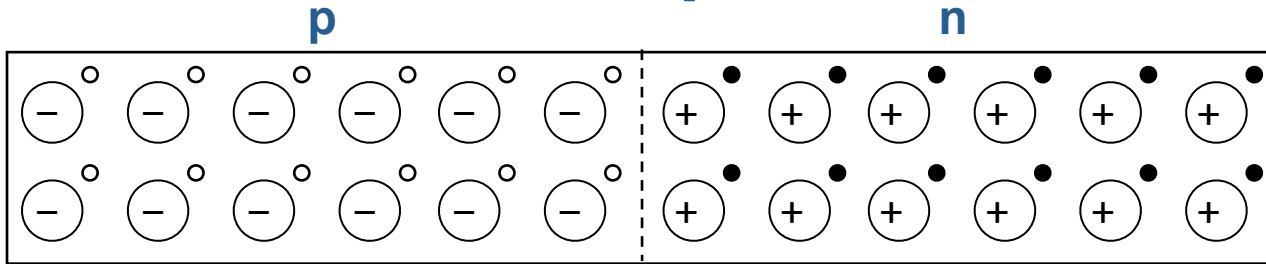
Pràcticament tots els àtoms acceptadors  
aporten un forat.



# Díodes d'unió p-n

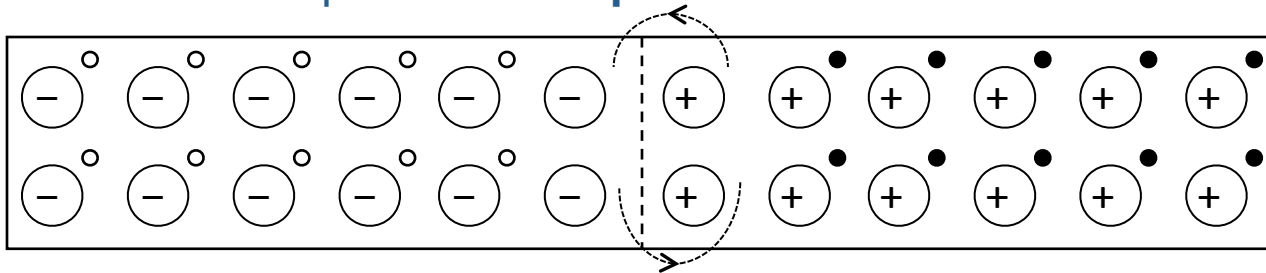


# Unió p-n



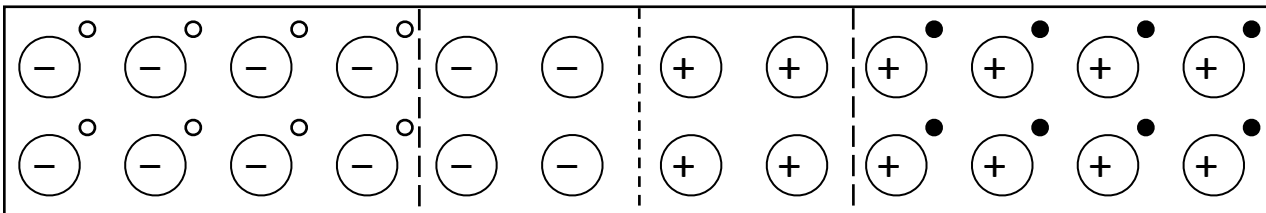
$I_d$  difusiu ( $\rightarrow$ ): els portadors majoritaris d'un costat es difonen a l'altre

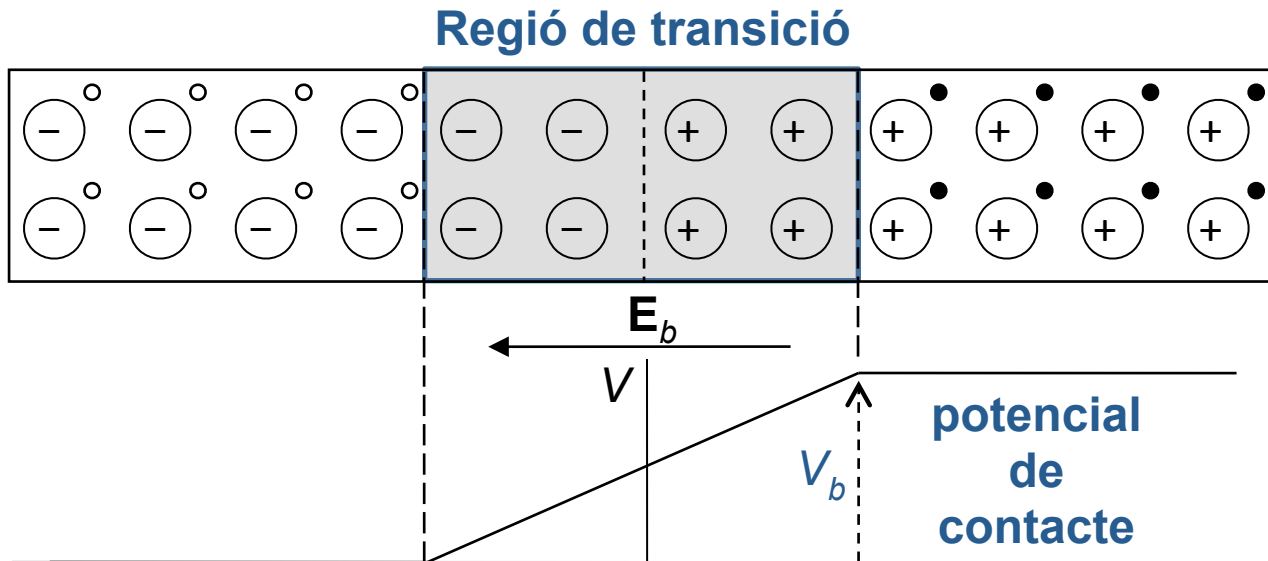
**Recombinació:** els  $e^-$  que venen de **n** es recombinen amb els forats a **p**  
els forats que venen de **p** es recombinen amb els  $e^-$  a **n**



**Regió de transició:** amb càrregues descobertes (ions  $\oplus$  sense  $e^-$  o  $\ominus$  sense forat)  
sense portadors de càrrega (**R gran** perquè  $n$  i  $\sigma = ne\mu$  petits)

## Regió de transició





$I_a$  d'arrossegament ( $\leftarrow$ ):  $E_b$  arrossega portadors minoritaris generats tèrmicament d'un costat a l'altre:  $e^-$  (de p a n) i forats (de n a p)

$I_d$  difusiu ( $\rightarrow$ ): els portadors majoritaris amb prou energia es difonen d'un costat a l'altre superant la barrera de potencial (contra el camp  $E$ ).

