

# Propiedades eléctricas

---

- Capítulo 5 del temario (cap. 13 del libro de texto)
- Conductividad eléctrica en metales
  - ✓ **Ley de Ohm (microscópica y macroscópica)**
  - ✓ **velocidad de deriva electrónica y resistividad**
- Aislantes
- Modelo de bandas y semiconductores
  - ✓ **intrínsecos y extrínsecos**
    - movilidad de portadores de carga
    - concentración de portadores
    - efecto de la temperatura
  - ✓ **la unión *pn* y el diodo**
- Tecnología básica microelectrónica



# Propiedades eléctricas

---

- Lo que hay que saber calcular en MatII
  - ✓ aplicaciones de la ley de Ohm en materiales
  - ✓ ley de Ohm en materiales no homogéneos (→ difusión)
  - ✓ resistividad / conductividad de conductores
  - ✓ rigidez dieléctrica / capacidad de condensadores
  - ✓ concentraciones de portadores
    - por difusión
    - por implantación
  - ✓ movilidad de portadores
  - ✓ resistividad / conductividad de semiconductores
  - ✓ variación con la temperatura
  - ✓ corriente y voltaje a través de diodos



# Propiedades eléctricas

---

## Conductores



# Conductores

---

## ➤ Resistividad / conductividad de conductores

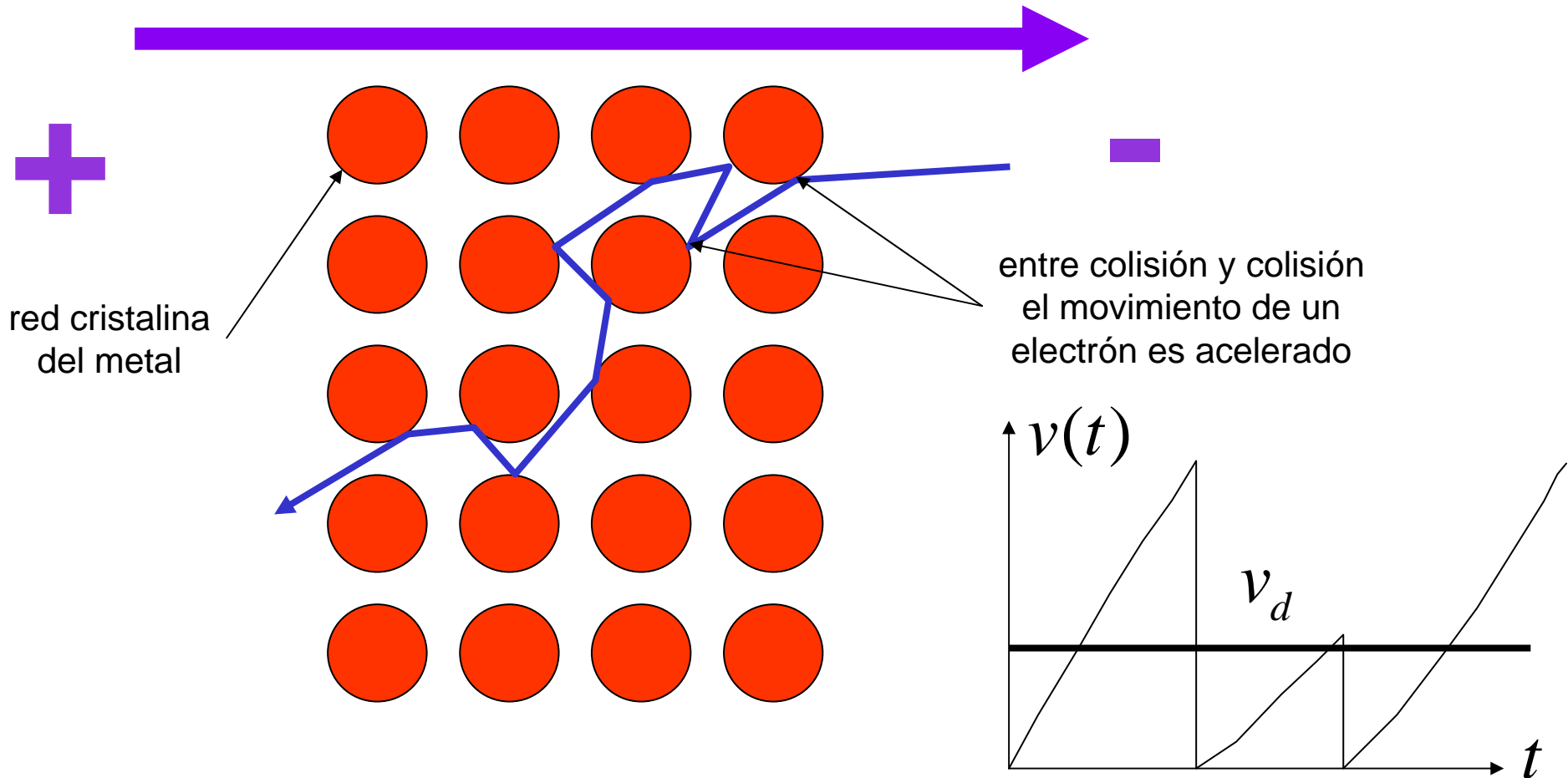
- ✓ los portadores de carga son generalmente electrones
- ✓ bajo la influencia del campo eléctrico se desplazan a través de la red cristalina del metal
  - **sufriendo colisiones continuamente con los átomos de la red**
  - **siendo acelerados entre colisión y colisión**
- ✓ el resultado neto de esta sucesión de aceleraciones y colisiones es una velocidad media o **velocidad de deriva**
- ✓ a mayor campo (mayor diferencia de potencial), mayor velocidad de deriva
- ✓ la constante de proporcionalidad se denomina **movilidad electrónica**



# Conductores

## ➤ Resistividad / conductividad de conductores

Cuanto mayor campo, mayor velocidad media de avance



# Conductores

➤ Resistividad / conductividad de conductores

$$\underline{v}_d = \mu \underline{E}$$

movilidad electrónica ( $\text{m}^2/\text{Vs}$ )

$$\underline{J} = ne \underline{v}_d = ne \mu \underline{E}$$

nº de electrones / unidad de volumen ( $\text{m}^{-3}$ )

y puesto que  $\underline{J} = \sigma \underline{E}$

la conductividad eléctrica debe ser:  $\sigma = ne\mu$  medida en  $(\Omega \cdot \text{m})^{-1}$  o S/m

la resistividad eléctrica es:  $\rho = \frac{1}{\sigma}$ , medida en  $\Omega \cdot \text{m}$

y su variación con la temperatura es aprox. lineal en un intervalo amplio de temperatura:

(excepciones: temperaturas muy bajas y cambios de fase)

$$\rho = \rho_{ref} \left( 1 + \alpha_T (T - T_{ref}) \right)$$

**No es un proceso térmicamente activado**



---

# Aisladores



# Aisladores

---

- *(adelantado del Cap. 10 del texto, apartado 10.6)*
- una aplicación importante de los materiales poliméricos y cerámicos es el de aisladores eléctricos
- en MatII estudiamos las dos propiedades básicas de los aisladores:
  - ✓ **la constante dieléctrica**
    - es la propiedad fundamental para el uso de materiales en condensadores
  - ✓ **la rigidez dieléctrica**
    - es la propiedad que fija la máxima intensidad de campo eléctrico que puede soportar un material sin sufrir un fallo dieléctrico (es decir, sin “quemarse” o ser perforado por una descarga entre los conductores que separa).

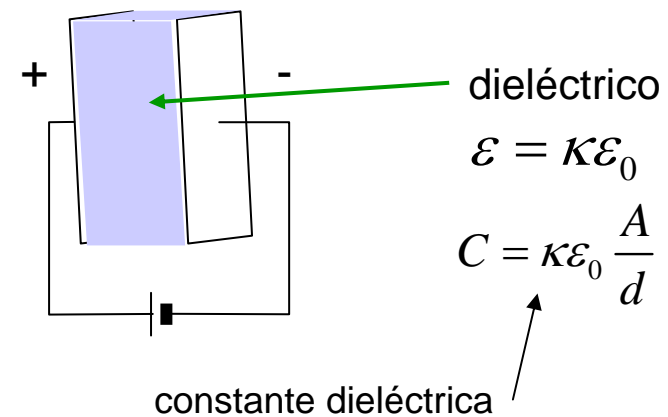
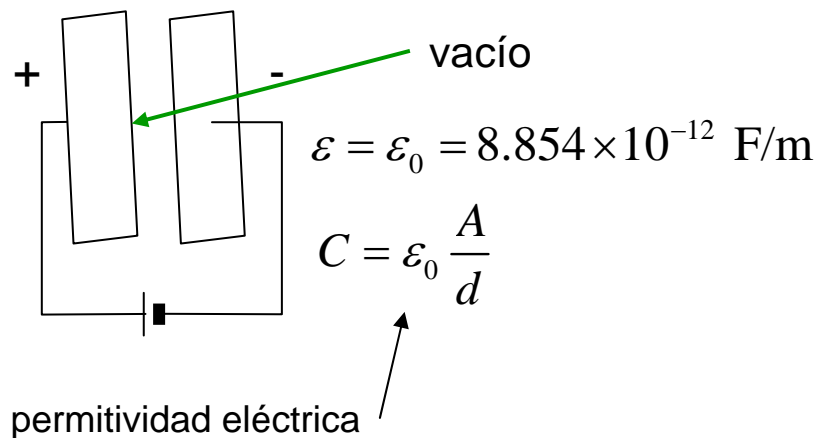




# Aisladores

## ➤ la constante dieléctrica

- está relacionada con la **polarizabilidad molecular** del material
- un material con constante dieléctrica elevada permite **almacenar mayor energía eléctrica** en un condensador que si éste tuviera aire o vacío entre las placas.
- este efecto es para algunos materiales (cerámicos, típicamente) muy pronunciado y permite incrementar la capacidad de un condensador varios miles de veces sobre el valor de la capacidad con vacío o aire como dieléctrico.



# Aisladores

---

## ➤ la rigidez dieléctrica

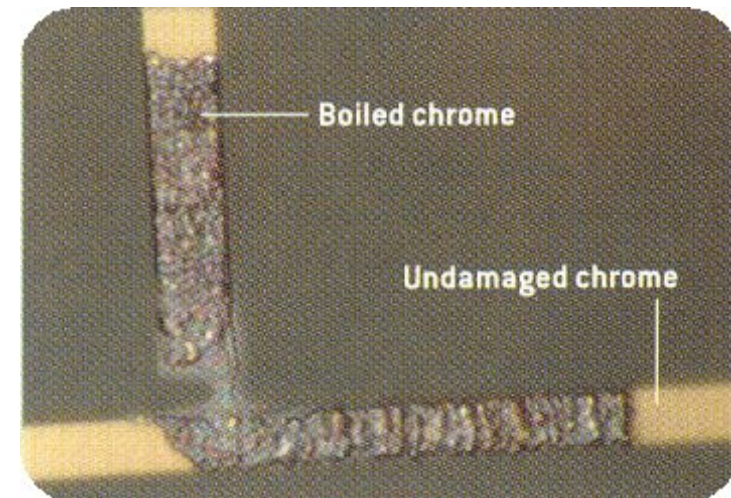
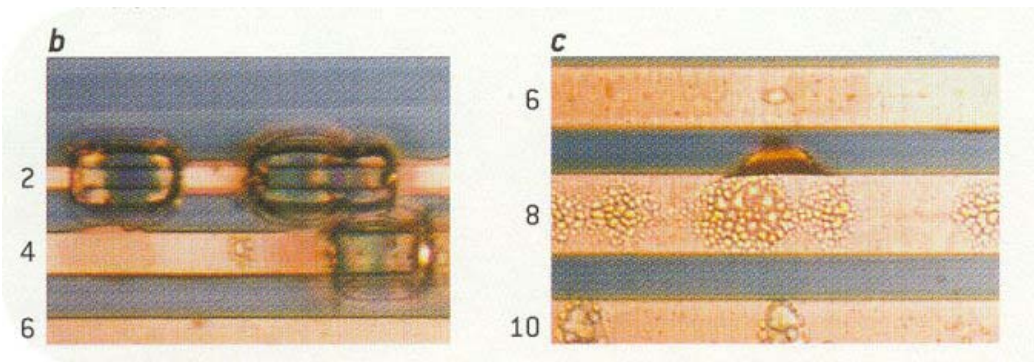
- es la **intensidad máxima de campo** eléctrico que puede soportar un material manteniendo su comportamiento de aislador.
- sus unidades son por tanto las mismas que las del campo eléctrico
- cuando la intensidad de campo (p.ej. entre las placas de un condensador) supera la rigidez dieléctrica del material, éste sufre un quemado, perforación o fallo
- en este caso, típicamente se cortocircuita el componente electrónico (p.ej. un condensador)
- y se produce una descarga a través del material, y este se quema en uno o varios puntos.



# Aisladores

## ➤ la rigidez dieléctrica

- ej. de la experiencia diaria: un rayo se produce cuando el campo eléctrico producido por una tormenta supera la rigidez dieléctrica del aire.
- descargas de electricidad estática en chips:



---

# Semiconductores



# Materiales semiconductores

---

Semiconductores elementales: Germanio (Ge) y Silicio (Si)

Compuestos IV: SiC y SiGe

Compuestos III-V:

**Binarios:** GaAs, GaP, GaSb, AlAs, AlP, AlSb, InAs, InP y InSb

**Ternarios:** GaAsP, AlGaAs

**Cuaternarios:** InGaAsP

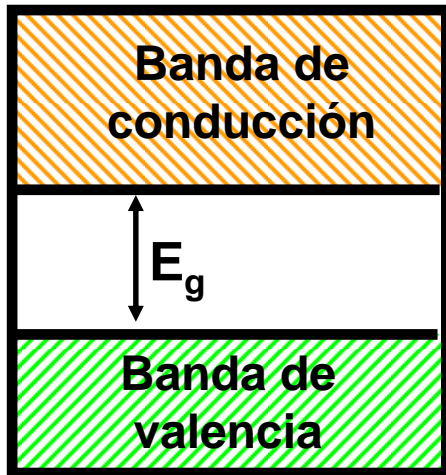
Compuestos II-VI: ZnS, ZnSe, ZnTe, CdS, CdSe y CdTe

Son materiales de conductividad intermedia entre la de los metales y la de los aislantes.

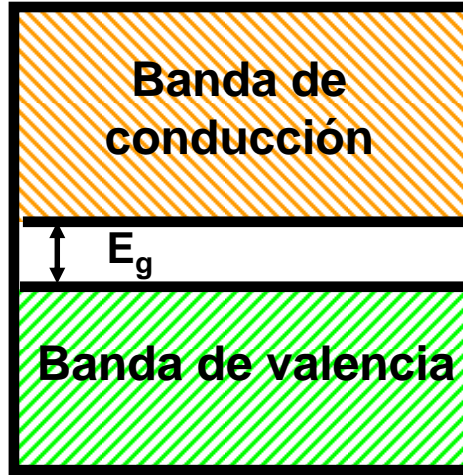
Su conductividad se modifica en gran medida por la **temperatura**, la **excitación óptica** y las **impurezas**.



# Diagramas de bandas de energía



**Aislante**  
 $E_g=5-10\text{eV}$



**Semiconductor**  
 $E_g=0.5-2\text{eV}$



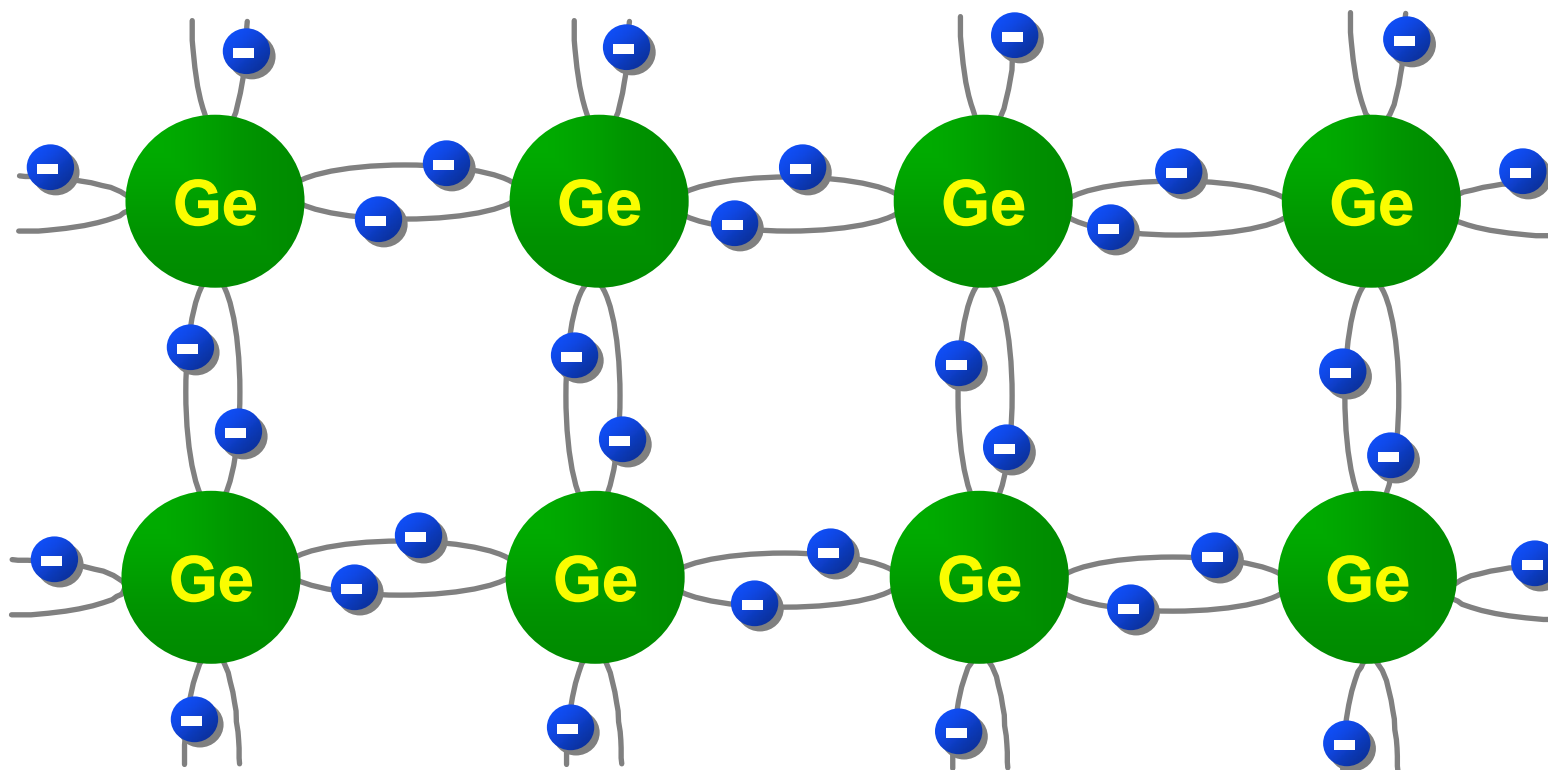
**Conductor**  
No hay  $E_g$

A 0 K, tanto los aislantes como los semiconductores no conducen, ya que ningún electrón tiene energía suficiente para pasar de la banda de valencia a la de conducción.

A 300 K, algunos electrones de los semiconductores alcanzan este nivel.

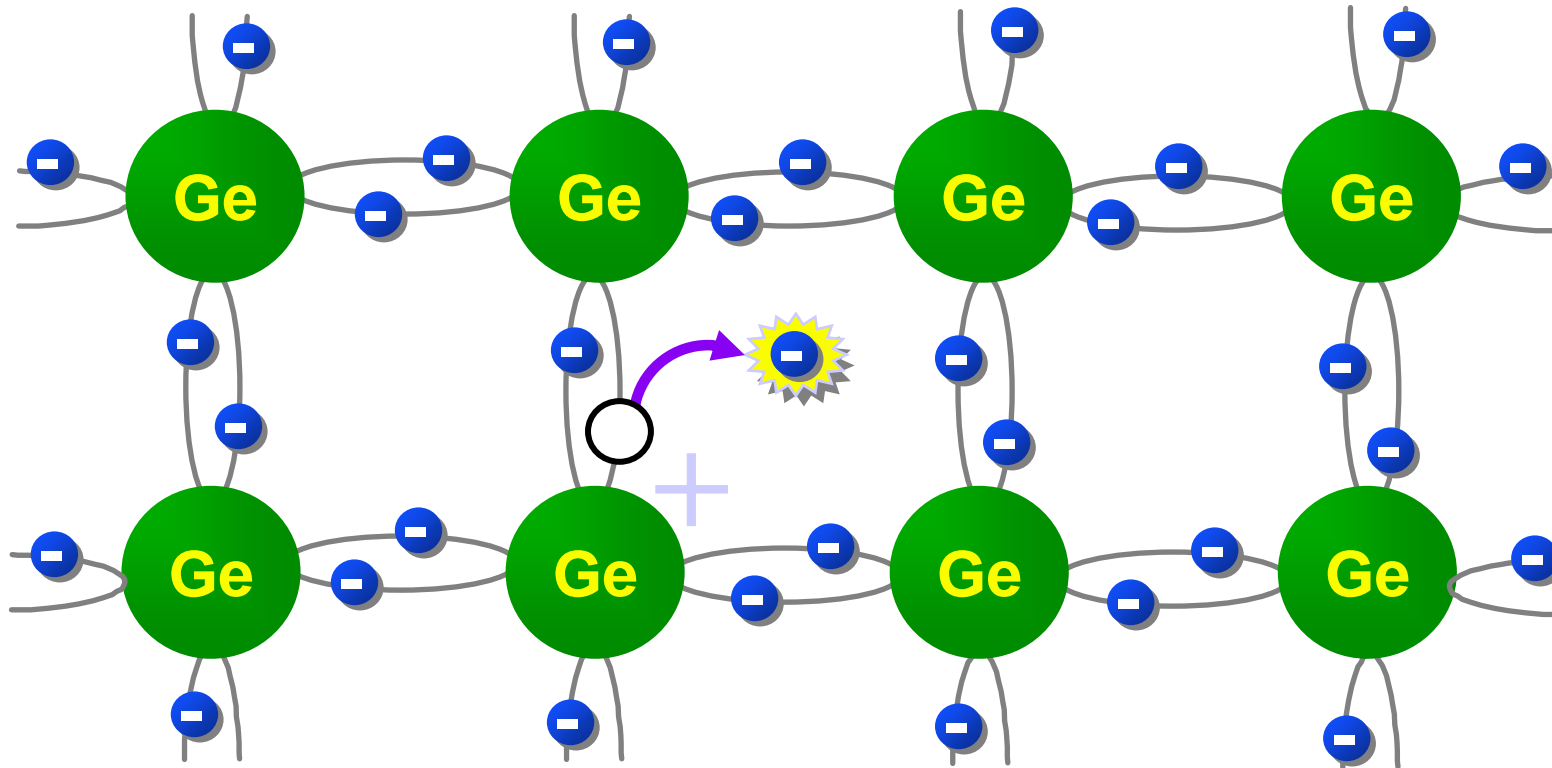
**Al aumentar la temperatura aumenta la conducción en los semiconductores (al contrario que en los metales).**

## Representación plana del Germanio a 0 K



**No hay enlaces covalentes rotos.** Esto equivale a que los electrones de la banda de valencia no pueden saltar a la banda de conducción.