**Equilibri dinàmic:**  $I_d(\rightarrow) + I_a(\leftarrow) = 0$

La **regió de transició** també s'anomena **regió de deplexió** per indicar que no té càrregues lliures per conduir. **Podem pensar que es comporta com un aïllant.**

# Polarització d'un díode

Quan s'estableix una tensió externa als extrems de la unió p-n, l'amplada de la zona de transició (sense portadors) canvia, i  $V_b$  també canvia.

## Polarització inversa

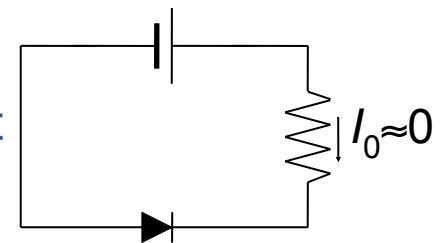
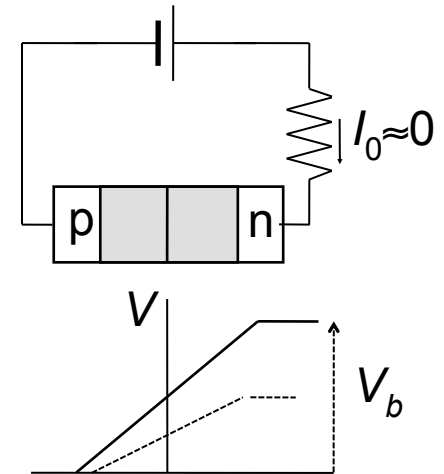
S'aplica una tensió negativa (-) a la part p.

Els  $e^-$  de n són atrets pel born (+) i s'allunyen de la unió, i els forats de p són atrets pel born (-) i s'allunyen de la unió, de manera que la regió de transició (com un aïllant) s'eixampla,  $V_b$  augmenta,

i el corrent difusiu  $I_d(\rightarrow)$  disminueix

i pràcticament no circula corrent.

L'efecte anterior afecta al corrent difusiu  $I_d(\rightarrow)$ , però no al d'arrossegament  $I_a(\leftarrow)$  que és manté, i circula un corrent molt petit anomenat **corrent invers de saturació**.



# Polarització directa

S'aplica una tensió positiva (+) a la part p.

Els forats de p són empentats cap a la unió, i els e<sup>-</sup> de n també són empentats cap a la unió,

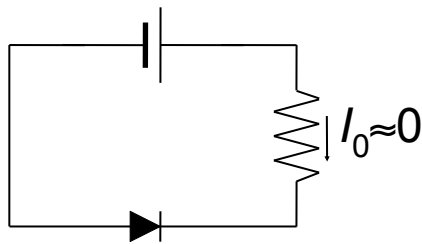
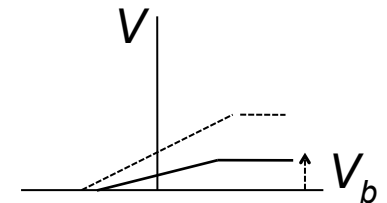
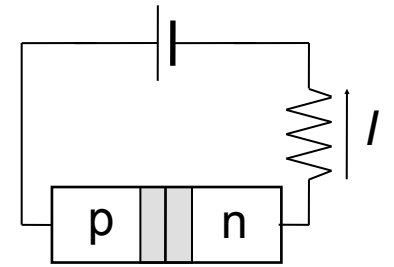
de manera que la regió de transició (com un aïllant) s'estreny,

$V_b$  disminueix,

i el corrent difusiu  $I_d(\rightarrow)$  augmenta.

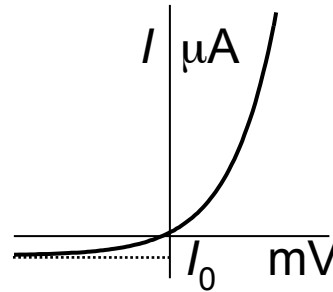
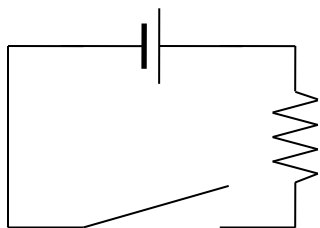
A partir d'una certa tensió llindar  $V_\gamma$

el corrent pot circular sense quasi cap resistència.

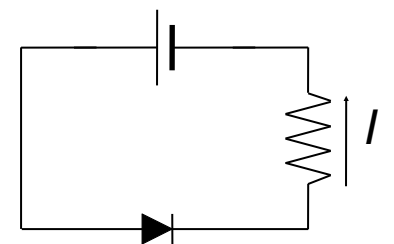
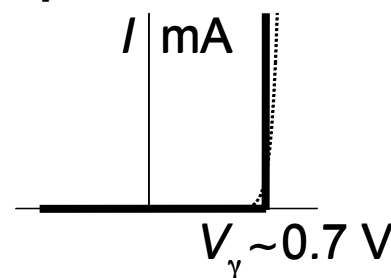


**Polarització inversa**

El díode no condueix



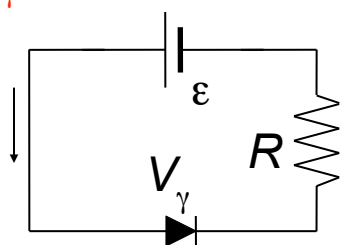
**Aproximació**



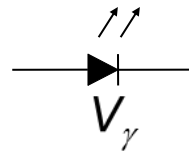
**Polarització directa**

Si  $\varepsilon > V_\gamma$ , el díode condueix

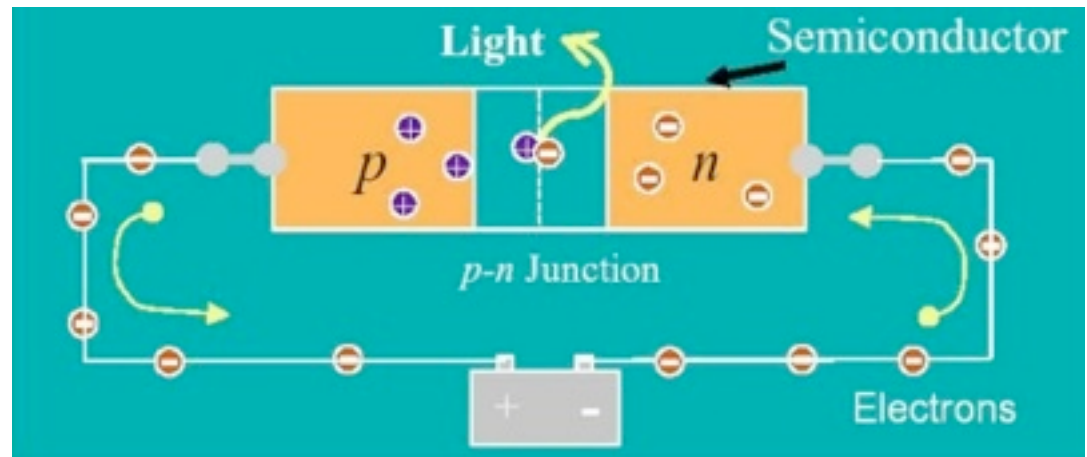
$$I = \frac{\varepsilon - V_\gamma}{R}$$



# LED (*Light Emitting Diode*)



- Emet llum quan passa corrent ( $\sim 10 \text{ mA}$ ,  $V_\gamma \sim 1.5 \text{ V}$ )
- Quan els portadors de càrrega passen de la part on són majoritaris a la que són minoritaris, es produeixen recombinacions electró-forat i perden energia.
- En els díodes de silici o germani l'energia que perden els electrons en recombinar-se es transforma en calor.
- En semiconductors com l'arseniur de gal·li l'energia es converteix en un fotó de llum visible.
- Gràcies a la seva durabilitat (10 anys), dimensions petites, baix preu i poc consum de potència, els LED s'utilitzen com
  - comandaments a distància
  - pilots lluminosos
  - semàfors
  - pantalles
  - il·luminació





# Transistors

# MOSFET

# Transistors

Components electrònics semiconductors, amb tres terminals, que s'utilitzen com a amplificador o com a commutador.

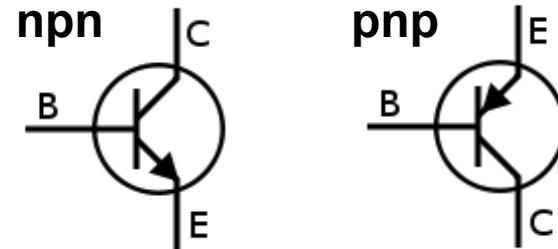
N'hi ha de molts tipus:

- Transistors Bipolars d'Unió o **BJT** (*Bipolar Junction Transistors*)

**Unió:** doble unió de semiconductors

**Bipolar:** corrent degut a electrons i forats

Inventat per Bardeen, Brattain i Shokley, l'any 1947 (premi Nòbel 1956)



- Transistors d'Efecte Camp o **FET** (*Field Effect Transistors*)

unipolars: el corrent només és d'electrons (FET de canal n) o forats (FET de canal p)



# Avantatges del FET en front dels BJT

- Consumeixen menys energia
- Ocupen menys espai en un xip
- Relativament més fàcils de fabricar
- Es poden fer circuits lògics i memòries només amb MOS (sense díodes ni resistències)
- Generen menys soroll i són més estables



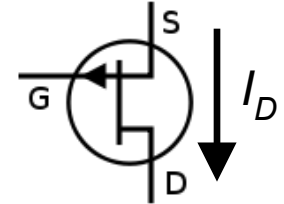
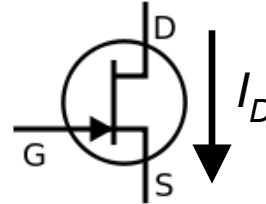
# Transistors d'Efecte Camp (FET)

Tenen 3 terminals: porta (**G**ate), font (**S**ource) i drenador (**D**rain)

Només circula el **corrent**  $I_D$ , de D a S en els de **canal n**, i en els de **canal p** de S a D

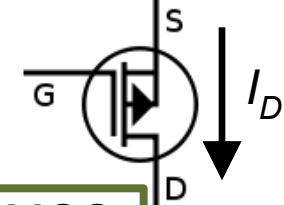
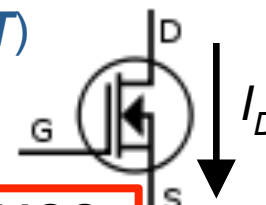
N'hi de diferents tipus:

- FET d'unió o **JFET** (*Junction FET*)



- **MOSFET** (*Metal Oxide Semiconductor FET*)

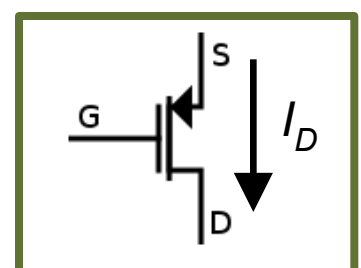
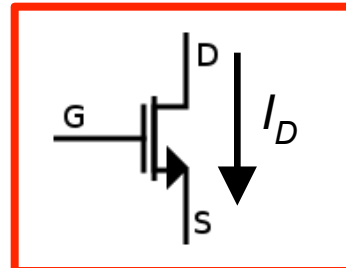
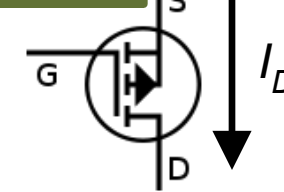
- MOS d'empobriment  
(buidament, *depletion*)