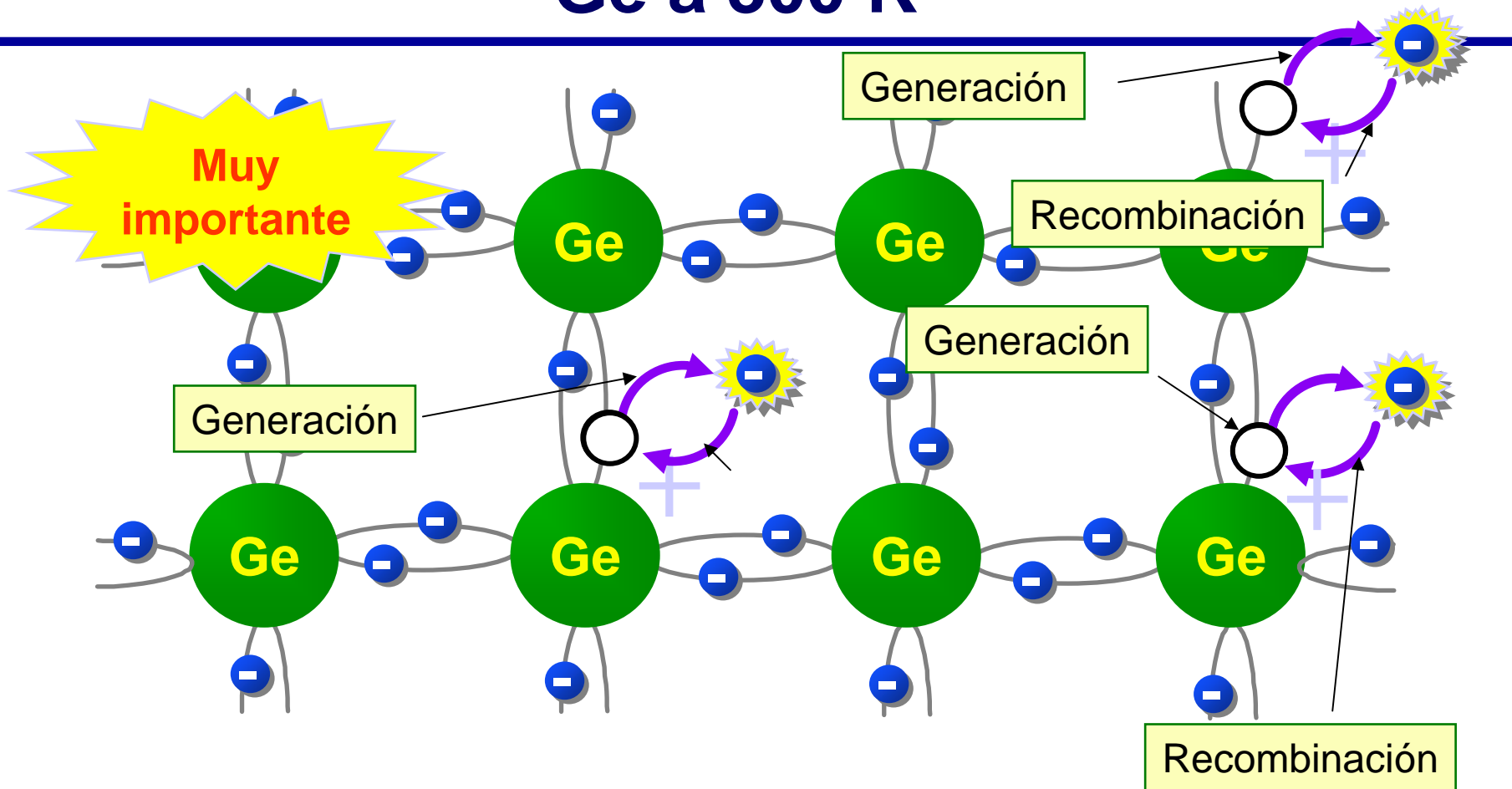
## Ge a 300 K



- Hay **1** enlace roto por cada  **$1.7 \cdot 10^9$**  átomos.
- Un electrón “libre” y una carga “+” por cada enlace roto.

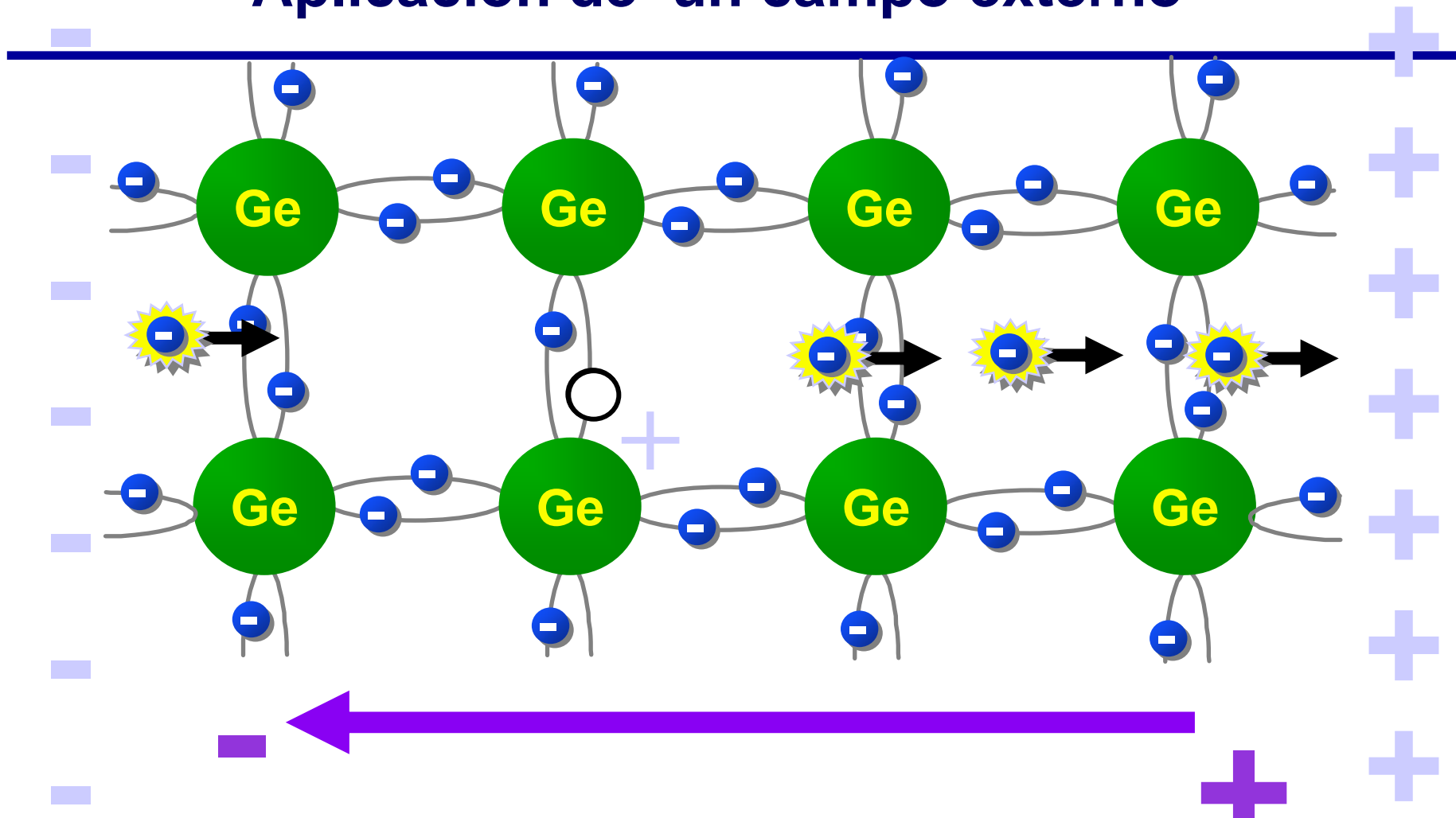


# Ge a 300 K



Siempre se están rompiendo (*generación*) y reconstruyendo (*recombinación*) enlaces. La vida media de un electrón puede ser del orden de milisegundos o microsegundos.

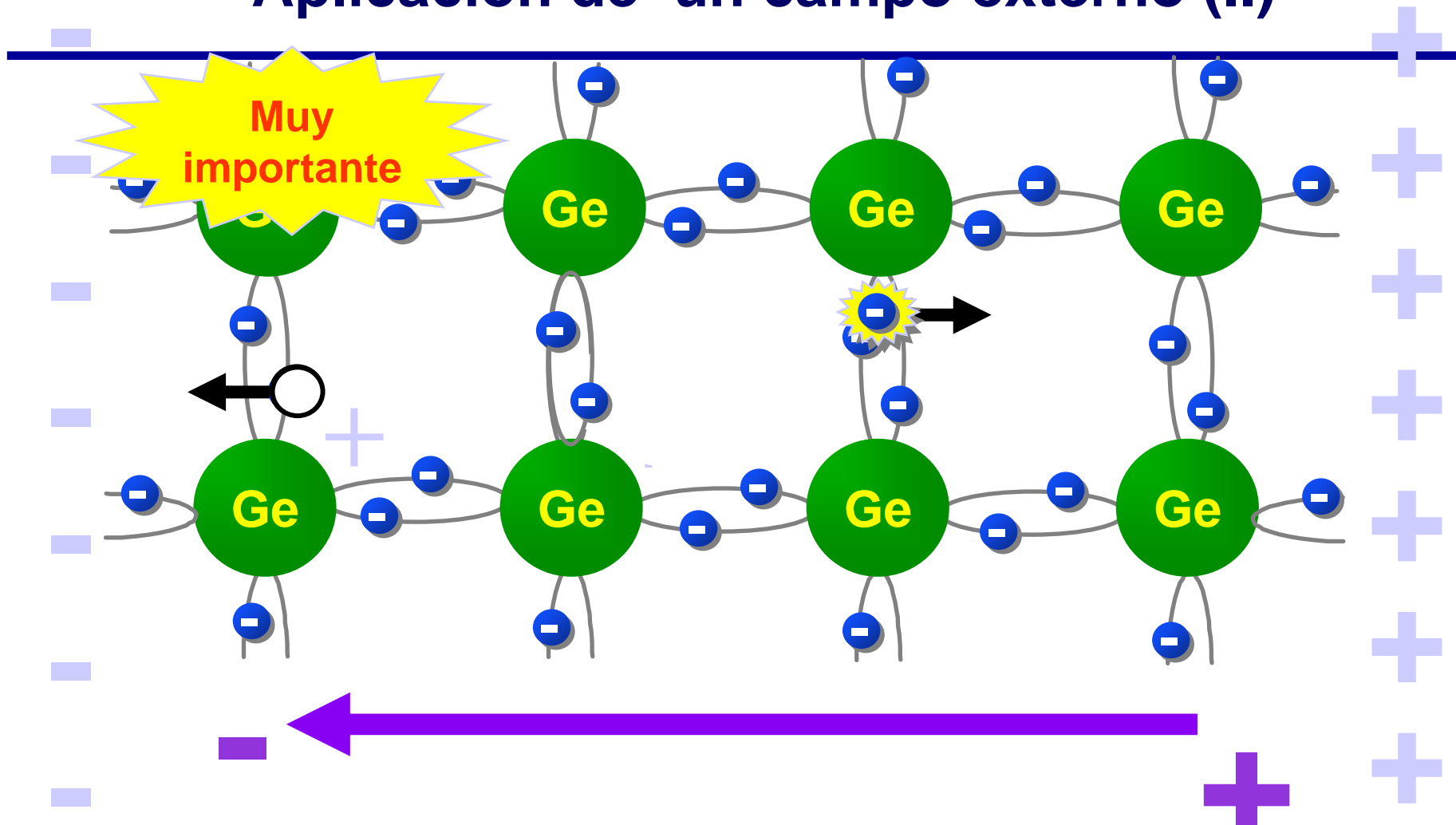
# Aplicación de un campo externo



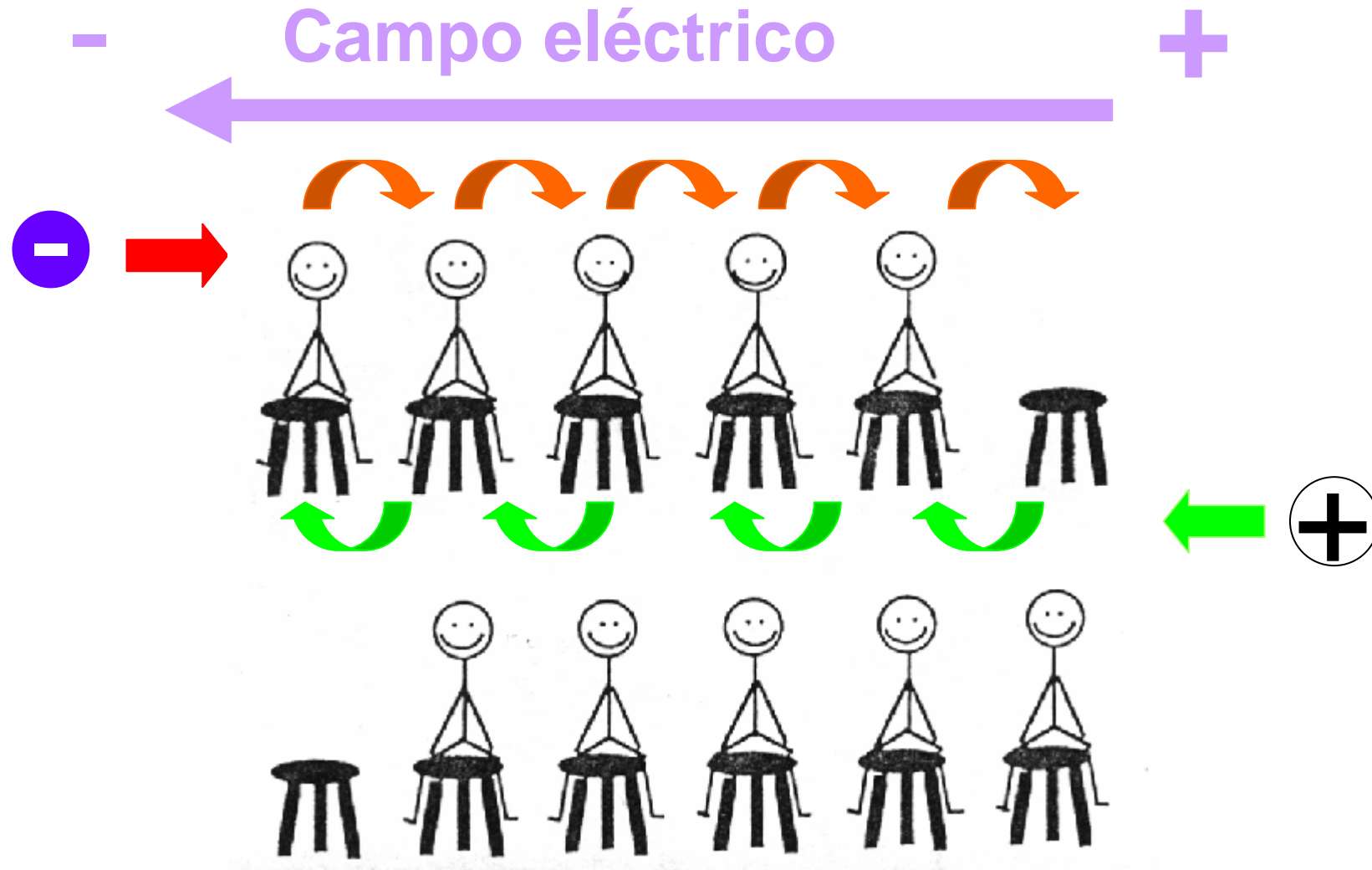
El electrón libre se mueve por acción del campo.

¿Y la carga "+" ?