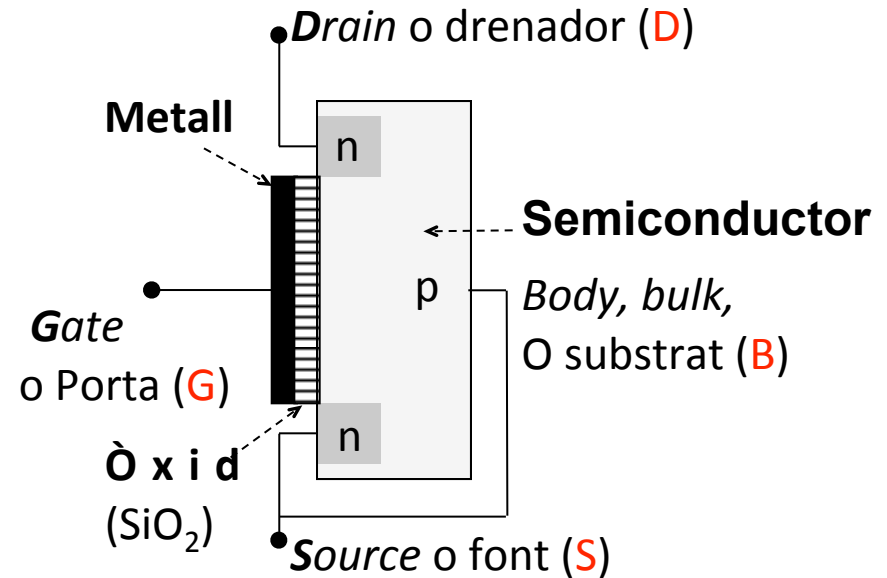
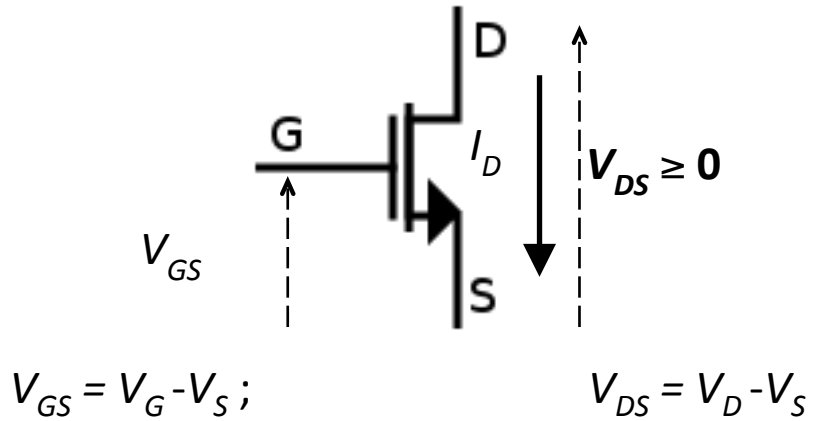
- MOS d'enriquiment  
(acumulació, *enhancement*)

nMOS

pMOS



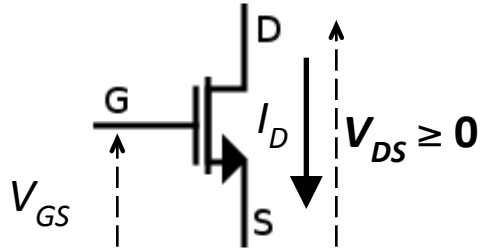
# nMOS d'enriquiment



L'òxid és aïllant i no deixa passar corrent per G

B connectat a S, amb  $V_{DS} \geq 0$ , garanteix que les unions p-n estan en inversa

# nMOS d'enriquiment



$$V_{GS} = V_G - V_S ; \quad V_{DS} = V_D - V_S$$

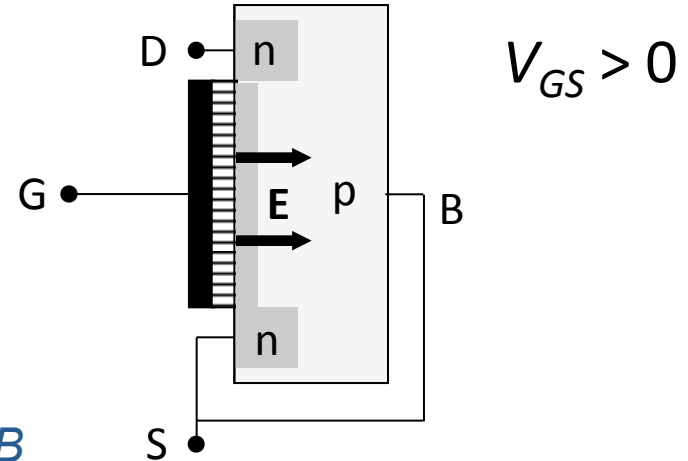
Amb  $V_{GS} > 0$  es crea un camp elèctric  $\mathbf{E}$  de  $G$  a  $B$  que repel·leix forats de  $p$  i atrau  $e^-$  minoritaris de  $p$  i, quan  $V_{GS} > V_T$ , apareix un canal  $n$  (enriquit amb  $e^-$ )

$V_T \equiv$  Threshold Voltatge (tensió llindar)

$$\text{Si } V_{DS} = 0 \rightarrow I_D = 0$$

$$\text{Si } V_{DS} > 0 \text{ i } V_{GS} < V_T \rightarrow I_D = 0$$

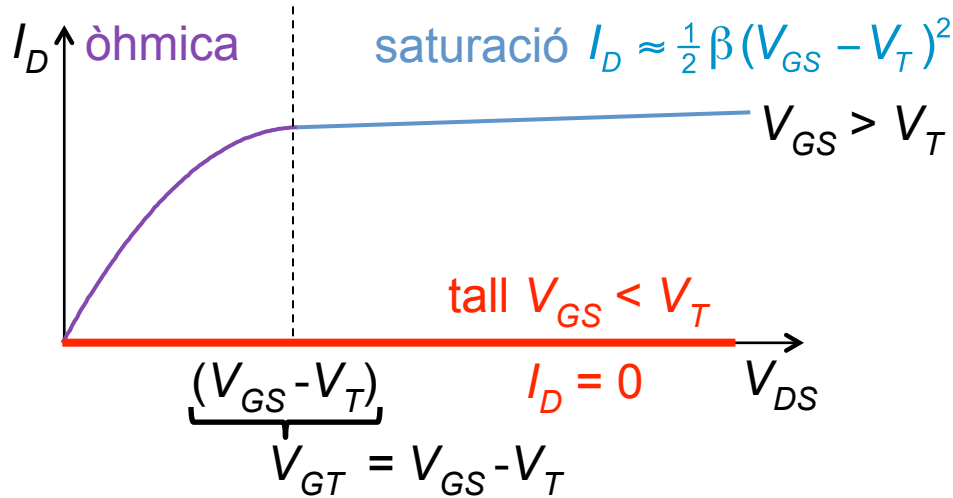
$$\text{Si } V_{DS} > 0 \text{ i } V_{GS} > V_T \rightarrow I_D > 0$$



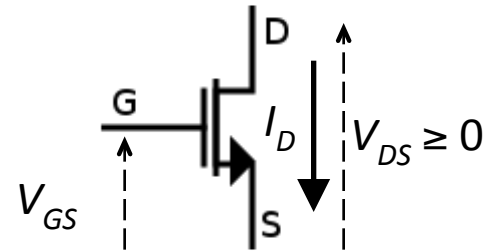
# Característiques dels nMOS d'enriquiment

Per a cada valor de  $V_{GS}$

hi ha una corba característica  $I_D(V_{DS})$



$V_T \equiv$  Threshold Voltage  
 (tensió llindar)  
 $\beta \equiv$  Constant característica



Si  $V_{GS} < V_T$  tall  $I_D = 0$

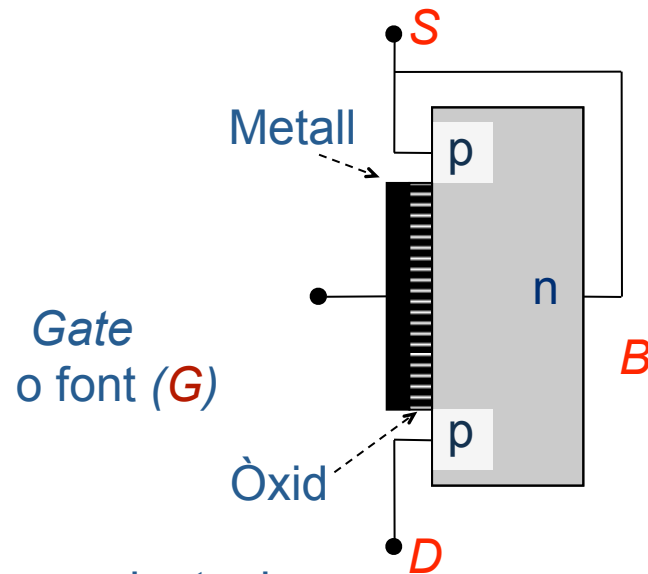
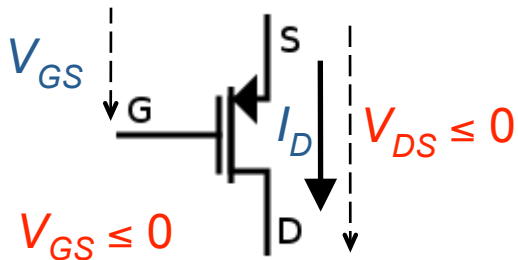
Model d'un nMOS d'enriquiment

Si  $V_{GS} \geq V_T$  i  $V_{DS} \leq V_{GT}$  òhmica  $I_D = \beta (V_{GT} V_{DS} - \frac{1}{2} V_{DS}^2)$

i  $V_{DS} \geq V_{GT}$  saturació  $I_D = \frac{1}{2} \beta V_{GT}^2$

La regió òhmica s'anomena també regió triode

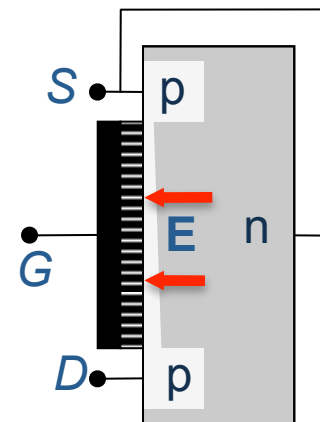
# pMOS d'enriquiment



És com un nMOS d'enriquiment però intercanviant n i p.

I funciona al revés:  $I_D$  va de S a D,  $V_{GS}$  i  $V_{DS}$  han de ser negatius, i  $V_T < 0$

Amb  $V_{GS} < 0$  es crea un camp elèctric  $E$  de n a G que repel·leix  $e^-$  de n i atrau forats minoritaris de n i, quan  $V_{GS} < V_T$ , apareix un canal p (enriquit amb forats) i, si  $V_{DS} < 0$ , passa corrent de S a D



$$V_{GS} < 0$$

$$\text{Si } V_{DS} = 0 \rightarrow I_D = 0$$

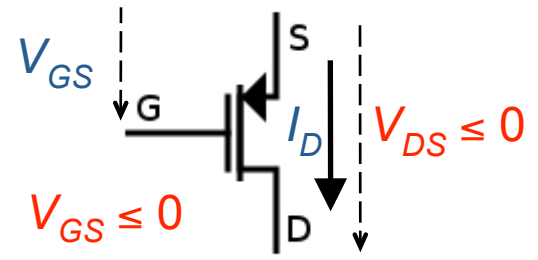
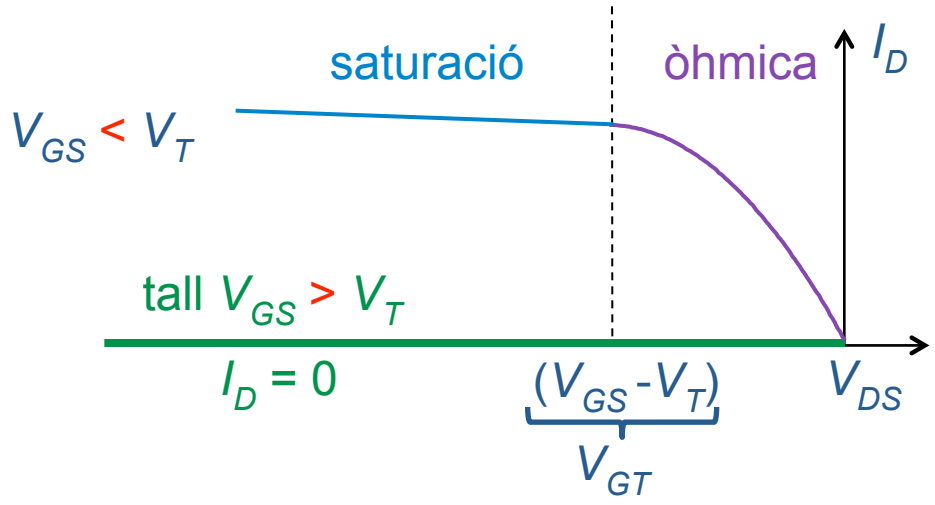
$$\text{Si } V_{DS} < 0 \text{ i } V_{GS} > V_T \text{ (menys negatiu)} \rightarrow I_D = 0$$

$$\text{Si } V_{DS} < 0 \text{ i } V_{GS} < V_T \text{ (mes negatiu)} \rightarrow I_D > 0$$