## Aplicación de un campo externo (II)

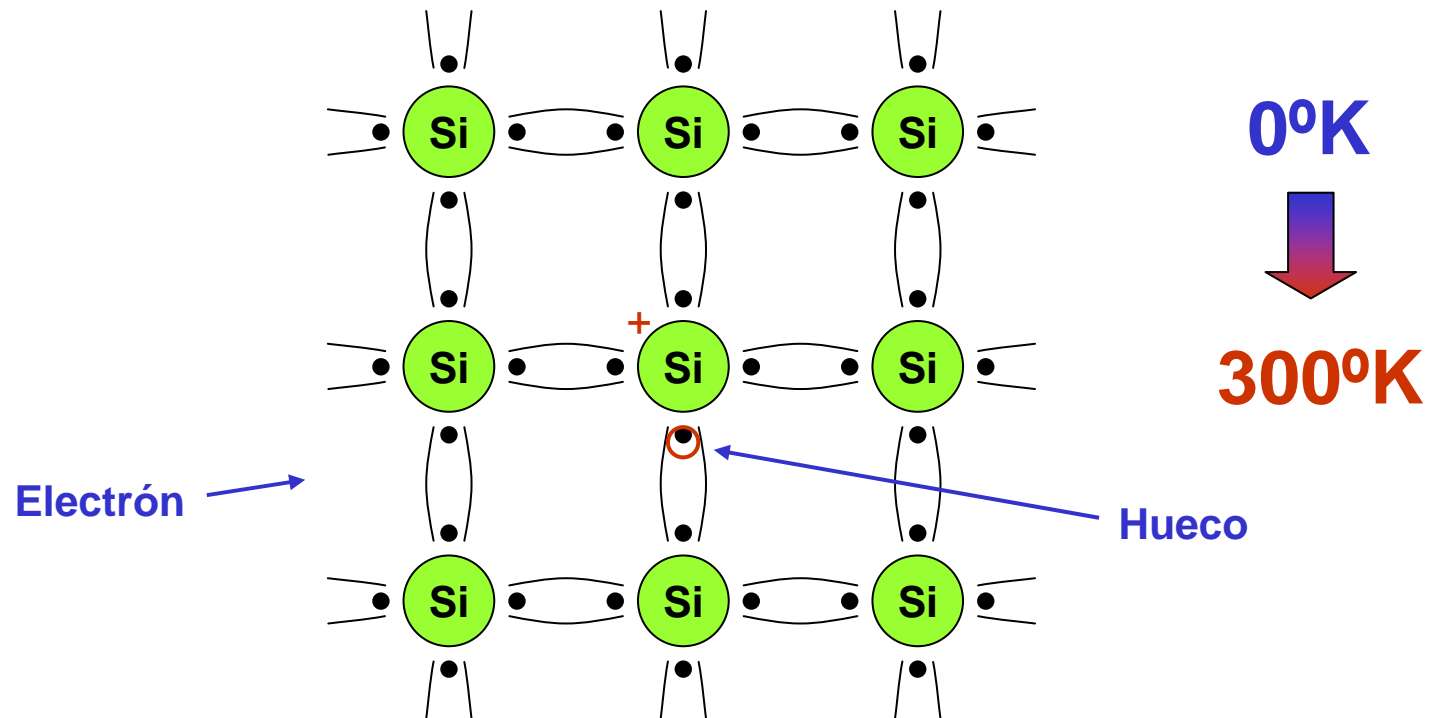


# Movimiento de electrones y huecos



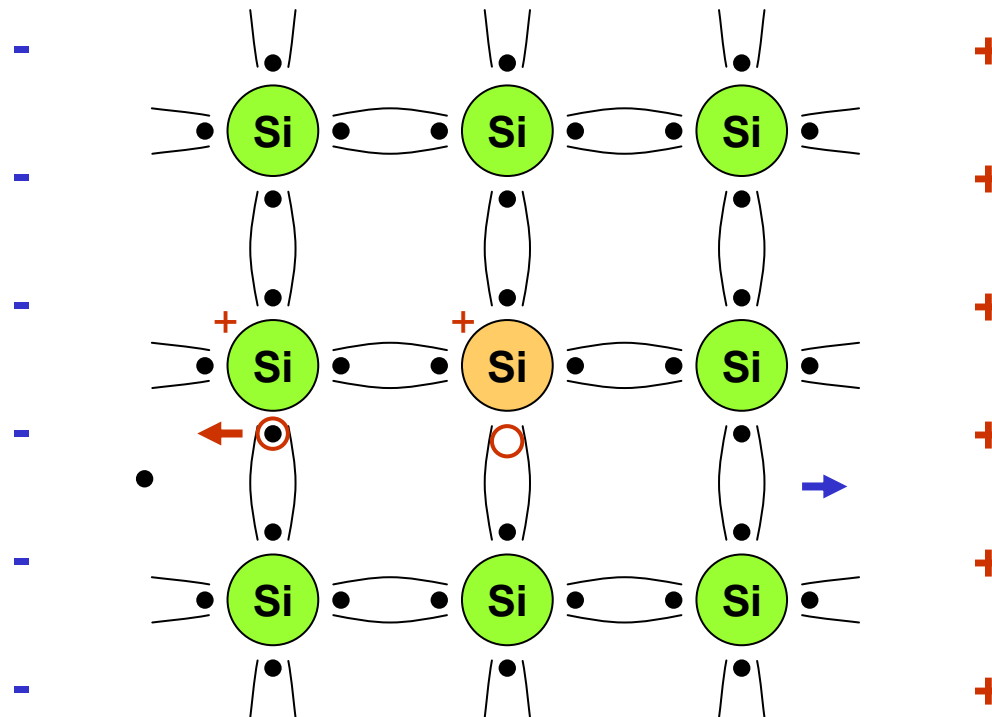
# Semiconductor Intrínseco

Semiconductor intrínseco

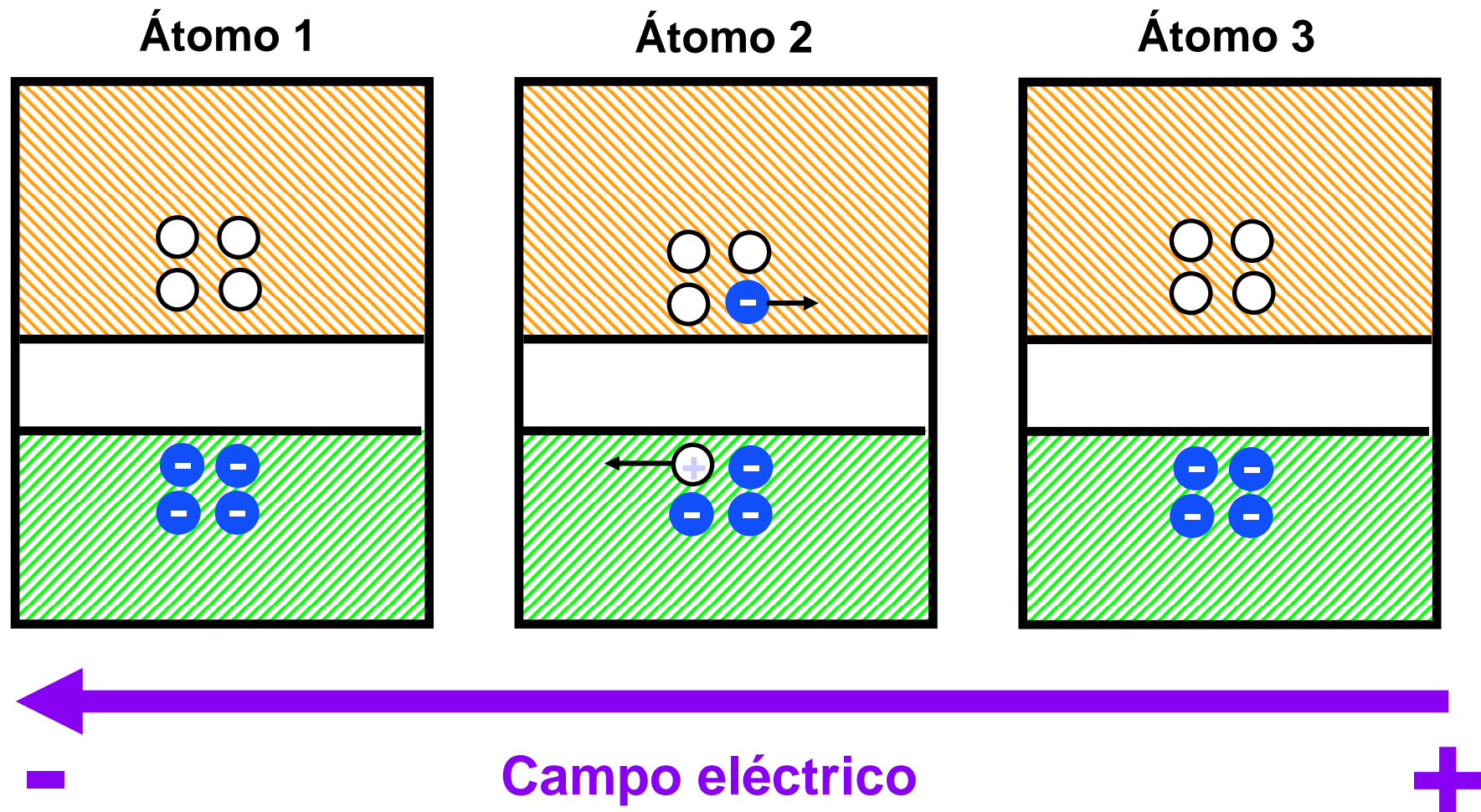


# Semiconductor Intrínseco

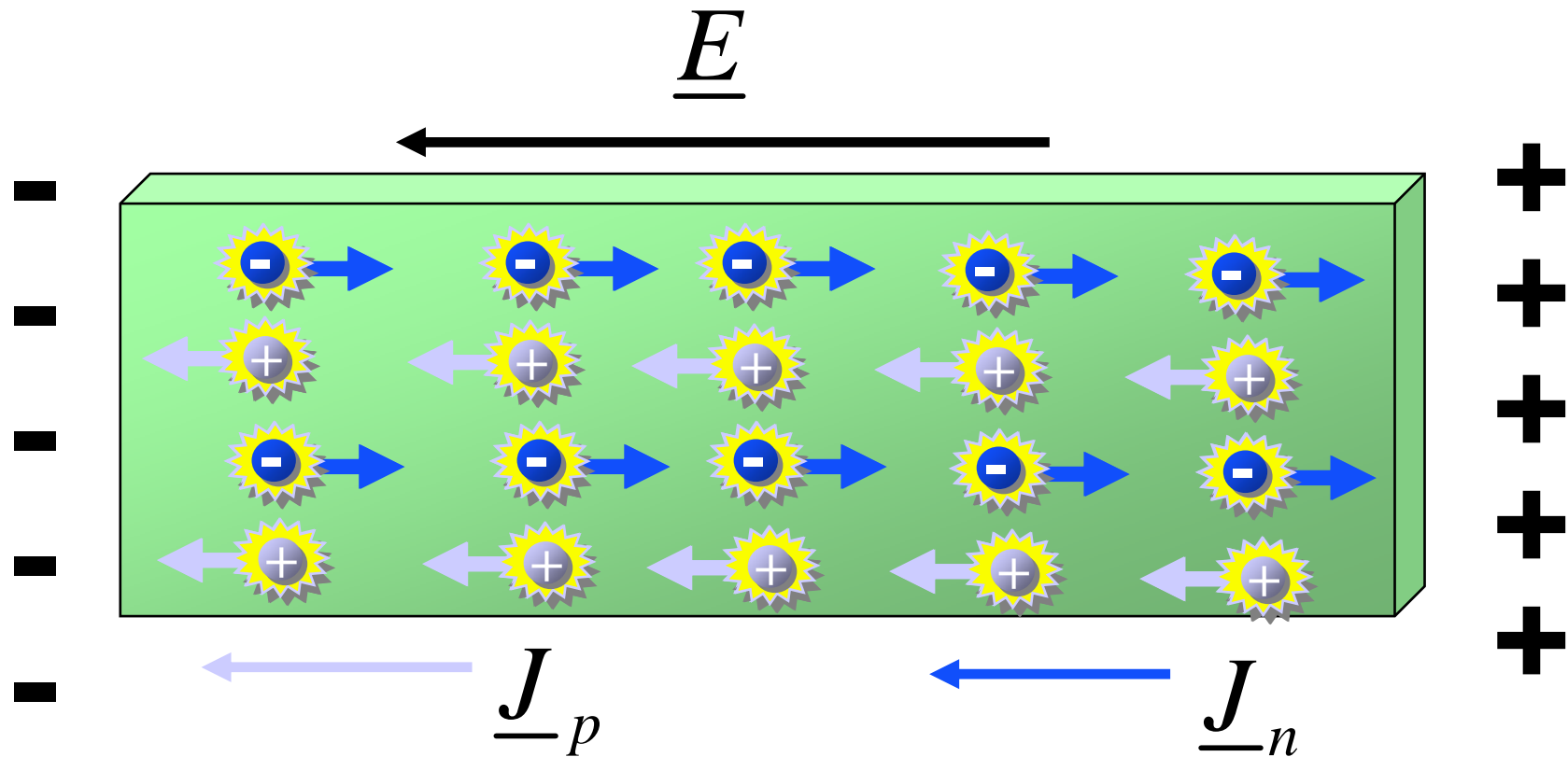
Semiconductor intrínseco: acción de un campo eléctrico



# Mecanismo de conducción. Interpretación en diagrama de bandas



# Movimiento de cargas por un campo eléctrico exterior



Existe corriente eléctrica debida a los dos portadores de carga:

$$\underline{J}_p = q\mu_p p \underline{E}$$

es la densidad de corriente de huecos.

$$\underline{J}_n = q\mu_n n \underline{E}$$

es la densidad de corriente de electrones.



# Movimiento de cargas por un campo eléctrico exterior

$$\underline{J}_p = q\mu_p p \underline{E}$$

$$\underline{J}_n = q\mu_n n \underline{E}$$

$q$  = carga del electrón

$\mu_p$  = movilidad de los huecos

$\mu_n$  = movilidad de los electrones

$p$  = concentración de huecos

$n$  = concentración de electrones

$\underline{E}$  = intensidad del campo eléctrico

	<b>Ge</b> (cm <sup>2</sup> /V·s)	<b>Si</b> (cm <sup>2</sup> /V·s)	<b>As Ga</b> (cm <sup>2</sup> /V·s)
$\mu_n$	<b>3900</b>	<b>1350</b>	<b>8500</b>
$\mu_p$	<b>1900</b>	<b>480</b>	<b>400</b>



# Semiconductores Intrínsecos

Todo lo comentado hasta ahora se refiere a los llamados **Semiconductores Intrínsecos** en los que:

- no hay ninguna impureza en la red cristalina.
- hay igual número de electrones y de huecos:

$$n = p = n_i$$

**Ge:**  $n_i = 2.4 \times 10^{19}$  portadores/m<sup>3</sup>

**Si:**  $n_i = 1.5 \times 10^{16}$  portadores/m<sup>3</sup>

**AsGa:**  $n_i = 1.4 \times 10^{12}$  portadores/m<sup>3</sup>

(a temperatura ambiente)

¿Pueden modificarse estos valores?

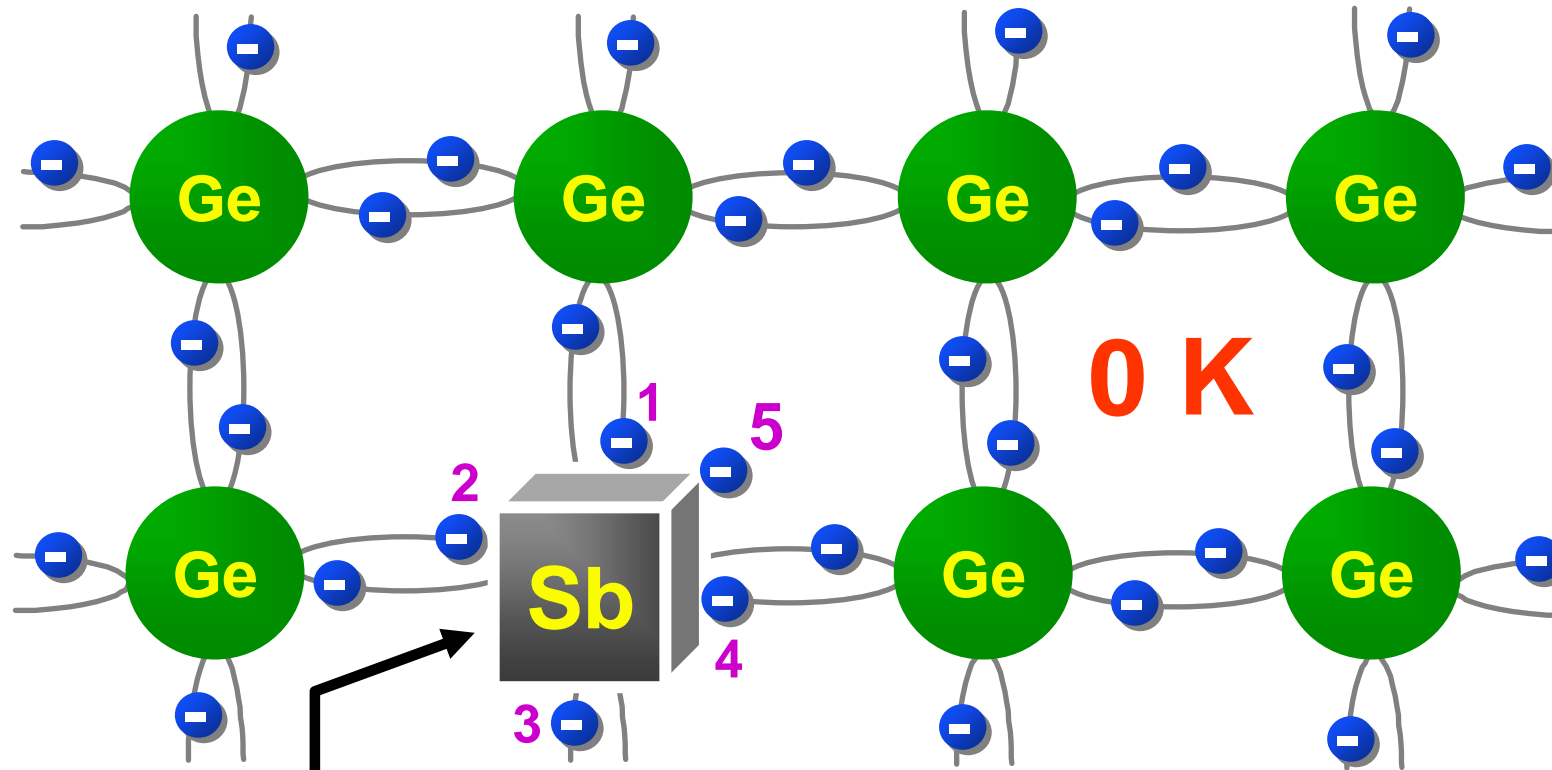
¿Puede desequilibrarse el número de electrones y de huecos?

La respuesta son los **Semiconductores Extrínsecos**



# Semiconductores Extrínsecos

Introducimos p.ej. pequeñas cantidades de impurezas del **grupo V**



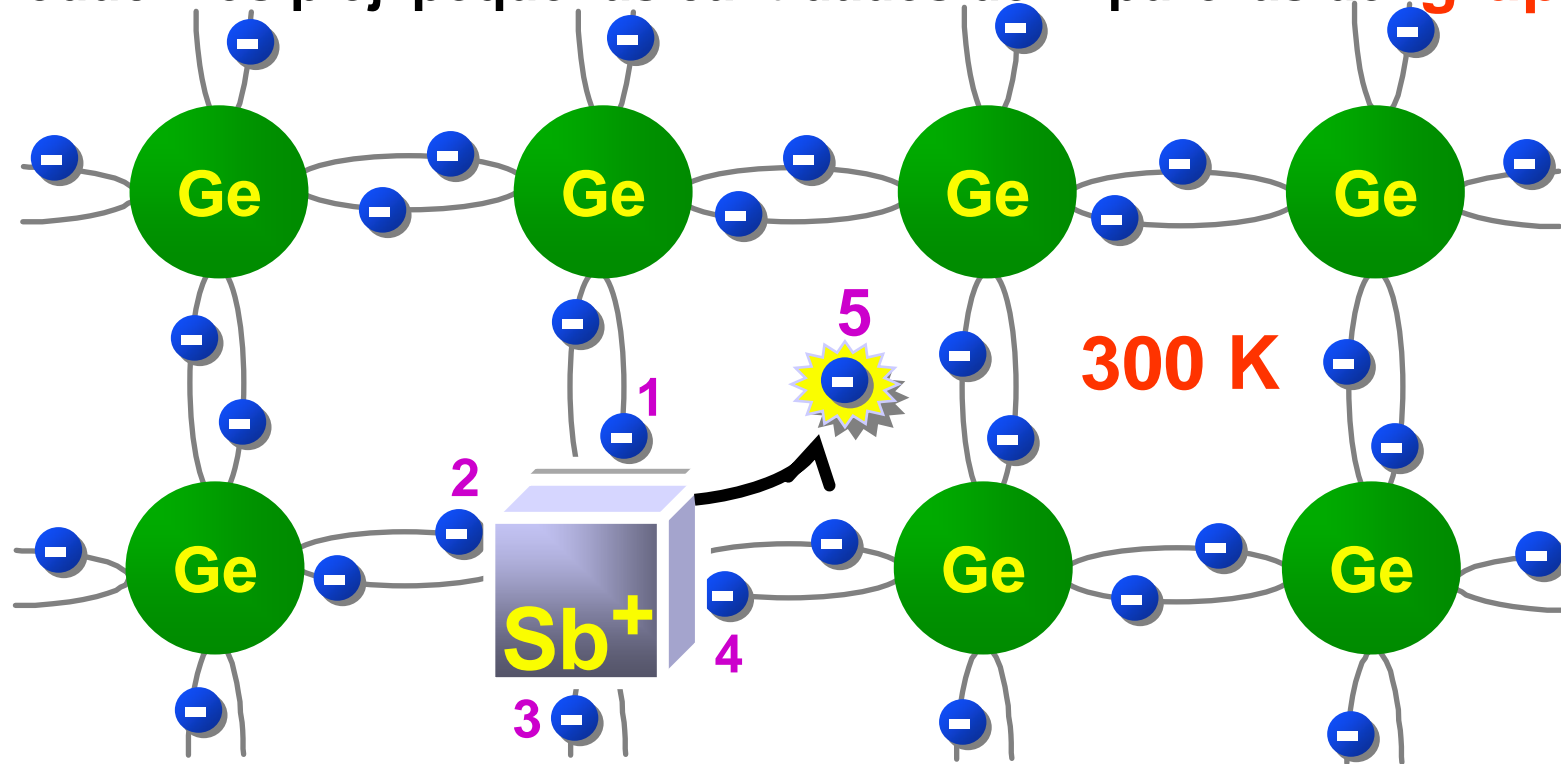
tiene 5 electrones en la última capa

A 0 K, habría un electrón adicional ligado al átomo de Sb



# Semiconductores Extrínsecos

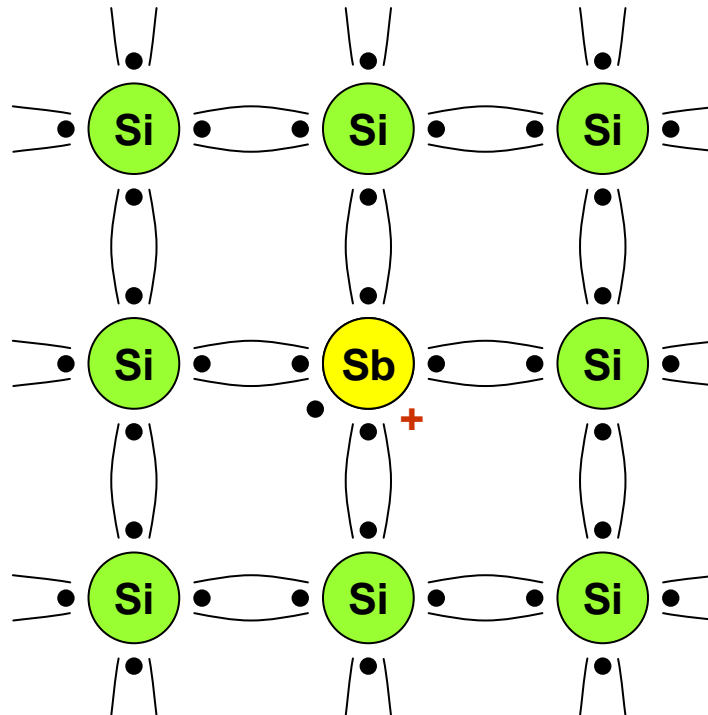
Introducimos p.ej. pequeñas cantidades de impurezas del **grupo V**



A 300 K, todos los electrones adicionales de los átomos de Sb están desligados de su átomo (pueden desplazarse y originar corriente eléctrica). El Sb es un **donador** y en el Ge hay más electrones que huecos. Es un semiconductor **tipo n.**

# Semiconductores Extrínsecos Tipo N

Semiconductor extrínseco: TIPO N



Sb: antimonio

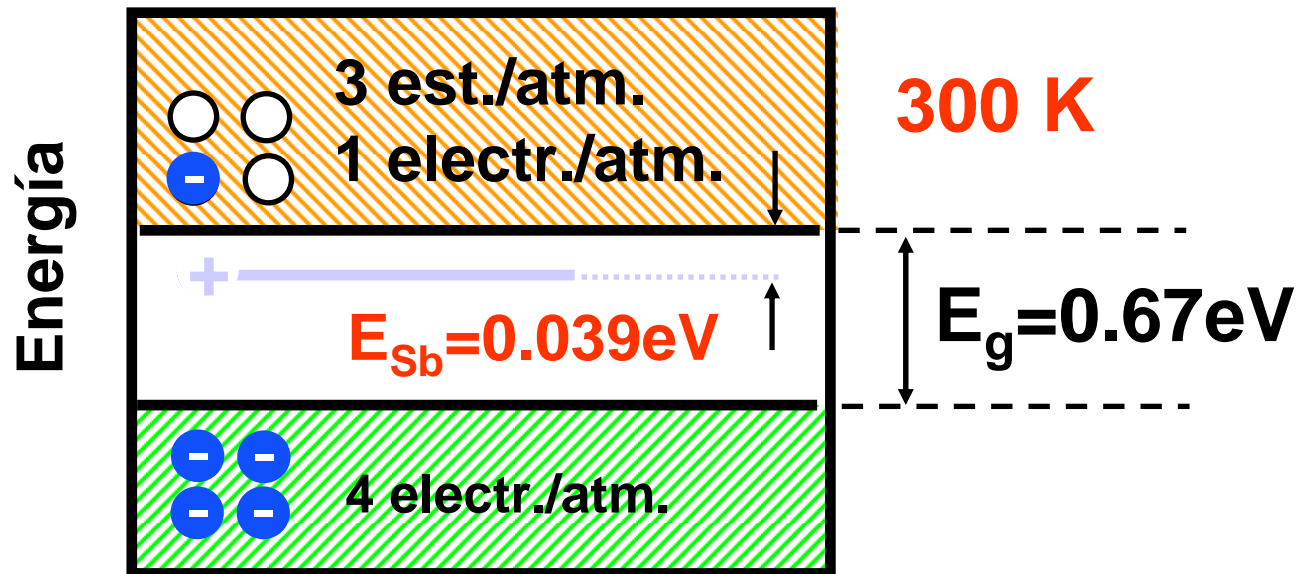
*Impurezas del grupo V de la tabla periódica*

Es necesaria muy poca energía para ionizar el átomo de Sb

**A temperatura ambiente todos los átomos de impurezas se encuentran ionizados**

# Semiconductores Extrínsecos

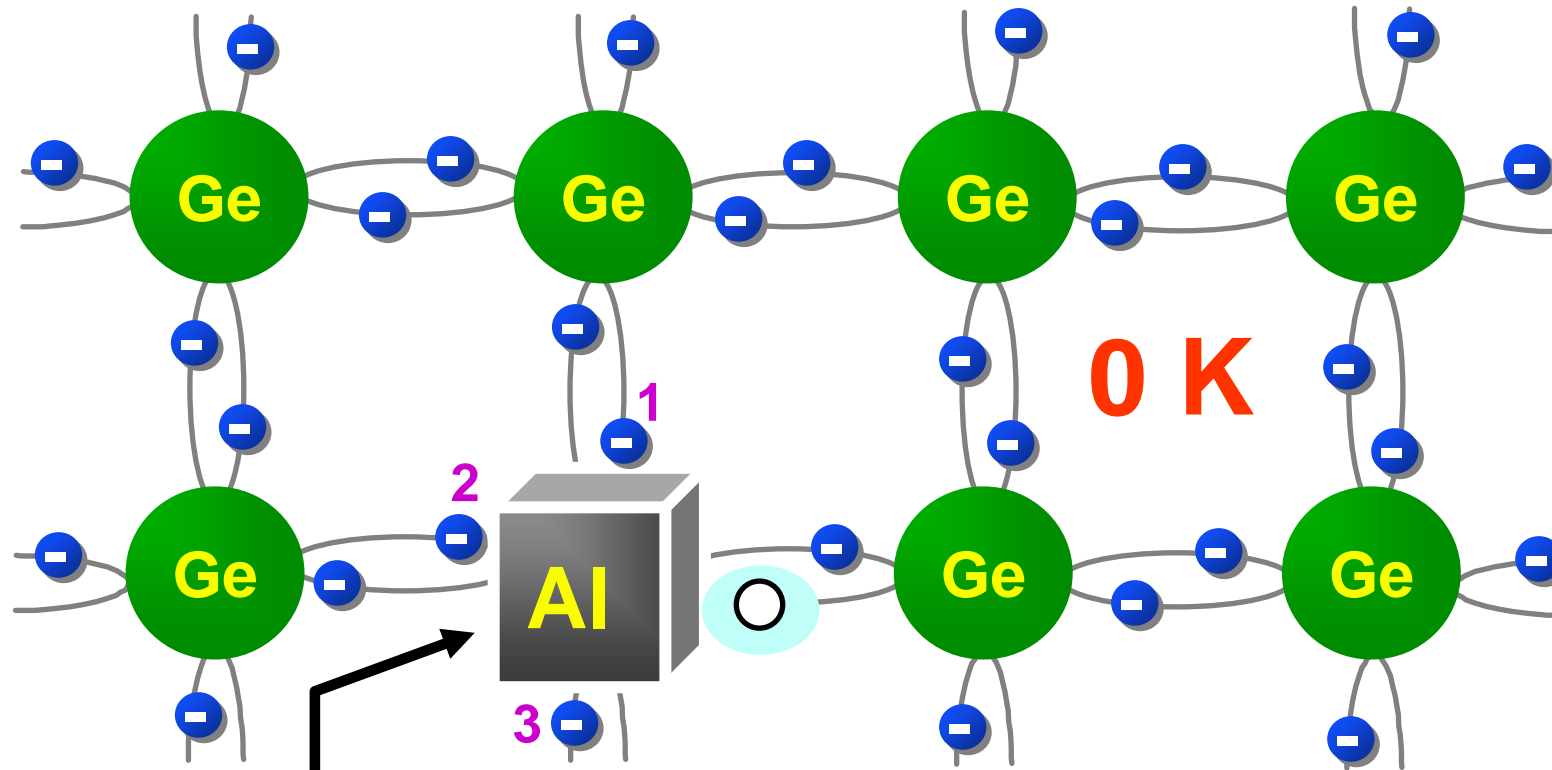
Interpretación en diagrama de bandas de un semiconductor extrínseco **tipo n**



El Sb genera un estado permitido en la banda prohibida, muy cerca de la banda de conducción. La energía necesaria para alcanzar la banda de conducción se consigue a la temperatura ambiente.

# Semiconductores Extrínsecos

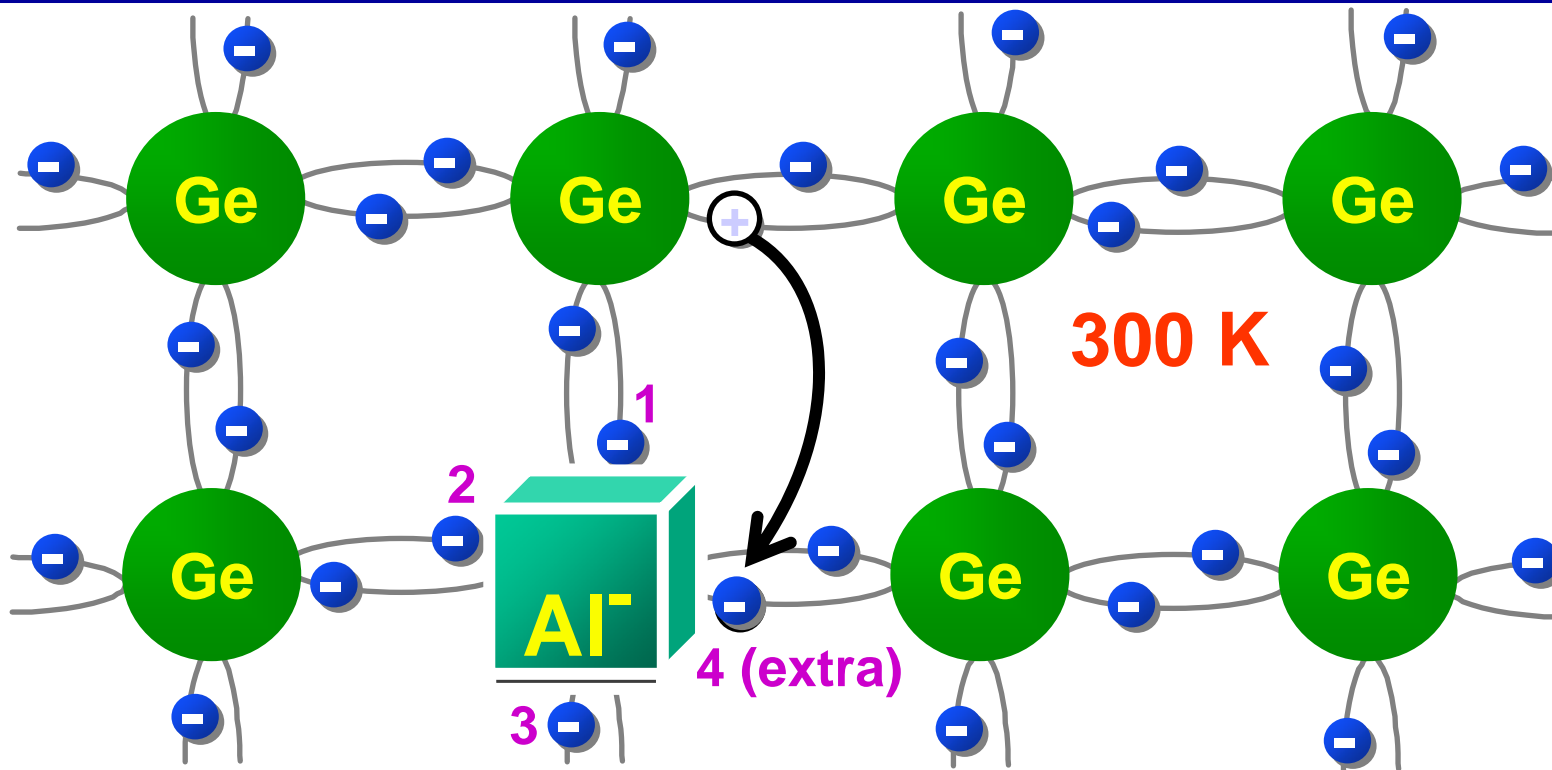
Introducimos p.ej. pequeñas cantidades de impurezas del **grupo III**



tiene 3 electrones en la última capa

A 0 K, habría una “falta de electrón” adicional ligado al átomo de Al

# Semiconductores Extrínsecos

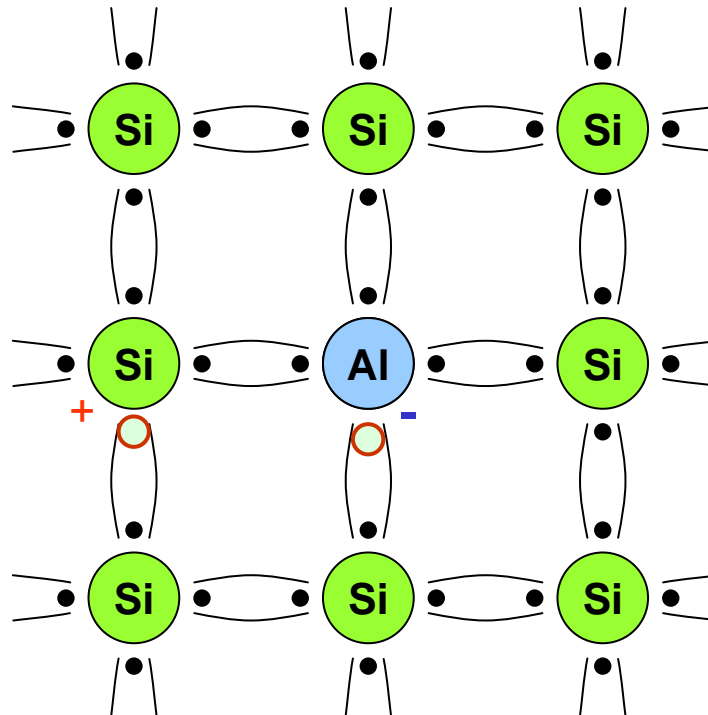


A 300 K, todas las “faltas” de electrón de los átomos de Al están cubiertas con un electrón procedente de un átomo de Ge, en el que se genera un hueco. El Al es un aceptador y en el Ge hay más huecos que electrones. Es un semiconductor tipo p.



# Semiconductores Extrínsecos Tipo P

Semiconductor extrínseco: TIPO P



Al: aluminio

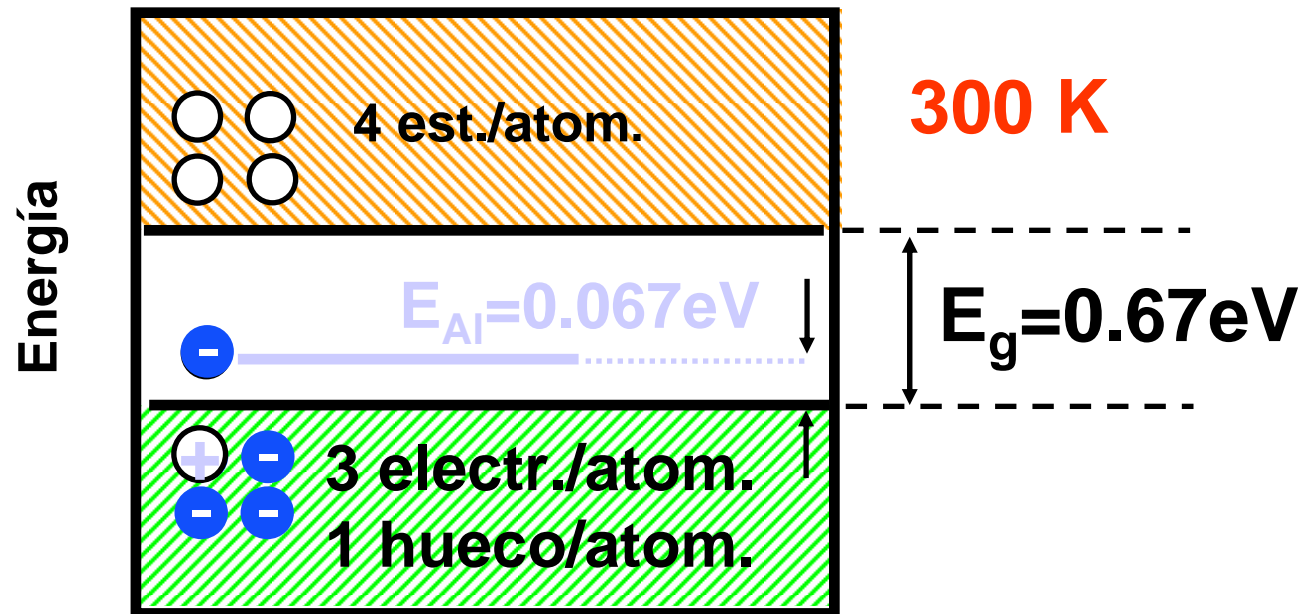
*Impurezas del grupo III de la tabla periódica*

Es necesaria muy poca energía para ionizar el átomo de Al

**A temperatura ambiente todos los átomos de impurezas se encuentran ionizados**

# Semiconductores Extrínsecos

Interpretación en diagrama de bandas de un semiconductor extrínseco **tipo p**



El Al genera un estado permitido en la banda prohibida, muy cerca de la banda de valencia. La energía necesaria para que un electrón alcance este estado permitido se consigue a la temperatura ambiente, generando un hueco en la banda de valencia.

# Resumen

---

## Semiconductores intrínsecos:

- Igual número de huecos y de electrones

## Semiconductores extrínsecos:

### Tipo p:

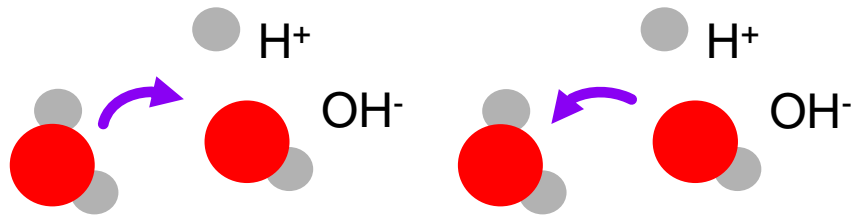
- Más huecos (*portadores mayoritarios*) que electrones (*minoritarios*)
- Impurezas del grupo III (*aceptador*)
- Todos los átomos de aceptador ionizados “-”.

### Tipo n:

- Más electrones (*portadores mayoritarios*) que huecos (*minoritarios*)
- Impurezas del grupo V (*donador*)
- Todos los átomos de donador ionizados “+”.

# Acción de masas / analogía con eq. químico

## Equilibrio químico del agua pura a 300 K (ionización del agua)



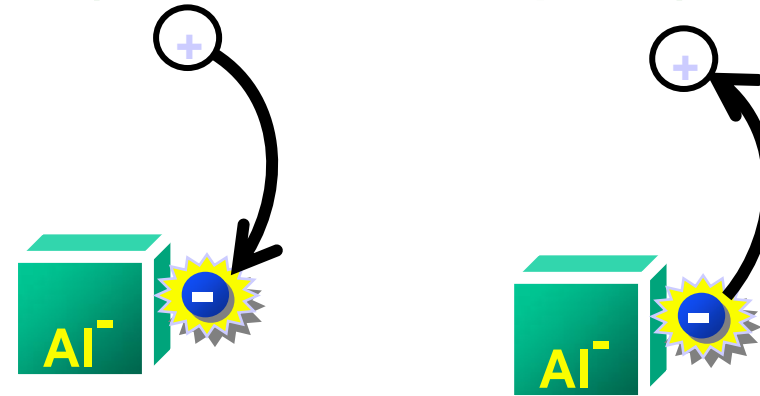
generación

recombinación

$$[H^+][OH^-] = 10^{-14} \quad (\text{para agua a 300K})$$

si añadimos un ácido, subimos  $[H^+]$  pero el producto iónico se mantiene constante.

## Equilibrio $p-n$ (ionización del dopante)



generación

recombinación

$$np = n_i^2 = 2.25 \cdot 10^{32} \quad (\text{para Si a 300K})$$

si añadimos un dopante  $n$ , subimos  $n$  pero el producto  $np$  se mantiene constante.

## Ecuaciones en los semiconductores extrínsecos

$N_d$  = concentr. donador

$N_a$  = concentr. aceptador

- donador / aceptador **se refiere siempre a electrones**
- un dopante **donador** (de electrones) se ioniza y queda cargado con **+**
- un dopante **aceptador** (de electrones) se ioniza y queda cargado con **-**

*indica el tipo de portador a  
cuya concentración nos  
referimos*

$p_n$

*indica el tipo de  
semiconductor extrínseco*

$n_n$  concentración de electrones (port. mayoritarios) en un material tipo ***n***

$n_p$  concentración de electrones (port. minoritarios) en un material tipo ***p***

$p_n$  concentración de huecos (port. minoritarios) en un material tipo ***n***

$p_p$  concentración de huecos (port. mayoritarios) en un material tipo ***p***



# Ecuaciones en los semiconductores extrínsecos

**1. Neutralidad eléctrica** (el semiconductor intrínseco es neutro y la sustancia dopante también, por lo que necesariamente lo será el semiconductor extrínseco):

$$\begin{array}{ll} \text{dopado tipo } n: & n_n = p_n + N_d \\ \text{dopado tipo } p: & p_p = n_p + N_a \\ \text{ambos dopados:} & N_d + p = n + N_a \end{array}$$

**Muy importante**

## **2. Producto np**

$$np = n_i^2$$

Simplificaciones si  $N_d \gg n_i$

$$n = N_d \quad N_d p = n_i^2$$

Simplificaciones si  $N_a \gg n_i$

$$p = N_a \quad N_a n = n_i^2$$



# Conductividad eléctrica de semiconductores

- **En general** (intrínsecos y extrínsecos):

$$\underline{J} = \underline{J}_p + \underline{J}_n = q\mu_p p \underline{E} + q\mu_n n \underline{E}$$

- y por tanto la conductividad es:

$$\sigma = q\mu_p p + q\mu_n n$$

- en un semiconductor **intrínseco**  $n = p = n_i$

$$\sigma = n_i q (\mu_p + \mu_n)$$

- en un semiconductor **extrínseco n**

$$n_n \approx N_d$$

$$p_n = \frac{n_i^2}{n_n} \approx \frac{n_i^2}{N_d}$$

$$\sigma = n_n q \mu_n$$

- en un semiconductor **extrínseco p**

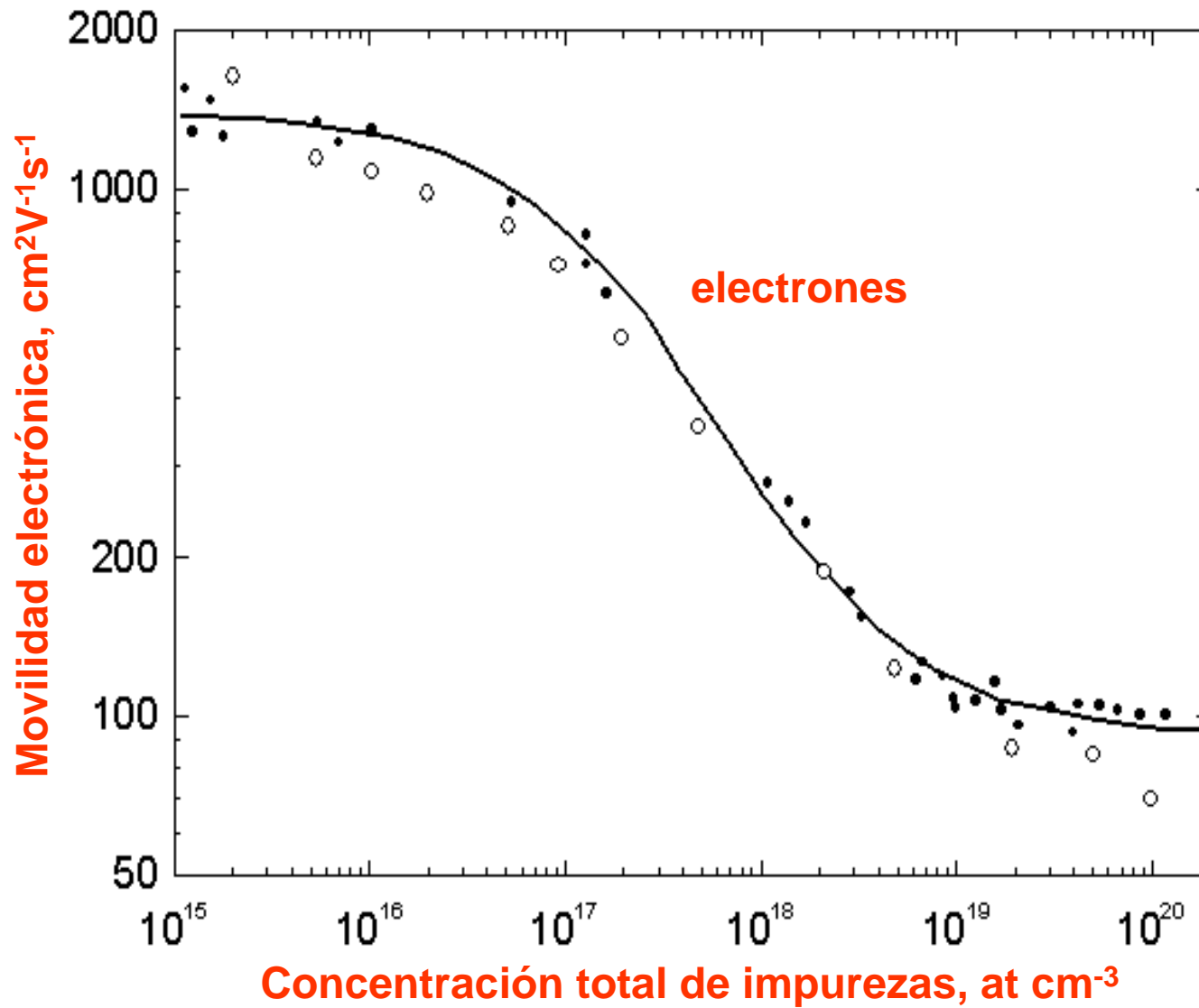
$$p_p \approx N_a$$

$$n_p = \frac{n_i^2}{p_p} \approx \frac{n_i^2}{N_a}$$

$$\sigma = p_p q \mu_p$$

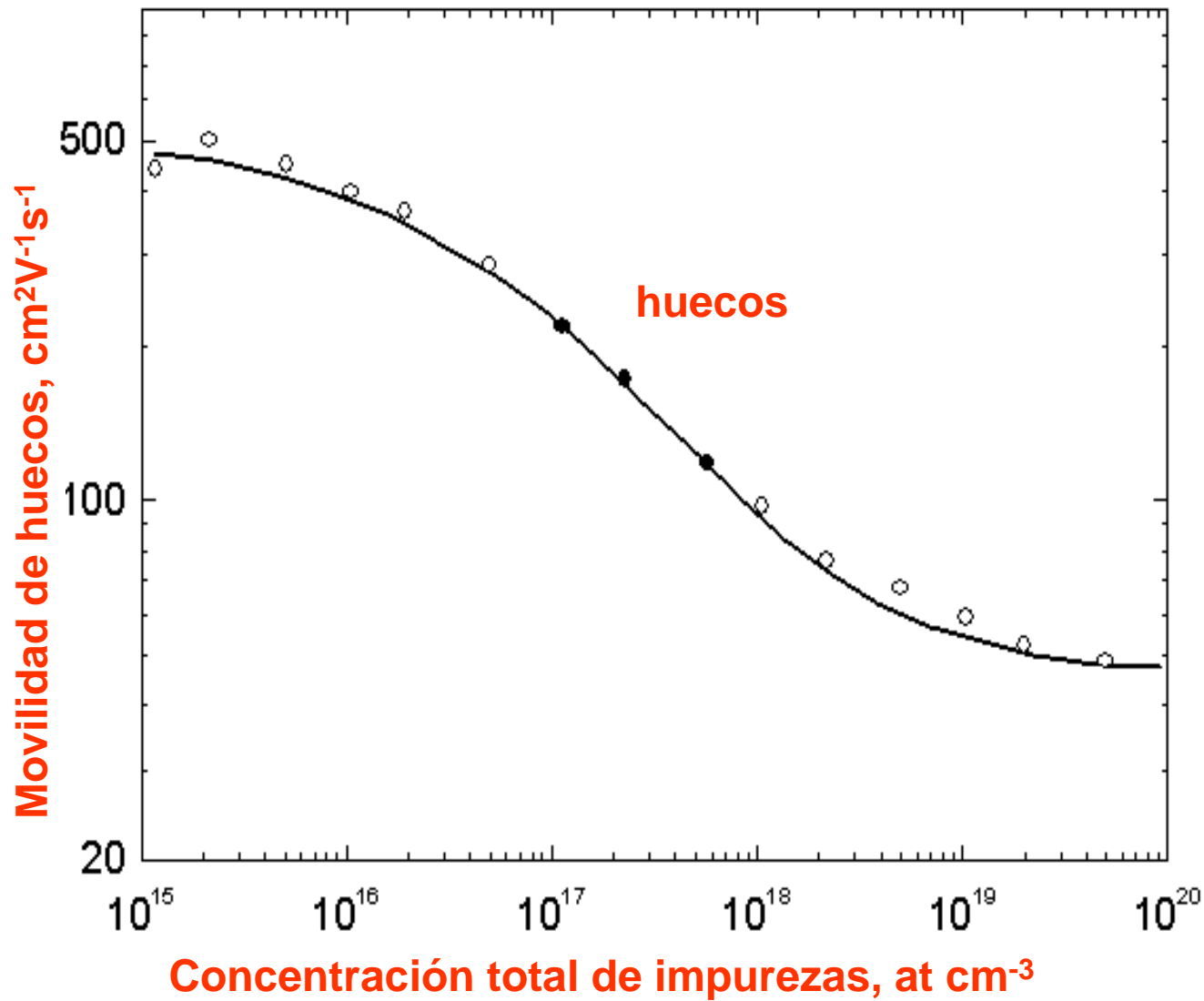


# Movilidad electrónica en Silicio extrínseco





# Movilidad de huecos en Silicio extrínseco

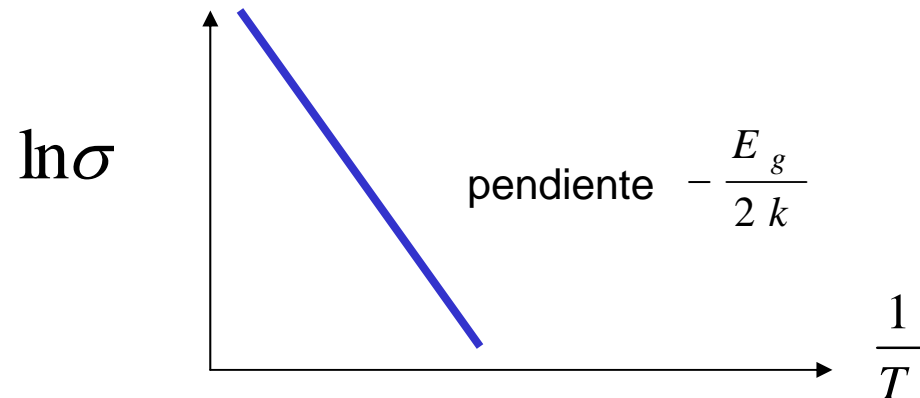


# Dependencia de la temperatura

## ➤ Semiconductores intrínsecos

- ✓ los electrones son **activados térmicamente** a la banda de conducción desde la de valencia
- ✓ la conductividad es proporcional al  $n^0$  de electrones activados al nivel de conducción, por tanto:
- ✓ dependencia tipo Arrhenius en todo el intervalo de temperatura<sup>1</sup>:

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{E_g}{2kT}}$$



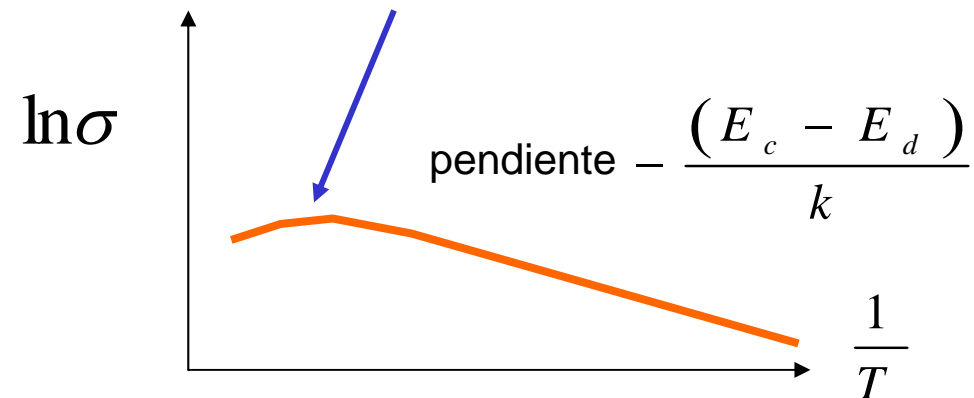
<sup>1</sup> al aumentar la temperatura se ionizan mas átomos de Si o Ge, de los cuales hay disponible un gran número (todos los del material).

# Dependencia de la temperatura

## ➤ Semiconductores extrínsecos (p.ej. tipo *n*)

- ✓ los electrones son activados térmicamente a la banda de conducción desde el nivel del dopante
- ✓ la barrera energética es mucho menor
- ✓ igualmente dependencia tipo Arrhenius pero

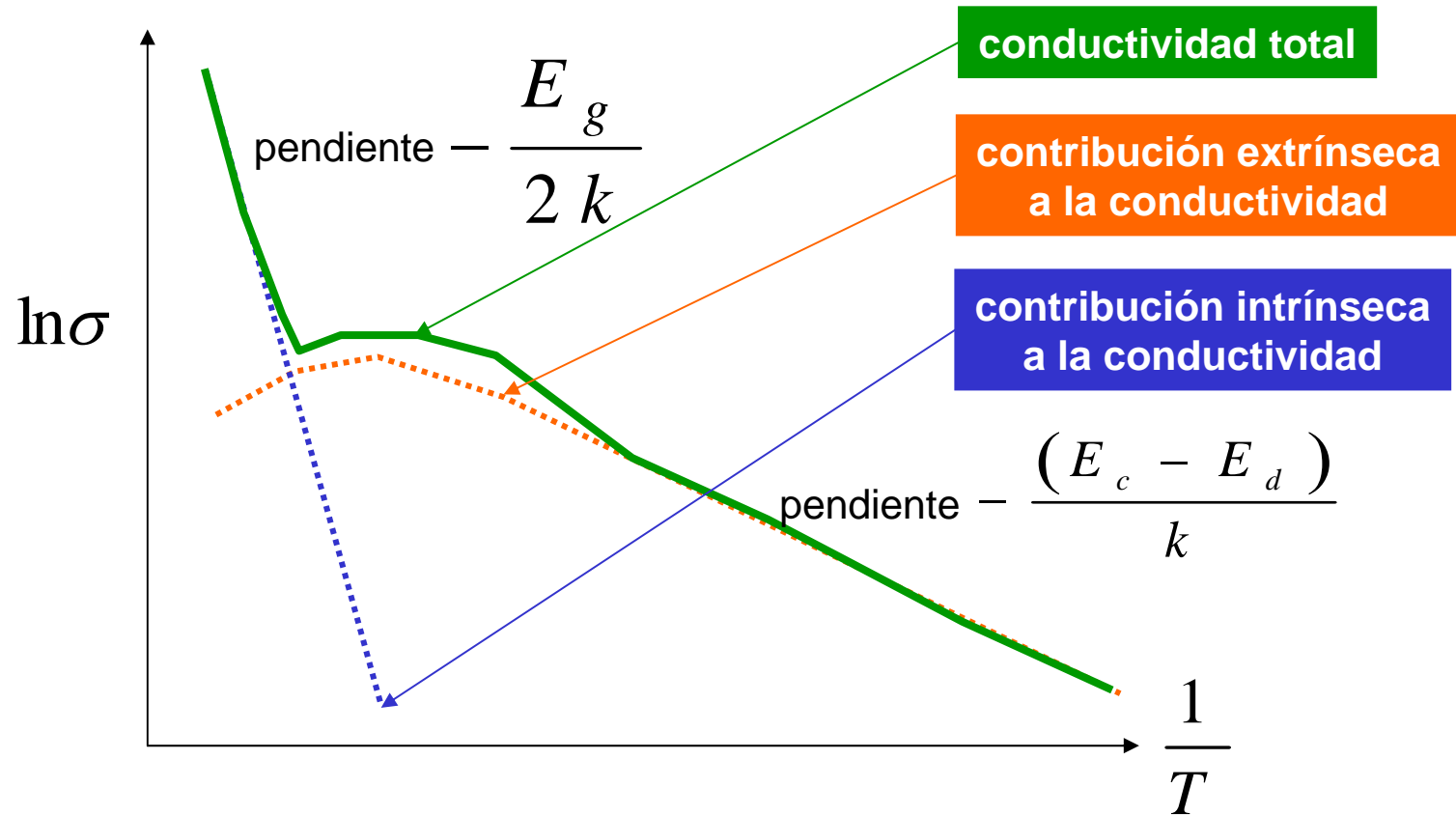
- con menor energía de activación (pendiente):  $\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{(E_c - E_d)}{kT}}$
- hasta llegar a **agotamiento** o **saturación**<sup>1</sup>



<sup>1</sup> al aumentar la temperatura se ionizan mas átomos del dopante, los cuales están disponibles en una cantidad limitada. Una vez ionizados todos los átomos del dopante, la conductividad extrínseca no puede crecer más; de hecho decrece por el aumento de la interacción electrón-cristal (mayor agitación térmica).

# Dependencia de la temperatura

➤ Semiconductores extrínsecos (tipo *n* o *p*)



# Propiedades eléctricas

---

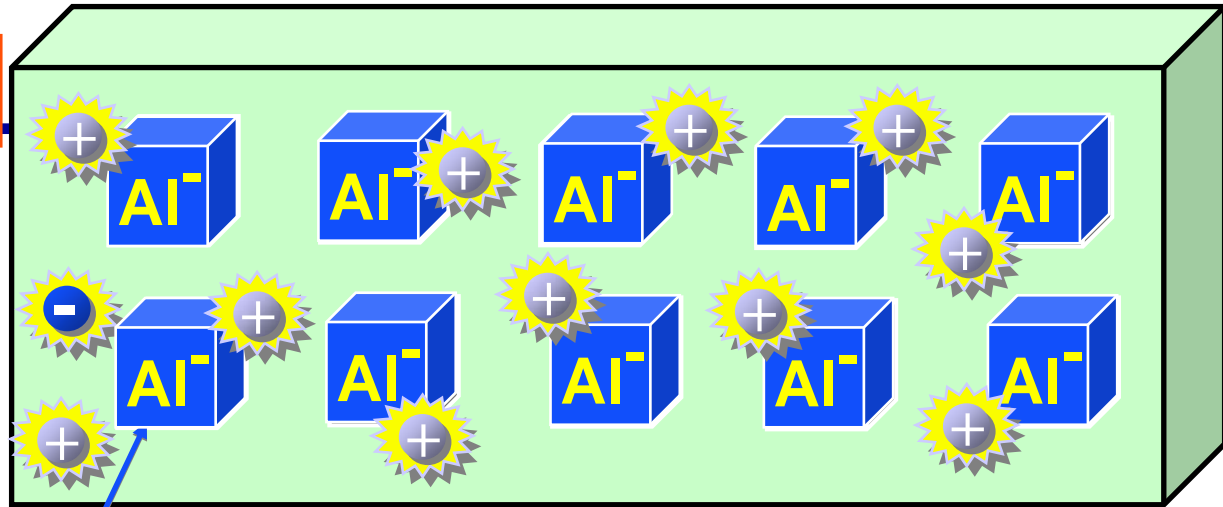
## La unión *pn*



# Germanio tipo $p$

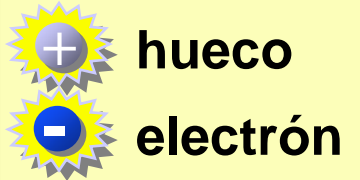
300 K

Generación  
térmica



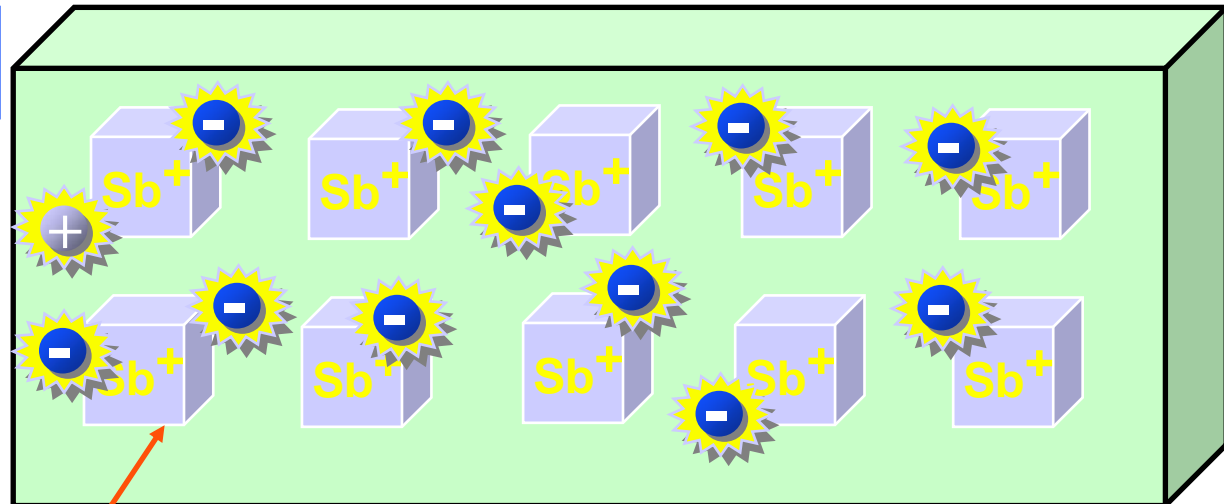
Aceptor ionizado

Germanio



# Germanio tipo $n$

Generación  
térmica



Donador ionizado

Germanio

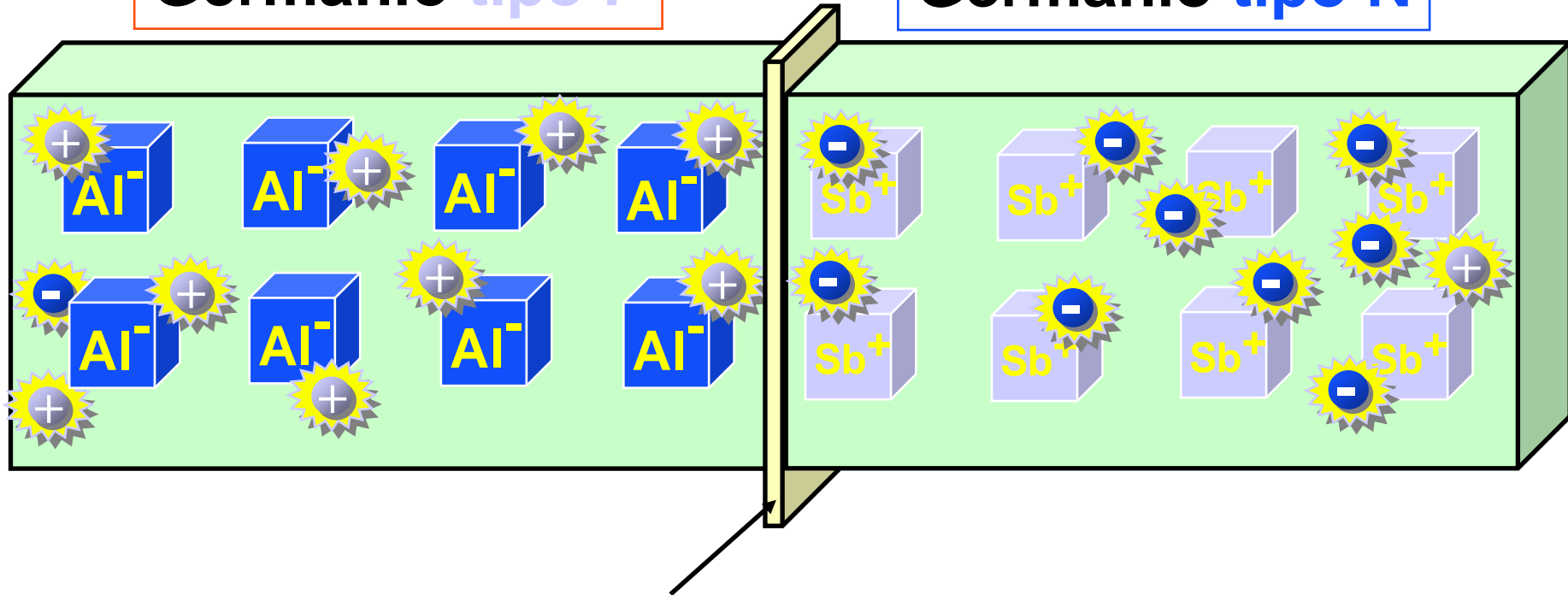
- Ambos son neutros
- Compensación de cargas e iones



# Unión PN

Germanio tipo P

Germanio tipo N



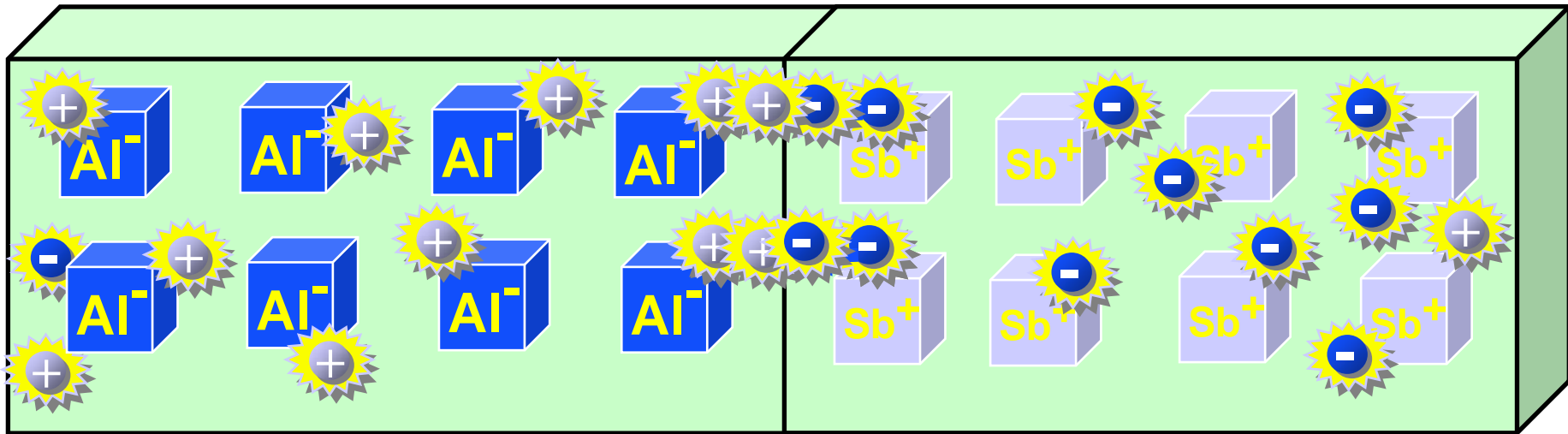
Barrera que impide la difusión

¿Qué pasaría si no existiera la barrera que impide la difusión?

# Unión PN

Germanio tipo P

Germanio tipo N



Se produce difusión de huecos de la zona *p* hacia la zona *n* y de electrones de la zona *n* hacia la zona *p*.

¿Se va a producir una difusión completa de huecos y electrones?

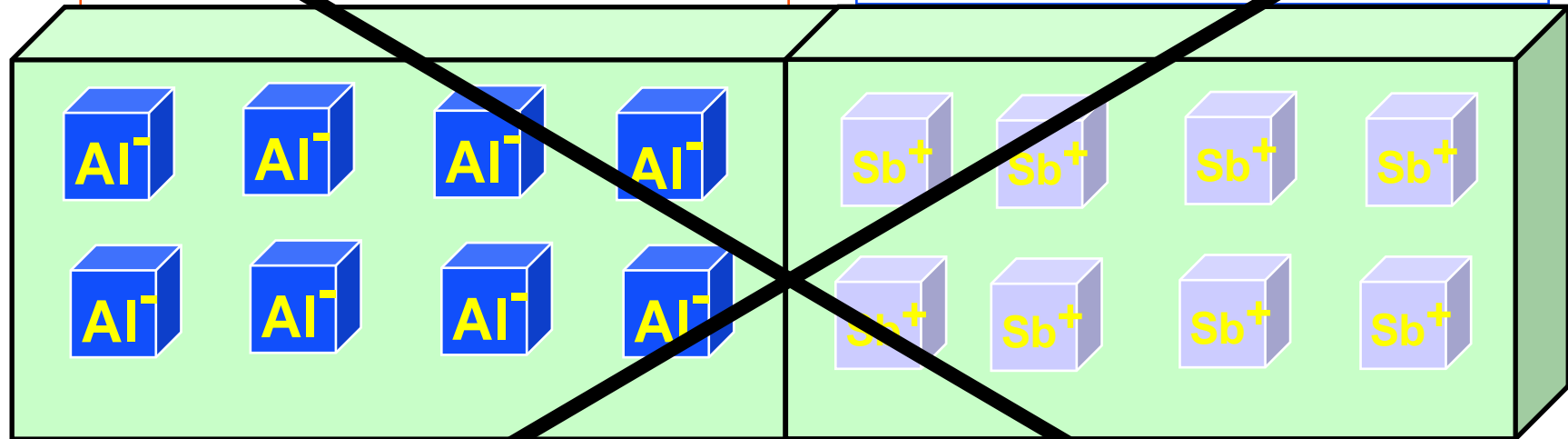


# Unión PN

¿Se va a producir una difusión completa de huecos y electrones?