# Característiques dels pMOS d'enriquiment

Per a cada valor de  $V_{GS}$  (o  $V_{GT} = V_{GS} - V_T$ )  
 hi ha una corba característica  $I_D(V_{DS})$

$V_T \equiv$  Threshold Voltage  
 és negativa  
 $\beta \equiv$  Constant característica



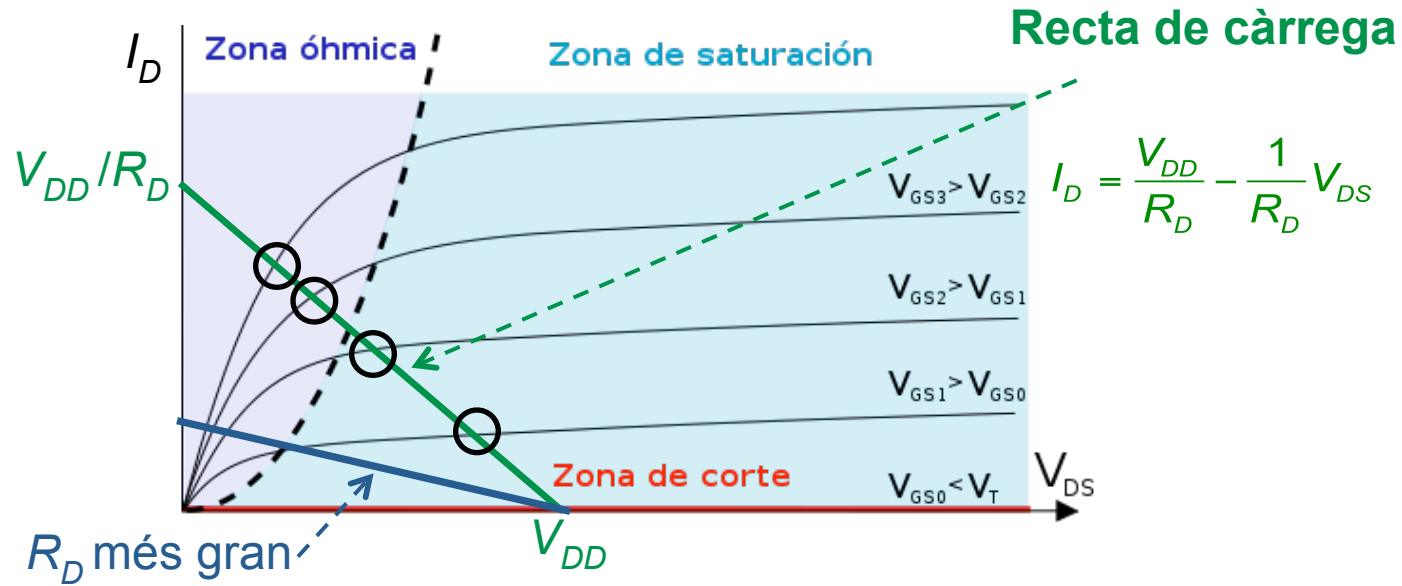
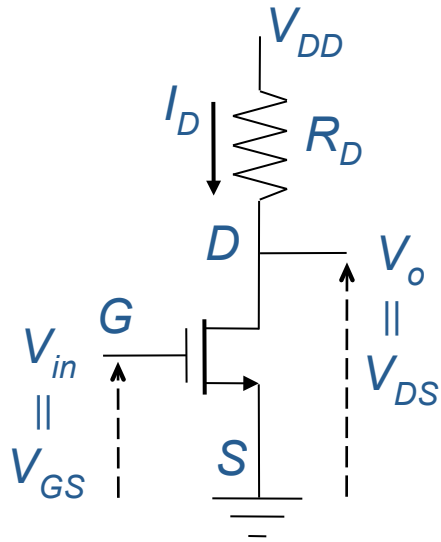
Si $V_{GS} > V_T$ tall $I_D = 0$	Model d'un pMOS d'enriquiment
Si $V_{GS} \leq V_T$ i $V_{DS} \leq V_{GT}$ saturació	$I_D = \frac{1}{2} \beta V_{GT}^2$
i $V_{DS} \geq V_{GT}$ òhmica	$I_D = \beta (V_{GT} V_{DS} - \frac{1}{2} V_{DS}^2)$



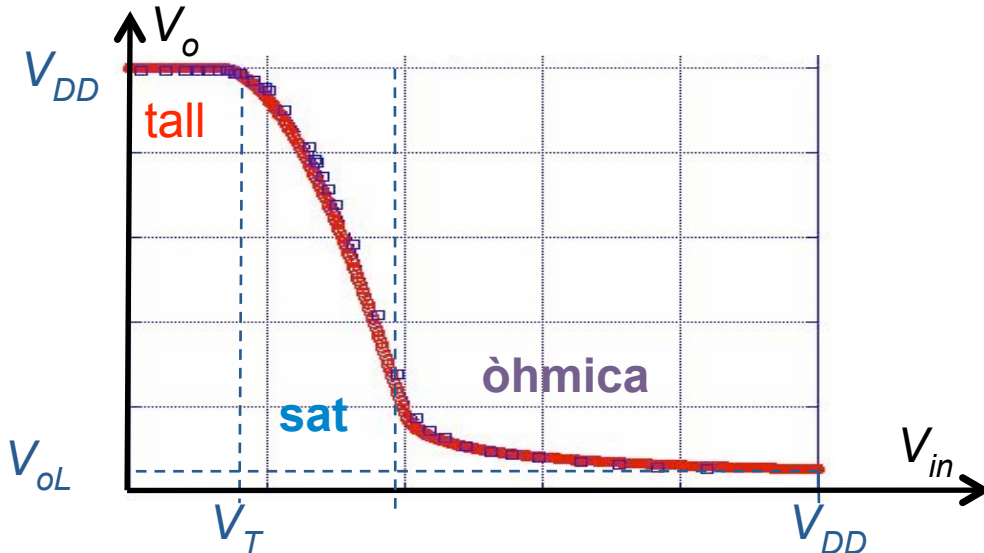
# Inversors nMOS i CMOS

## Retràs i potència en circuits digitals

# Inversor nMOS



Corba de transferència  $V_o(V_{in})$



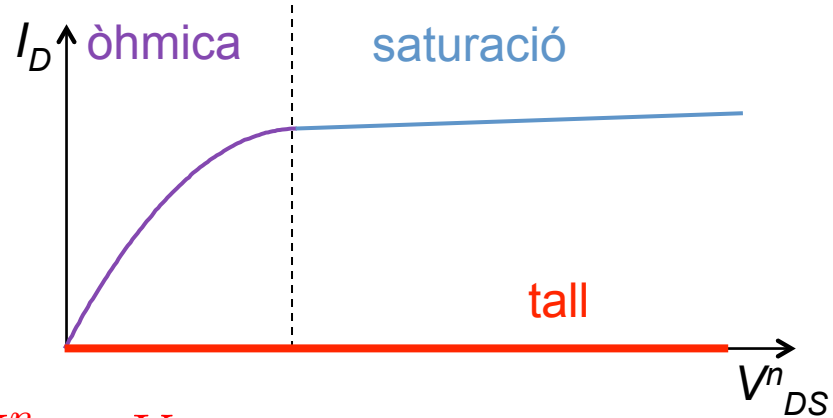
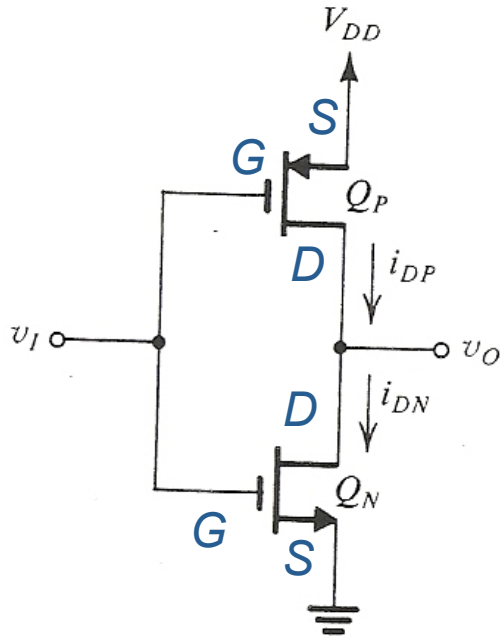
**Inversor (porta NOT):**

$V_{in} = 0$  (tall)  $V_o = V_{DD}$

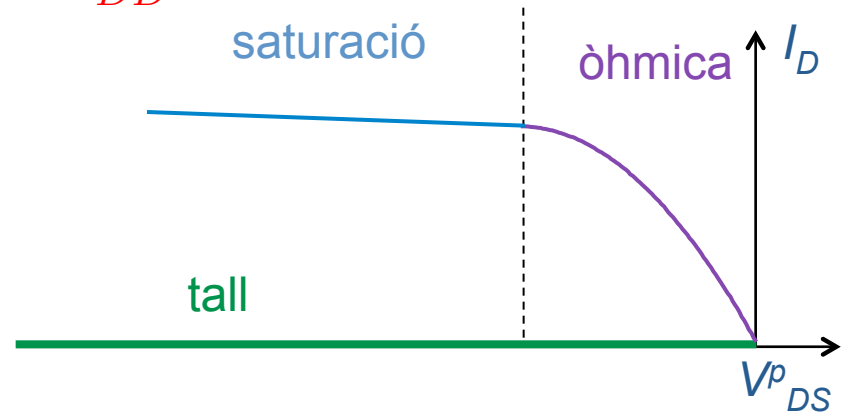
$V_{in} = V_{DD}$  tq òhmica i  $V_o \approx 0$



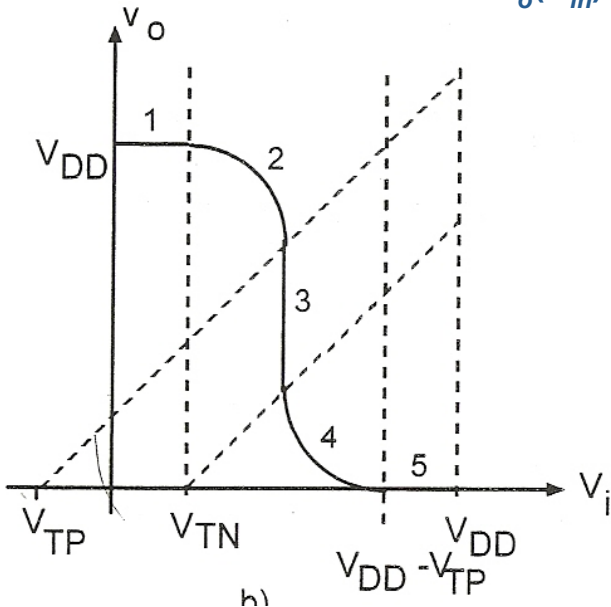
# Inversor CMOS



$$V_{DS}^p = V_{DS}^n - V_{DD}$$



Corba de transferència  $V_o(V_{in})$



- 1: n en TALL, p en ÒHMICA
- 2: n en SATURACIÓ, p en ÒHMICA
- 3: tots dos en SATURACIÓ
- 4: n en ÒHMICA, p en SATURACIÓ
- 5: n en ÒHMICA, p en TALL

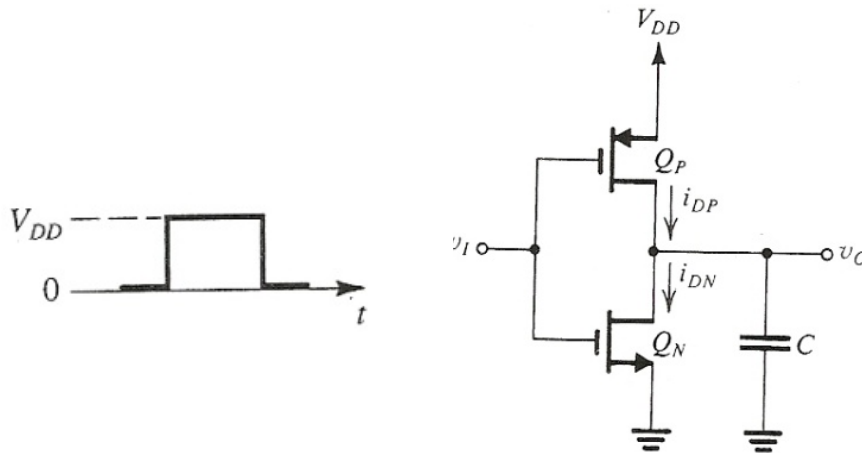
# Retràs i potència del inversor CMOS

En el nivell lògic final 0, 1, en les regions 1 i 5, no hi ha intensitat: algun dels transistors es troba en regió de tall