Germanio "antes" tipo  $p$

Germanio "antes" tipo  $n$



Zona  $p$  no neutra, sino cargada **negativamente**

Zona  $n$  no neutra, sino cargada **positivamente**

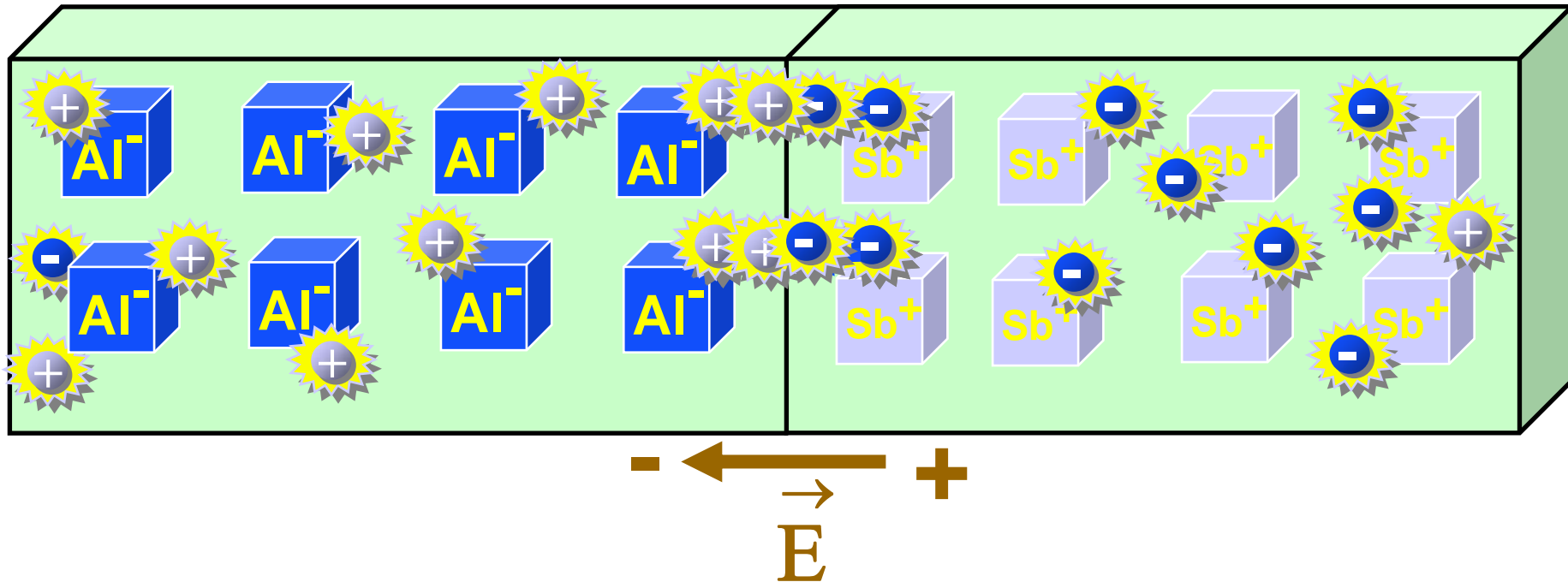
¿Es esta situación la situación final?

**NO**

# Unión $pn$

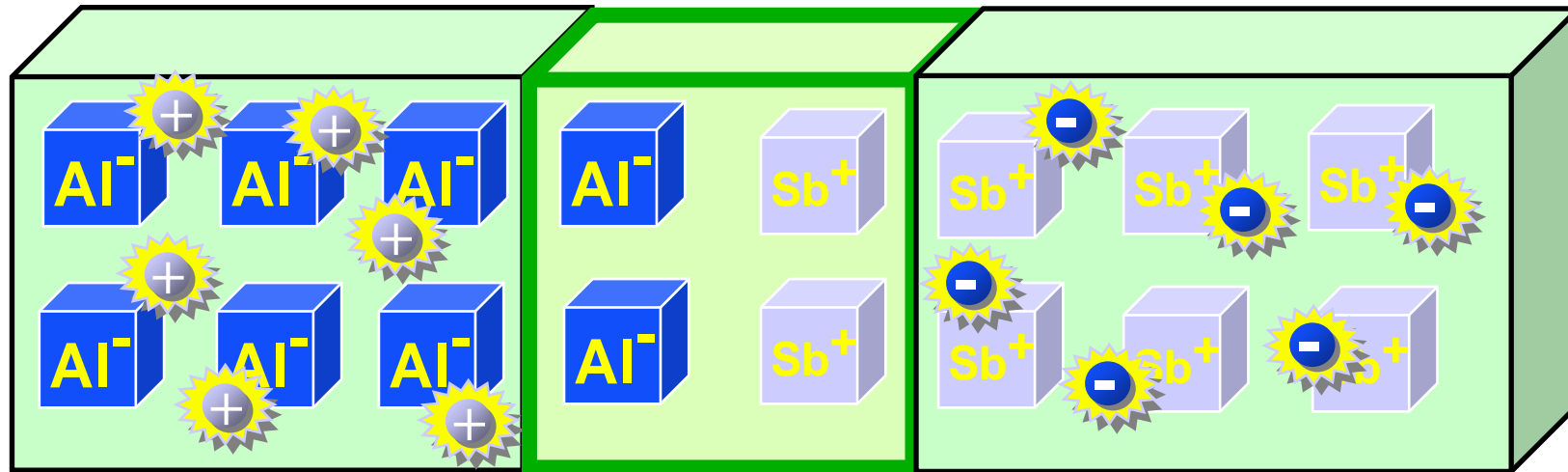
Germanio tipo  $p$

Germanio tipo  $n$

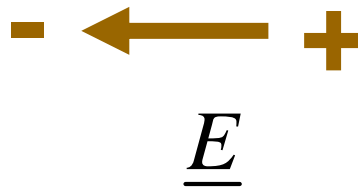


Aparece un campo eléctrico en la zona de contacto (unión metalúrgica) de las zonas

# Zonas de la unión *pn*



Zona *p* NEUTRA  
(huecos compensados  
con “iones -”)



Zona *n* NEUTRA  
(electrones compensados  
con “iones +”)

## Zona de Transición

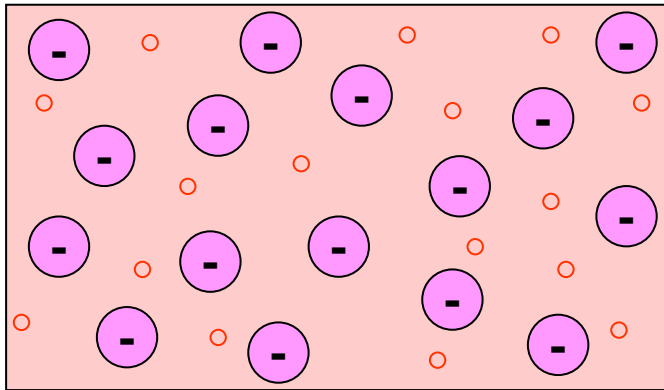
Existe carga espacial y no existen casi  
portadores de carga



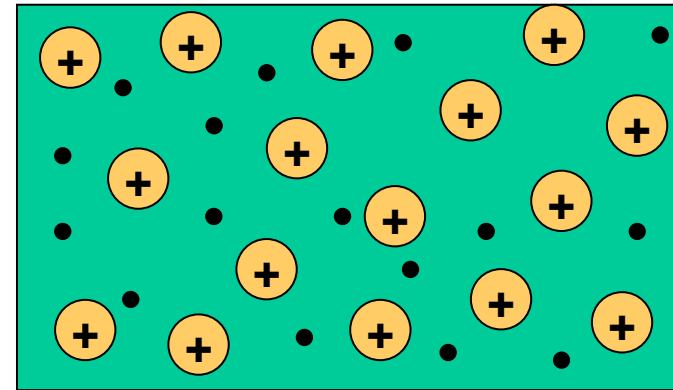
# Unión pn en equilibrio

---

La unión P-N en equilibrio



**Semiconductor tipo P**

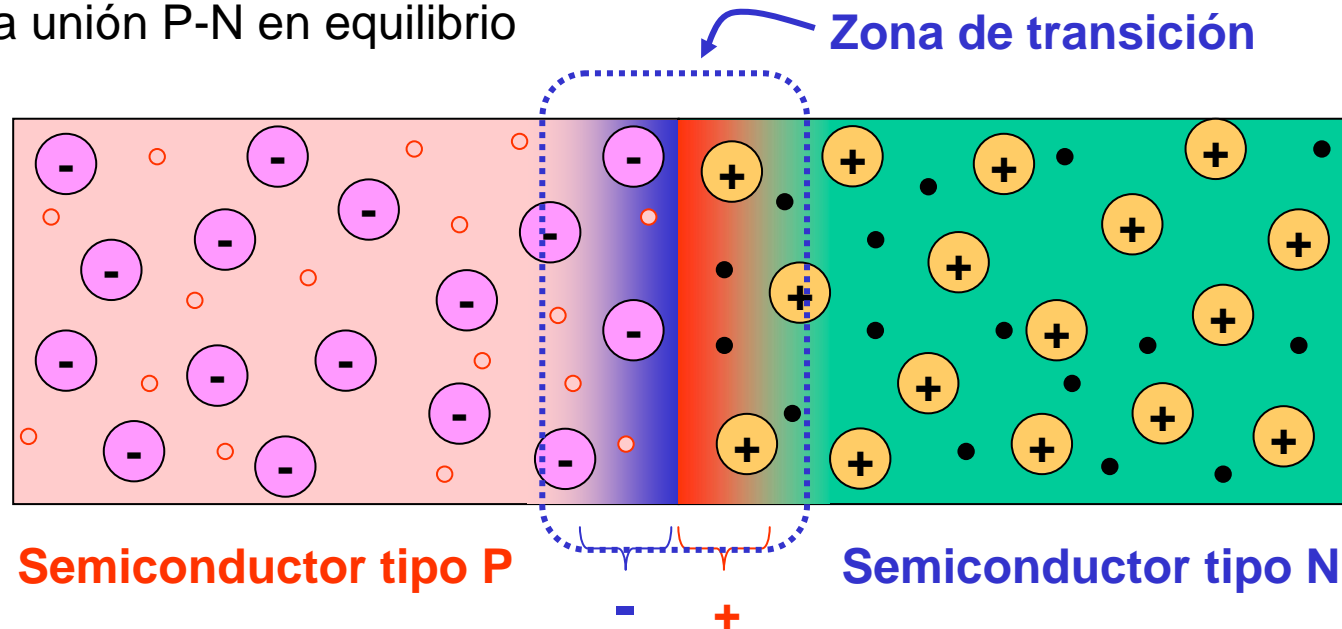


**Semiconductor tipo N**

# Unión pn en equilibrio

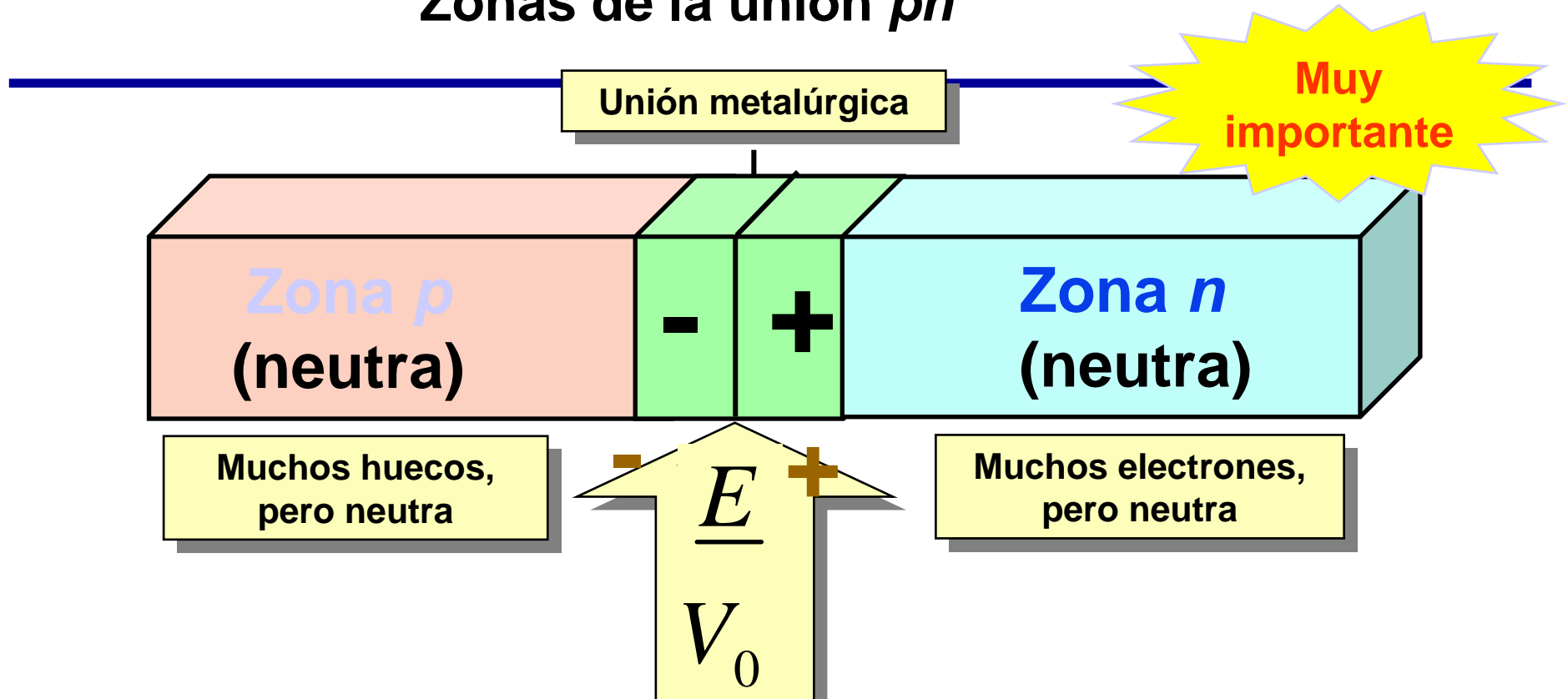
## La unión P-N

La unión P-N en equilibrio



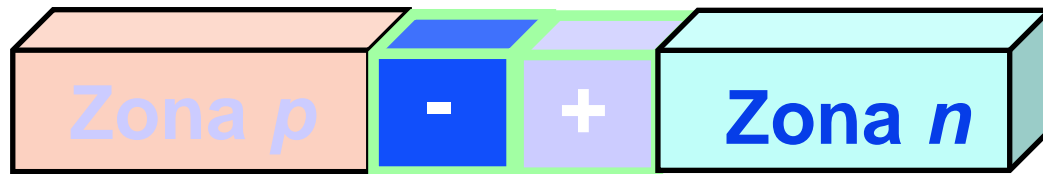
Al unir un semiconductor tipo P con uno de tipo N aparece una zona de carga espacial denominada 'zona de transición', que actúa como una barrera para el paso de los portadores mayoritarios de cada zona.

# Zonas de la unión pn

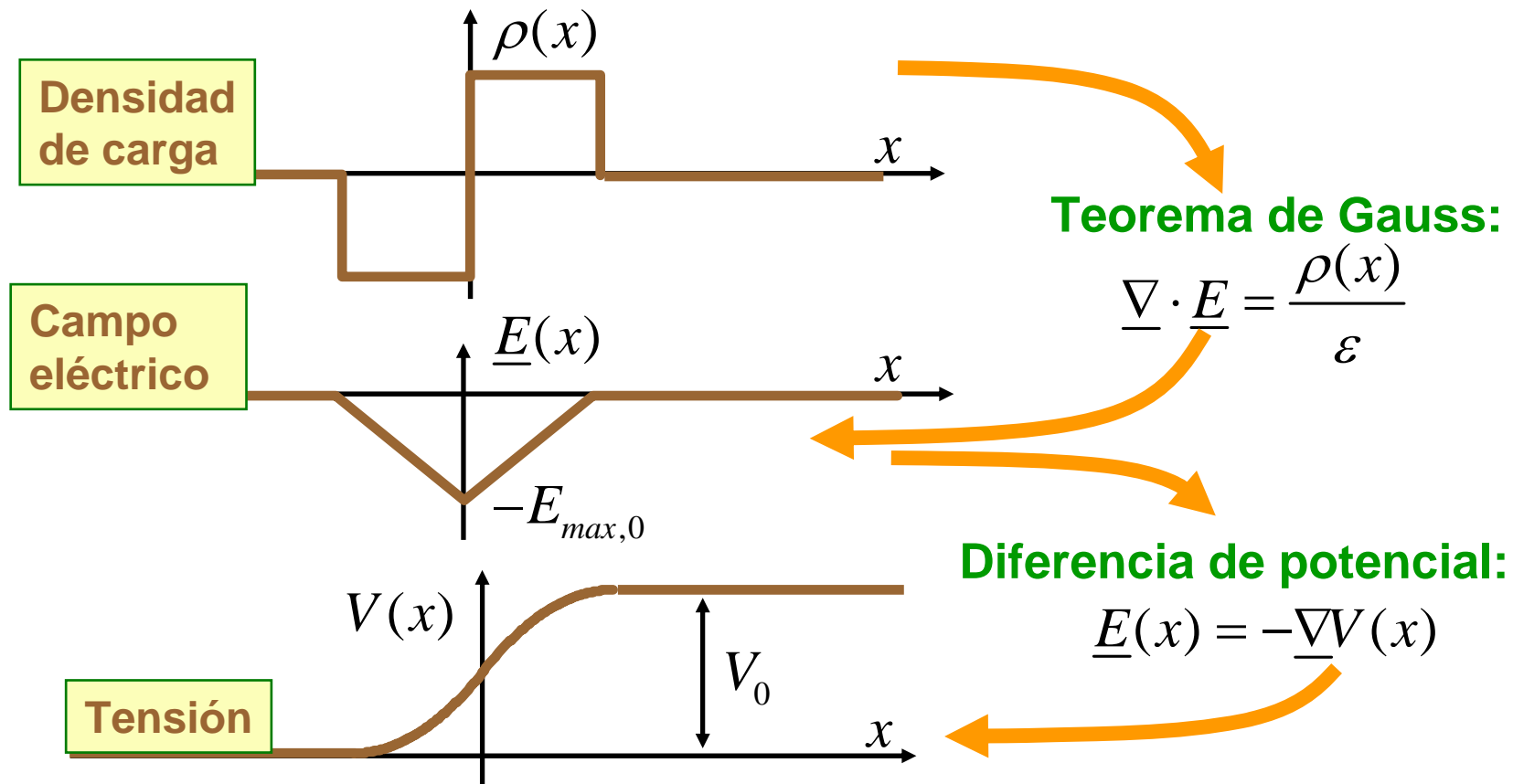


## Zona de Transición (no neutra)

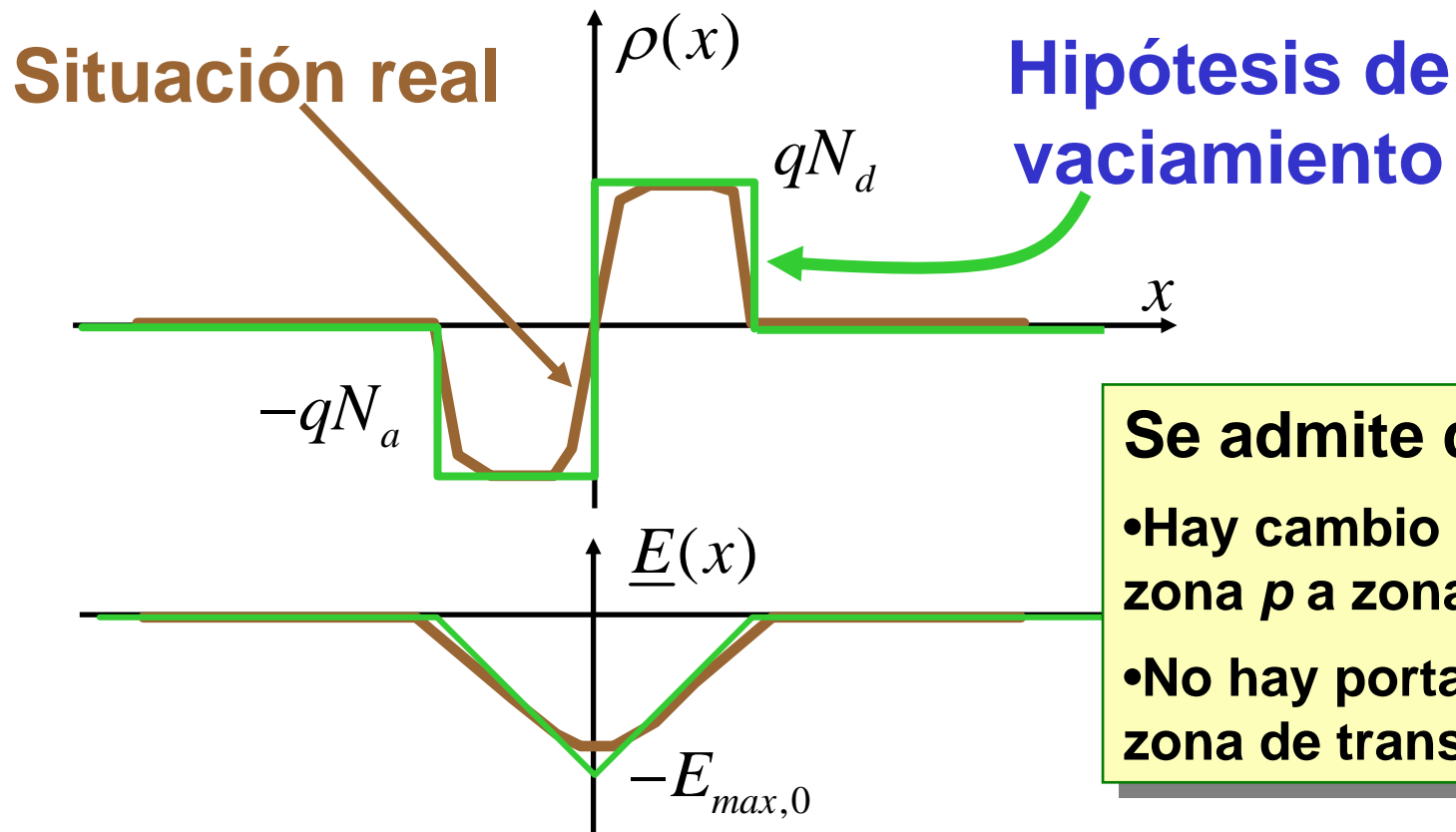
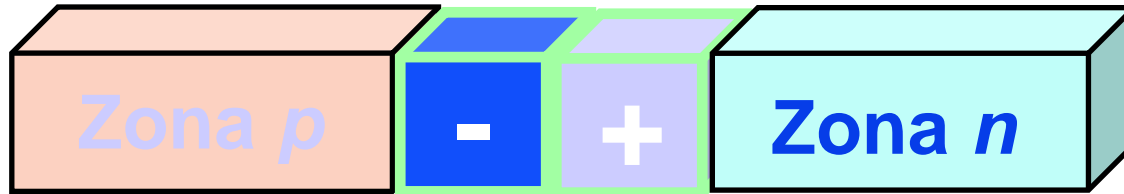
Existe carga espacial (que genera campo eléctrico,  $\vec{E}$ , y diferencia de potencial eléctrico,  $V_0$ ) y no existen casi portadores de carga.



# Relación entre $\rho$ , $E$ y $V_0$



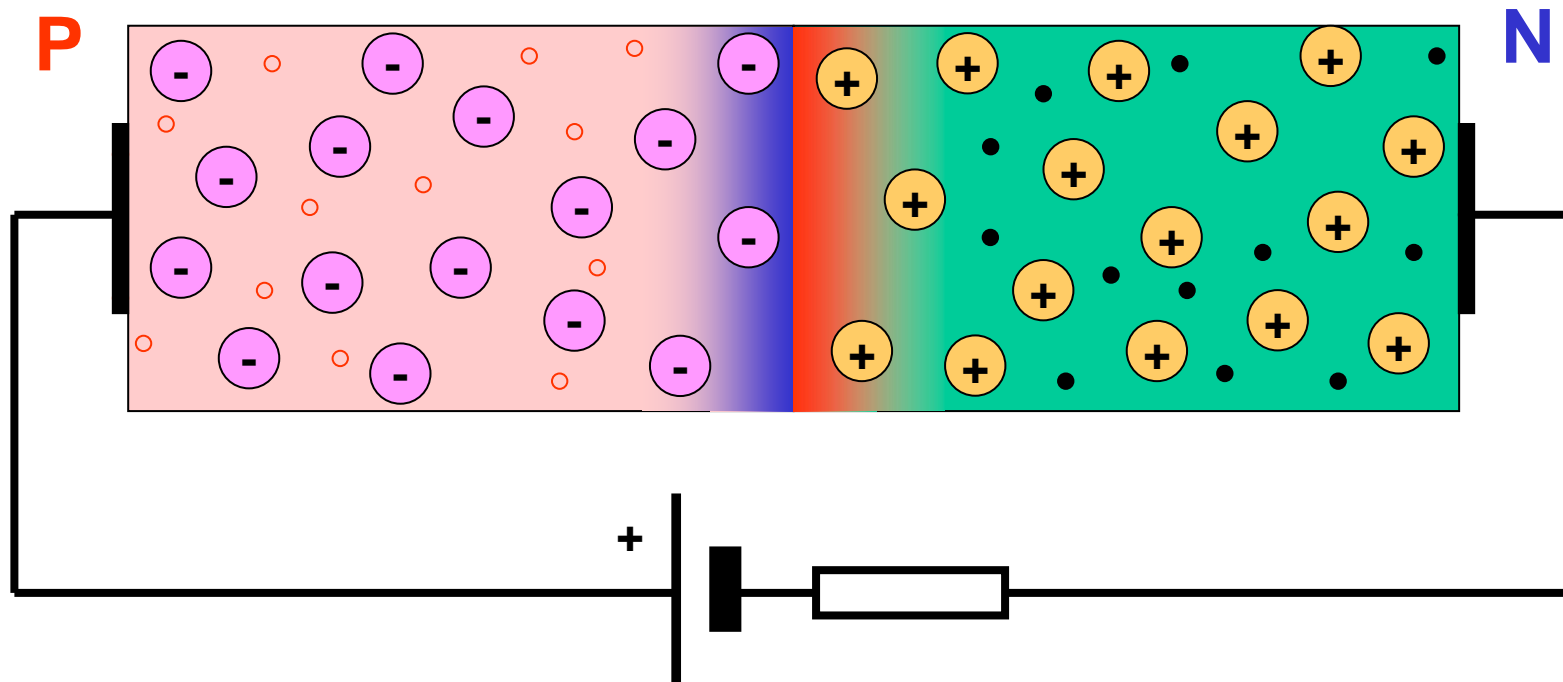
# Unión abrupta e hipótesis de vaciamiento





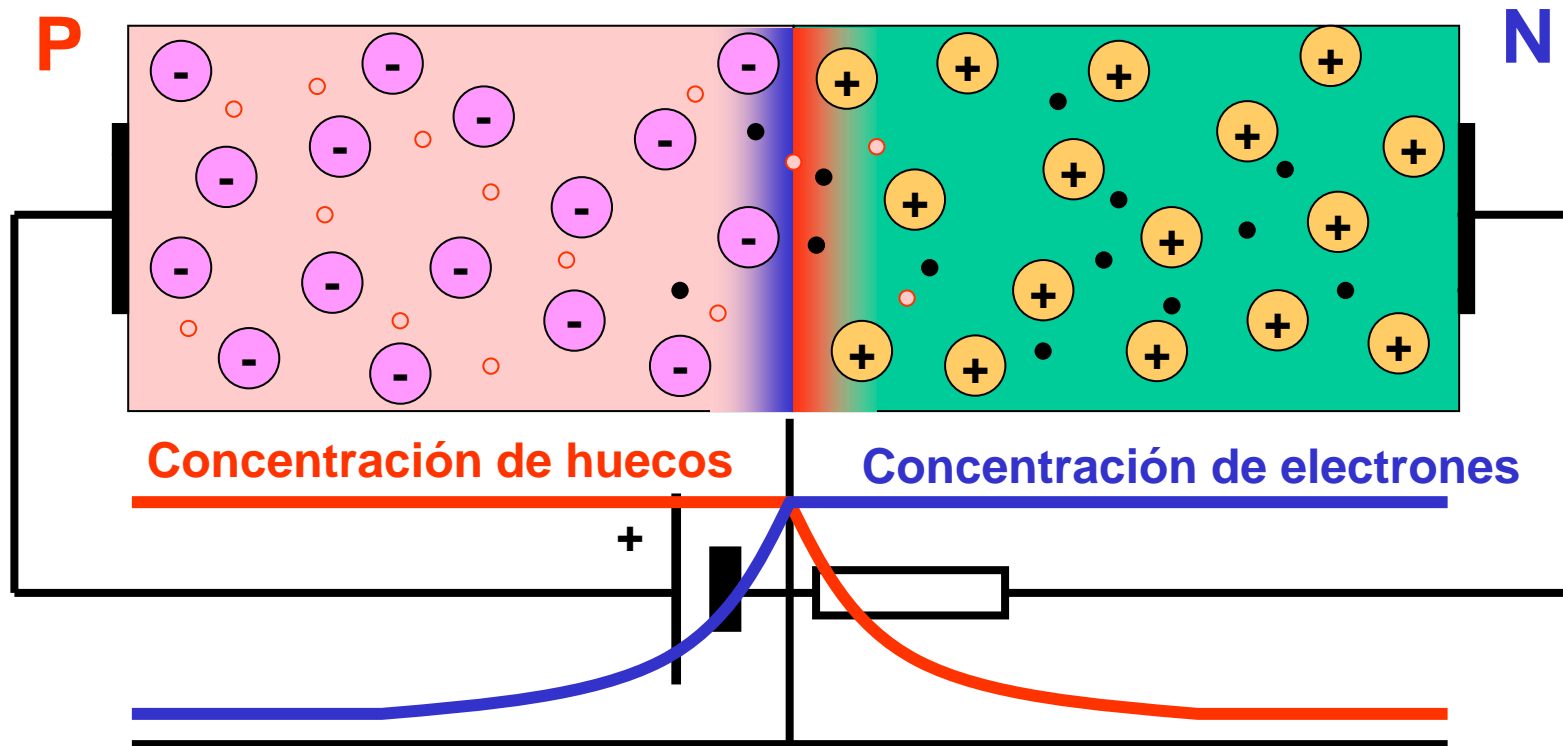
# Polarización directa de la unión pn

## Polarización directa

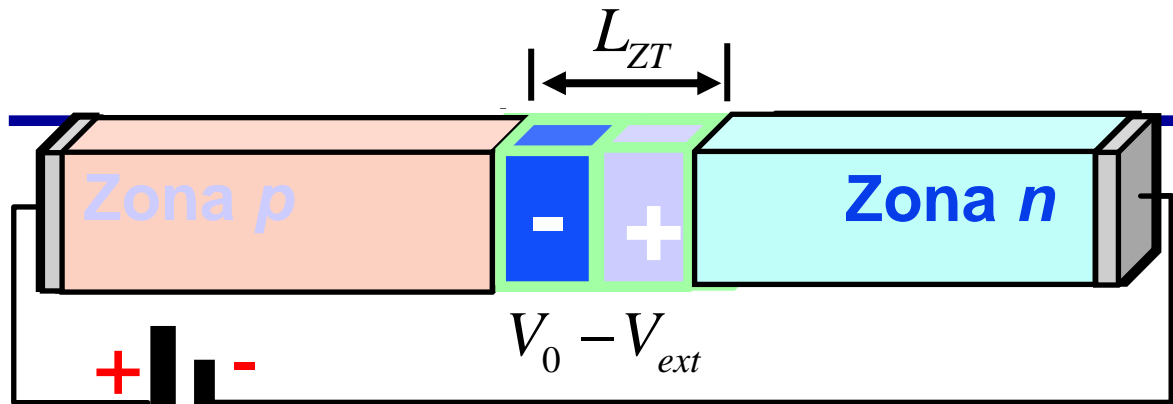


La zona de transición se hace más pequeña. La corriente comienza a circular a partir de un cierto umbral de tensión directa.

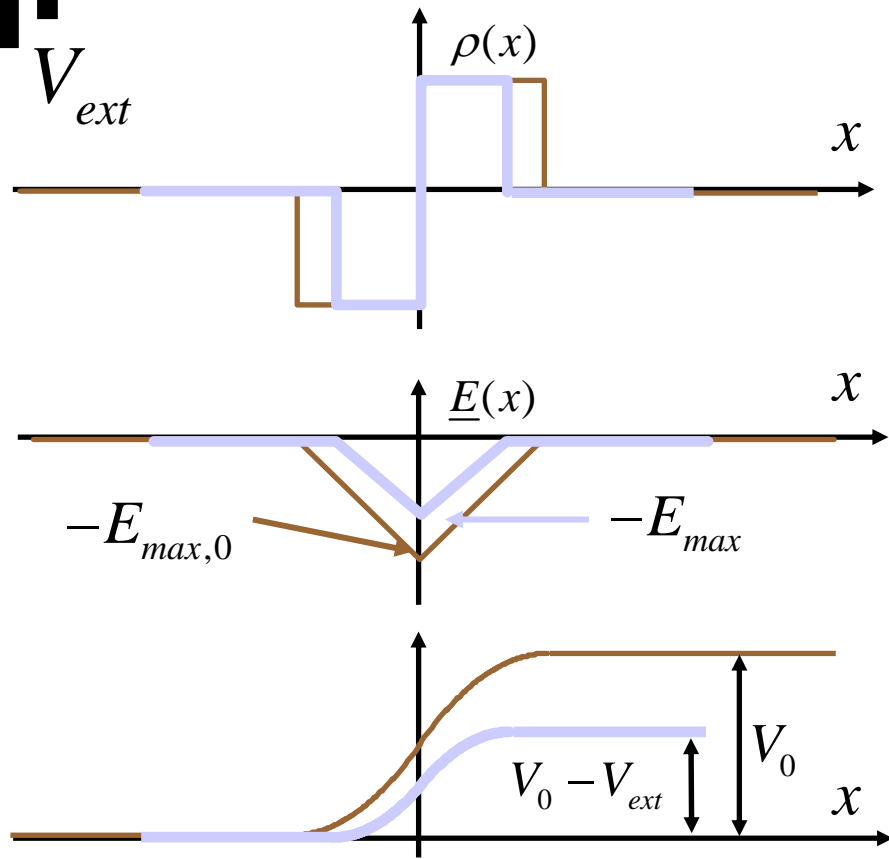
# Polarización directa de la unión pn



La recombinación electrón-hueco hace que la concentración de electrones en la zona P disminuya al alejarse de la unión.



Relaciones entre  $\rho$ ,  $\vec{E}$  y  $V_0$  con **polarización directa**

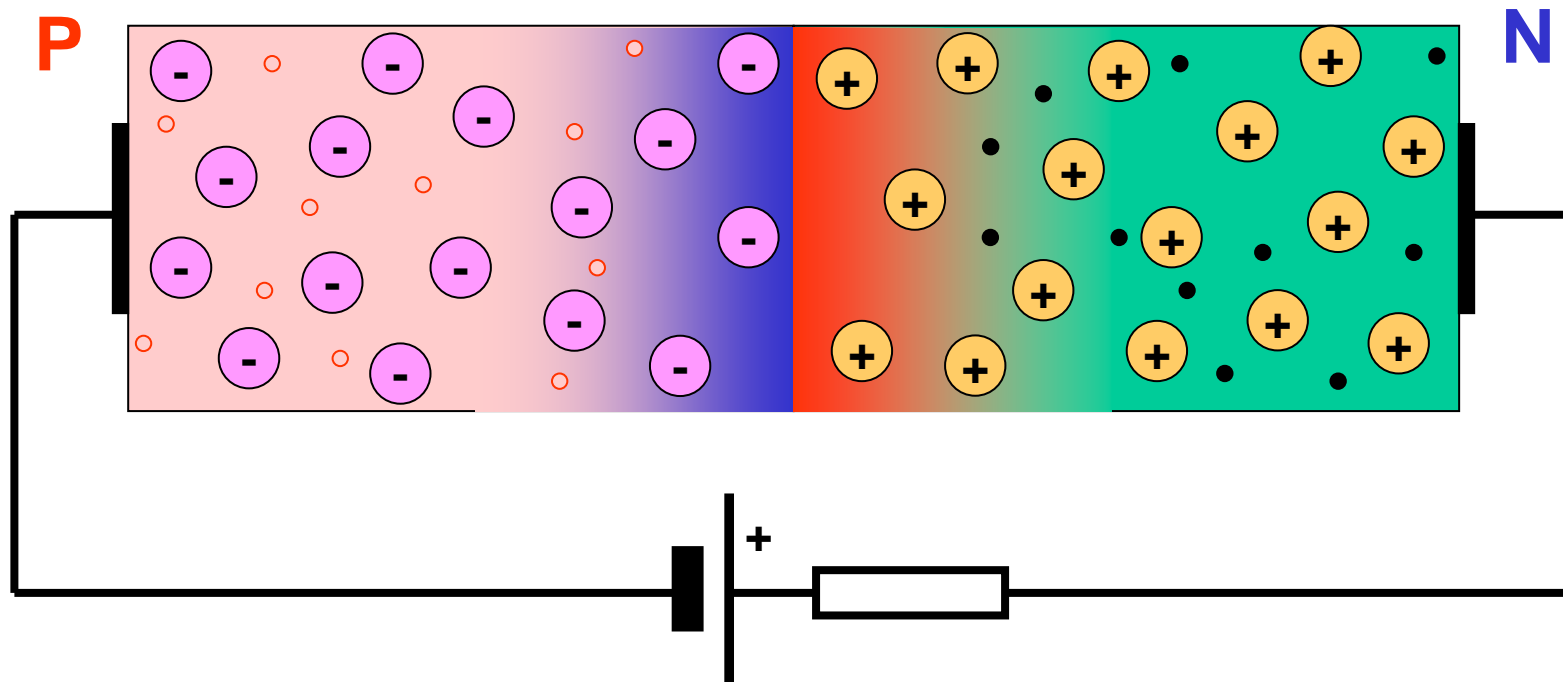


polarización directa:  
**polo +**  
conectado a  
**zona p**

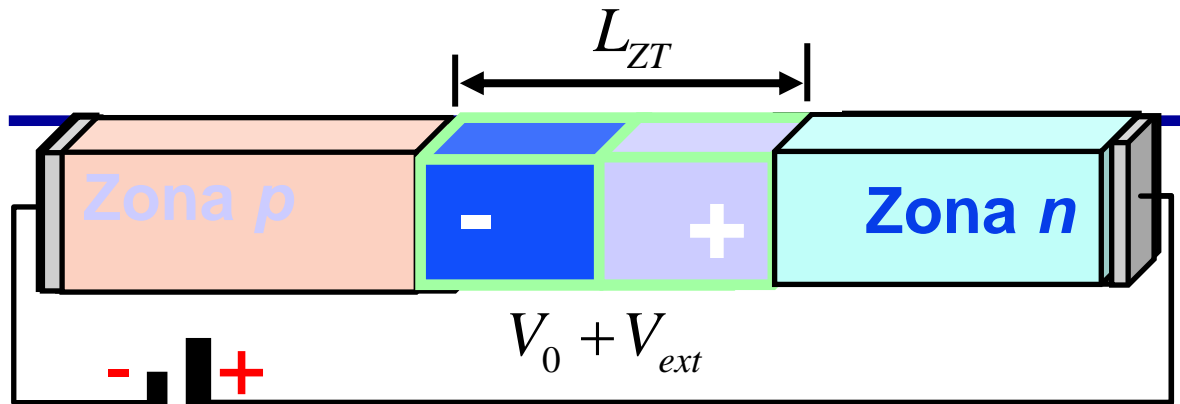
- menos carga espacial
- menor intensidad de campo
- menor potencial de contacto

# Polarización inversa de la unión pn

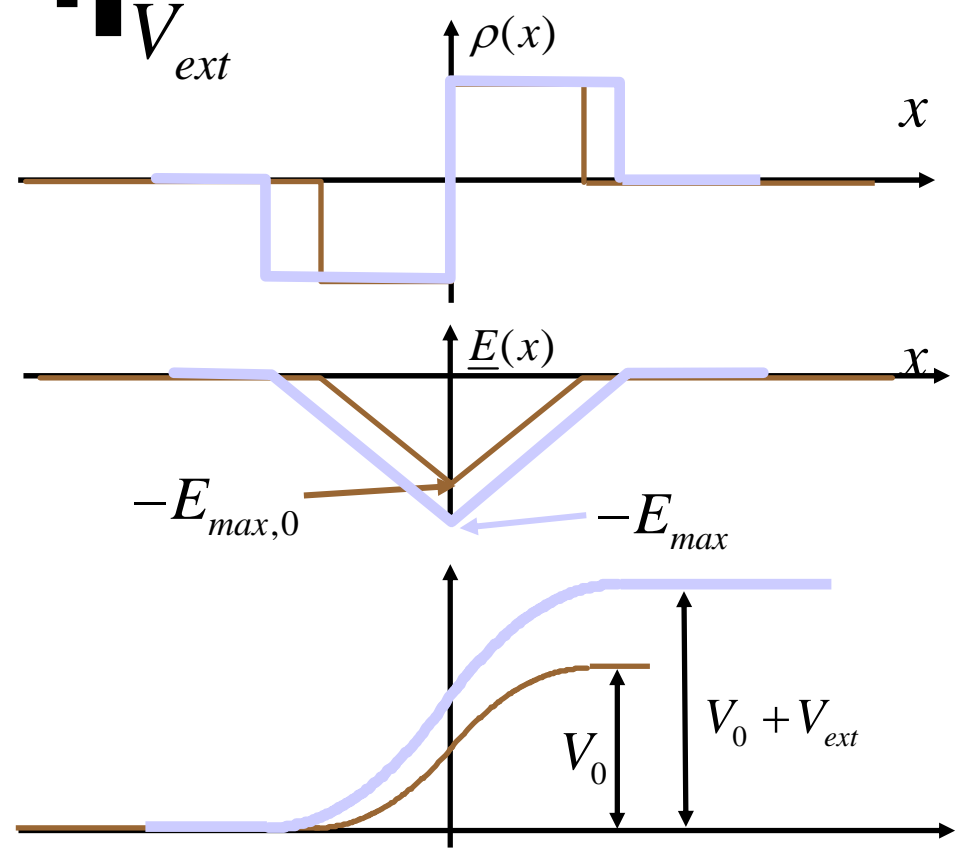
## Polarización inversa



La zona de transición se hace más grande. Con polarización inversa no hay circulación de corriente.