Les transicions per les regions 2,3 i 4 impliquen corrent i retràs

- a) Retràs: Transicions no instantànies, que poden afectar la velocitat de rellotge
- b) Potència: Energia dissipada per l'intensitat en les transicions

## Model de retràs i potència amb condensadors

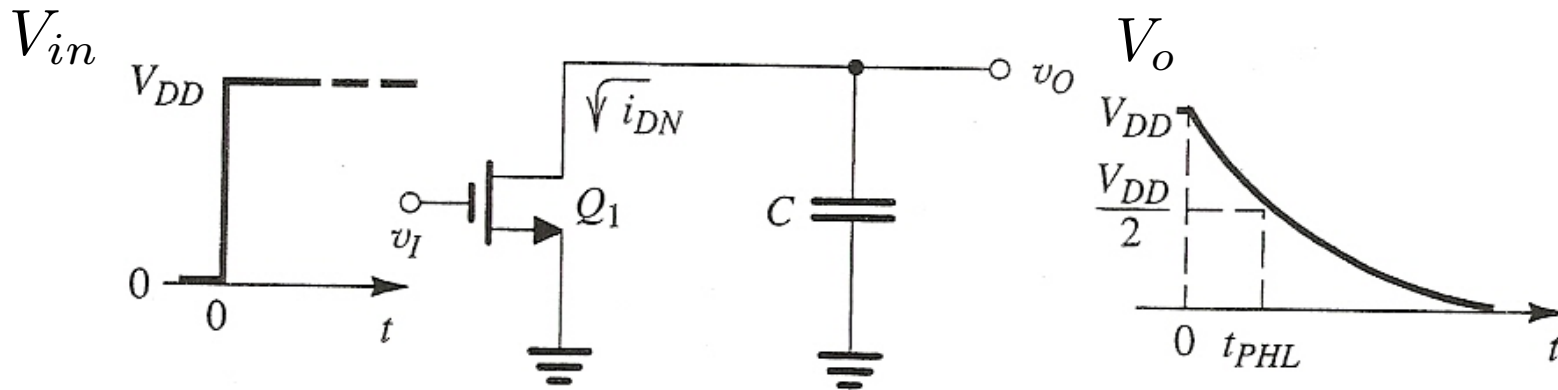


Origen de la capacitat C

- 1) Porta
- 2) Regions de transició SB i DB
- 3) Connexions del circuit

$$C \sim 1\mu F$$

# Anàlisi de la pujada: de low (L) a high (H)



Per el condensador:

- Estat inicial  $V(0) = V_{DD}$
- Procés de descàrrega

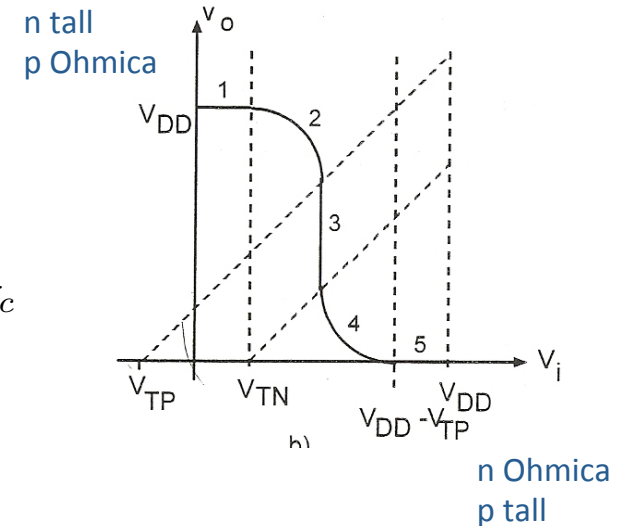
$$V(t) = V(0) \exp\left(-\frac{t}{\tau_c}\right)$$

$$V(t_{PHL}) = \frac{V_{DD}}{2} = V_{DD} \exp\left(-\frac{t_{PHL}}{\tau_c}\right) \rightarrow t_{PHL} = \ln 2 \tau_c$$

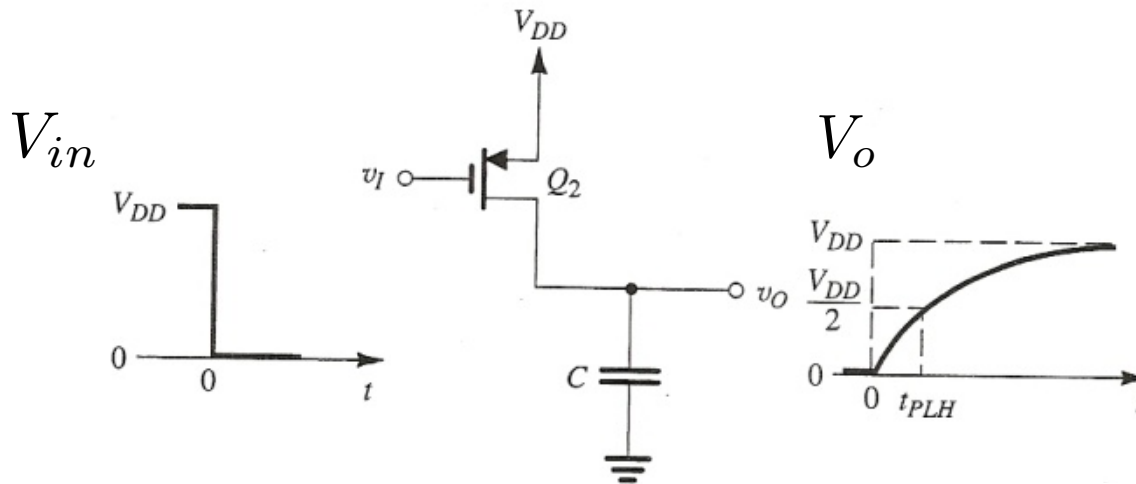
No hi ha una resistència real al transistor i  $\tau_c \neq RC$

Calculs detallats mostren, si  $V_T = 0.2 V_{DD}$ ,

$$t_{PHL} = \frac{1.7C}{\beta_n V_{DD}}$$



# Anàlisi de la pujada: de high (H) a low (L)



Per el condensador resulta un procés de càrrega  
Càlculs detallats mostren, si  $V_T = 0.2 V_{DD}$ ,

$$t_{PLH} = \frac{1.7C}{\beta_p V_{DD}}$$

Retràs en el propagació

$$t_P = \frac{t_{PHL} + t_{PLH}}{2}$$