Relaciones entre  $\rho$ ,  $\vec{E}$  y  $V_0$  con **polarización inversa**



polarización inversa:  
**polo +**  
conectado a  
**zona n**

- más carga espacial
- mayor intensidad de campo
- mayor potencial de contacto

# Conclusiones parciales

---

## *Polarización directa:*

- Disminuye la tensión interna que frena la difusión
- Disminuye el campo eléctrico en la zona de transición
- Disminuye el ancho de la zona de transición

## *Polarización inversa:*

- Aumenta la tensión interna que frena la difusión
- Aumenta el campo eléctrico en la zona de transición
- Aumenta el ancho de la zona de transición



# Ejemplo 1: unión de Germanio sin polarizar

## Datos del Ge a 300 K

$$D_p = 50 \text{ cm}^2/\text{s}$$

$$\mu_p = 1900 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$$

$$L_p = 0.22 \text{ mm}$$

$$D_n = 100 \text{ cm}^2/\text{s}$$

$$\mu_n = 3900 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$$

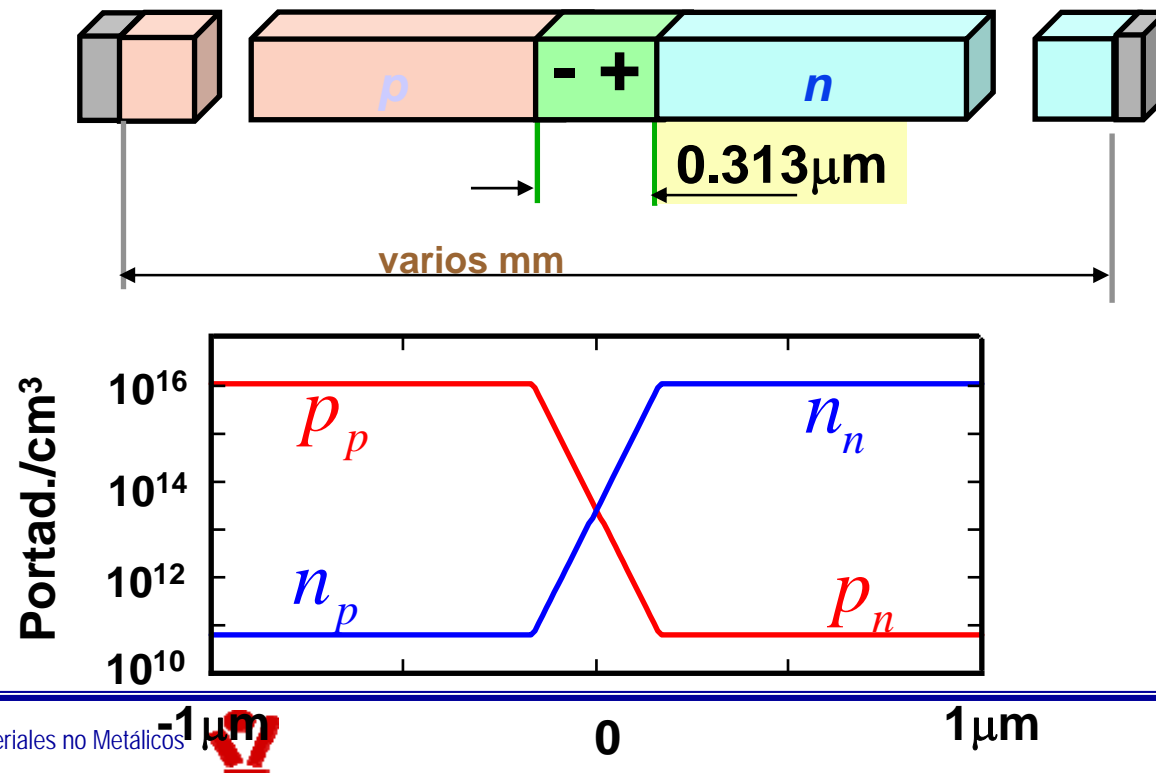
$$L_n = 0.32 \text{ mm}$$

$$n_i = 2.5 \cdot 10^{13} \text{ port/cm}^3$$

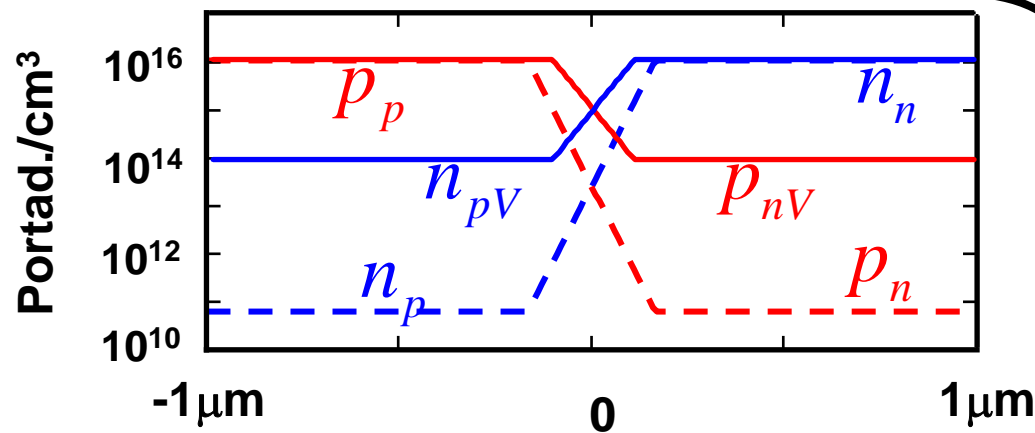
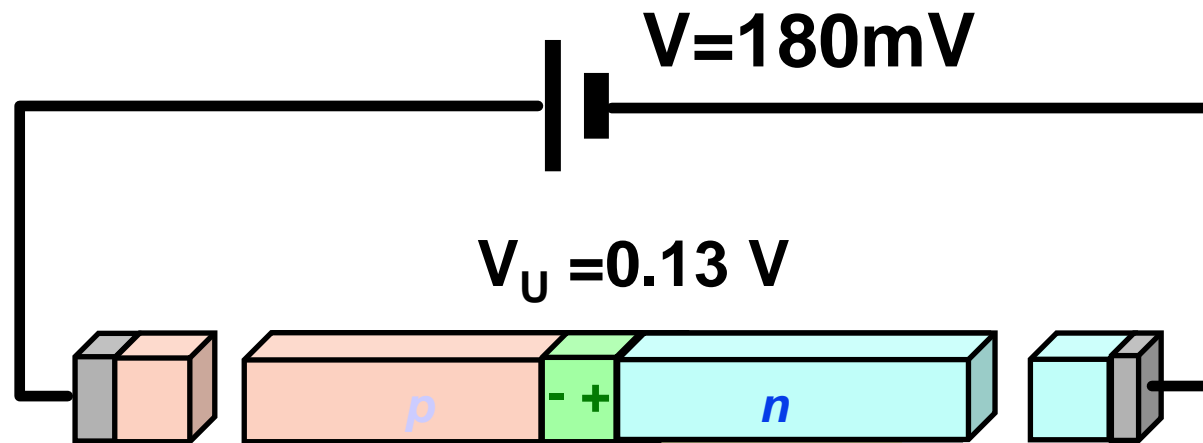
$$\epsilon_r = 16$$

$$\tau_p = \tau_n = 10 \mu\text{s}$$

$$N_a = 10^{16} \text{ atm/cm}^3 \quad V_0 = 0.31 \text{ V} \quad N_d = 10^{16} \text{ átomos/cm}^3$$



# Ejemplo 1 con polarización directa

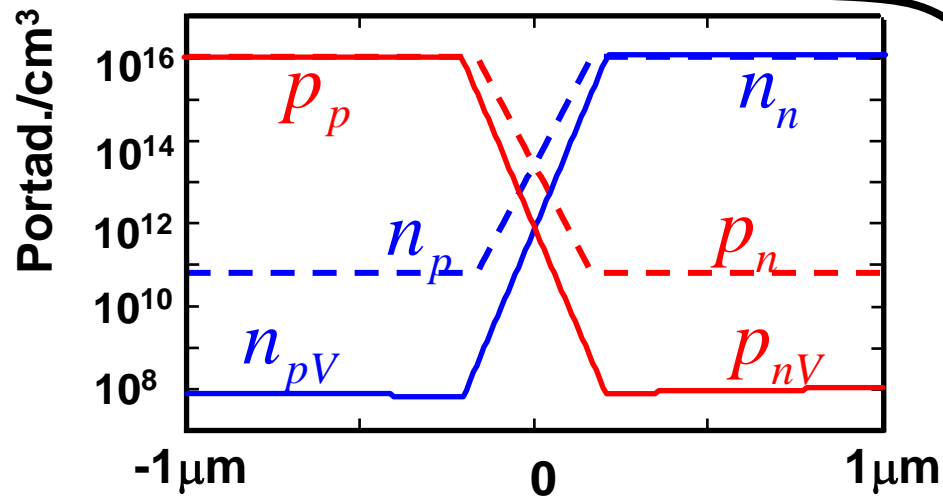
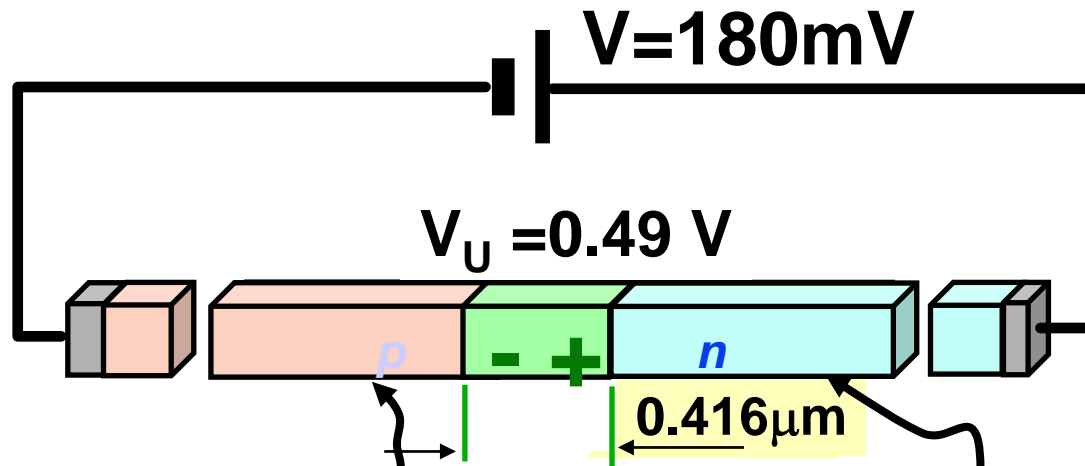


En esta parte del cristal se produce un aumento muy fuerte de los minoritarios.





# Ejemplo 1 con polarización inversa



En esta parte del cristal se produce una disminución muy fuerte de los minoritarios.

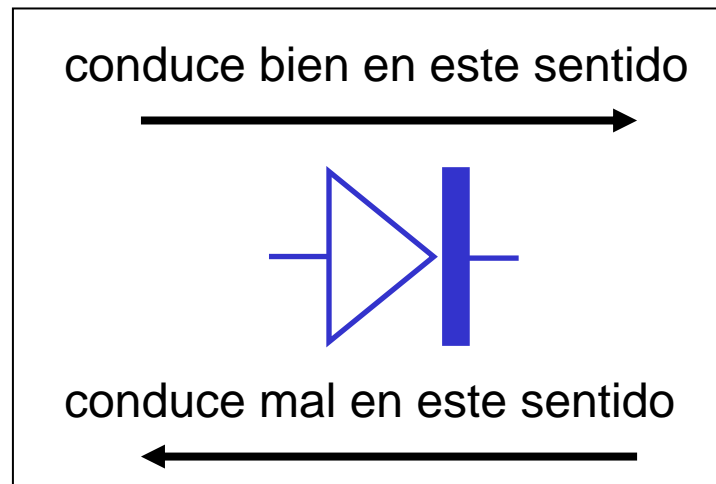
# Conclusiones

---

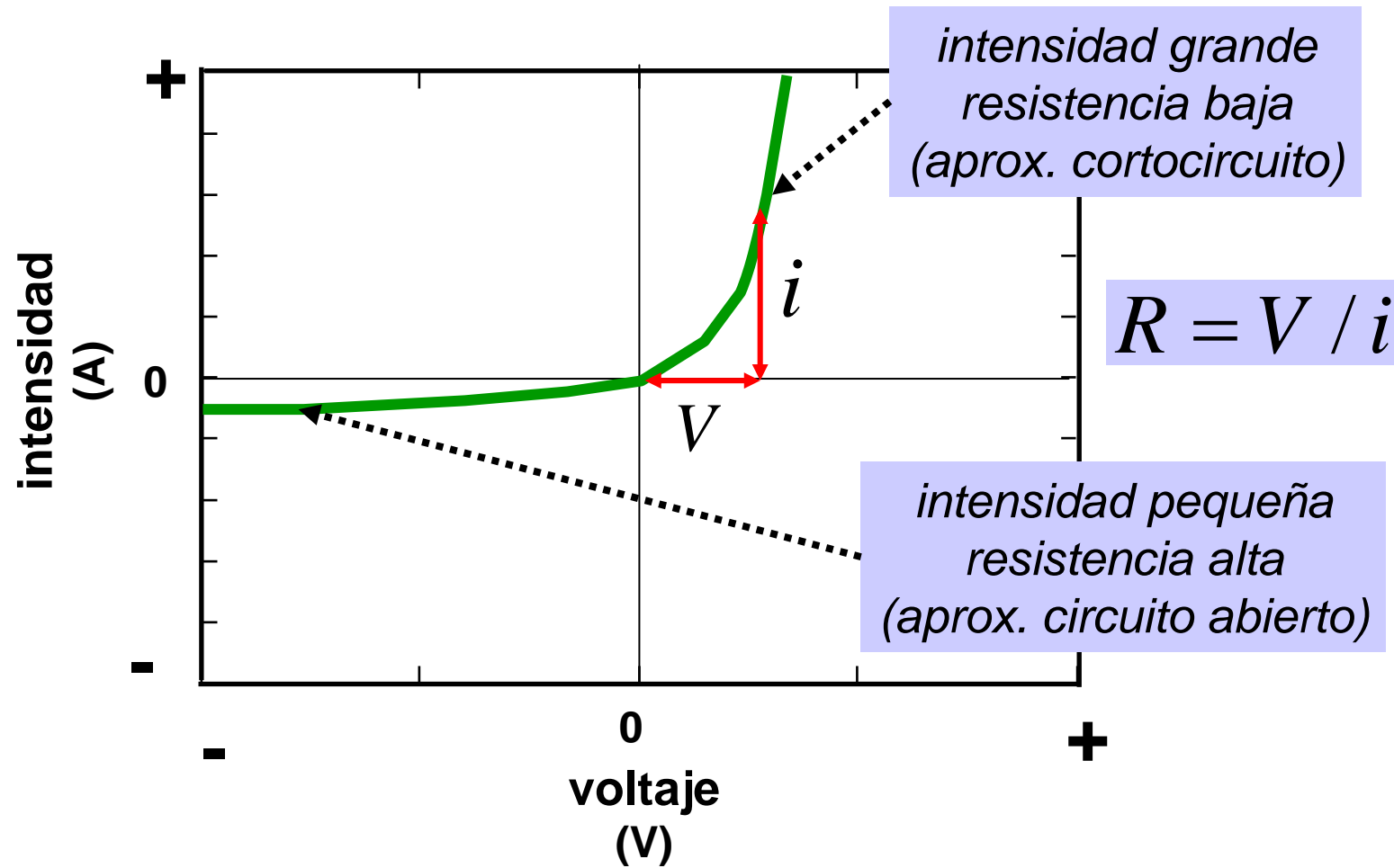
El diodo de unión *pn*:

Muy importante

- conduce preferentemente en un sentido
- es un componente electrónico asimétrico



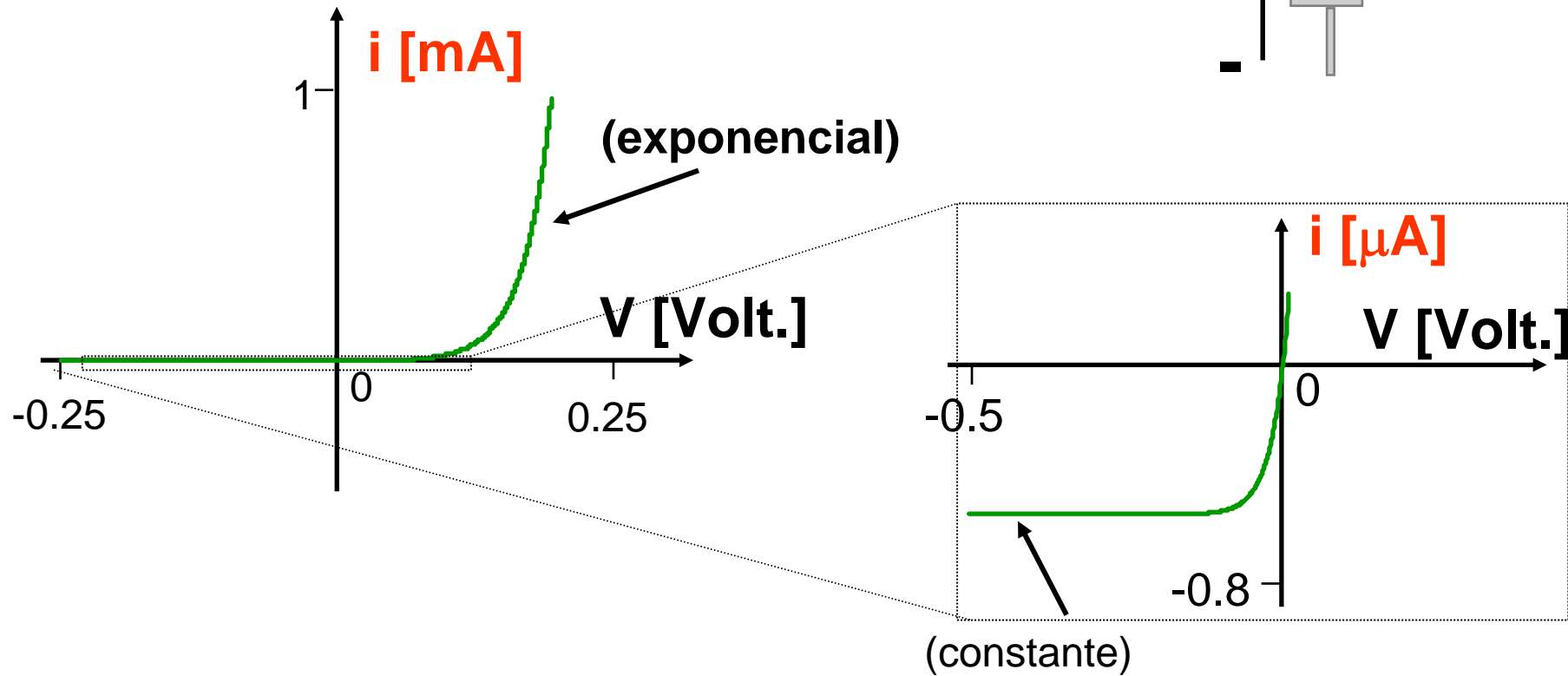
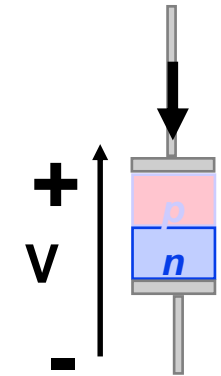
# Característica corriente-voltaje del diodo de unión *pn*



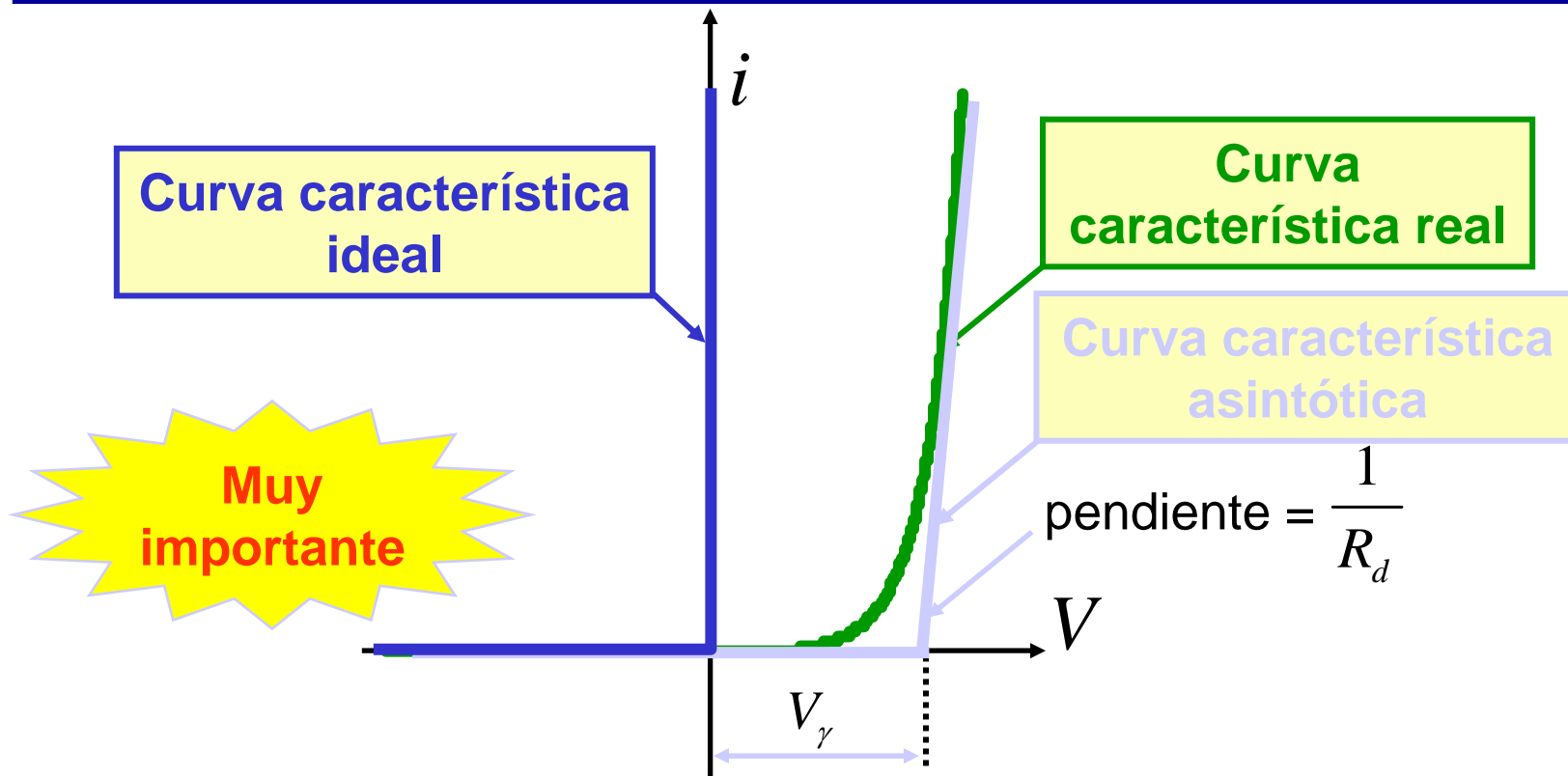
# Curva característica de una unión PN en Ge

(visto a dos escalas diferentes, mA y  $\mu\text{A}$ )

## Unión de Ge (Ejemplo 1)



# Curvas características y circuitos equivalentes



Circuito equivalente asintótico:

