



UNCUYO
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE CUYO



**FACULTAD
DE INGENIERÍA**

“DIFUSIÓN Y DEFECTOS EN SÓLIDOS: SEMICONDUCTORES”

MATERIALES

Prof. Titular: Dra. Ing. María J. Santillán

Prof. Adjunto: Dr. Ing. Claudio Careglio

SEMICONDUCTORES: Introducción

Clasificación de materiales:

	Conductores	Aislantes	Semiconductores
ρ ($\Omega\cdot\text{cm}$)	10^{-5}	10^{10}	10^1
n (cm^{-3})	10^{20}	10^2	10^{10}

Para romper uno de los enlaces covalentes hay que aplicar una energía de 0,7 eV (Si) ó 1,1 eV (Ge) > **Energía de ionización.**

Presencia de enlaces covalentes

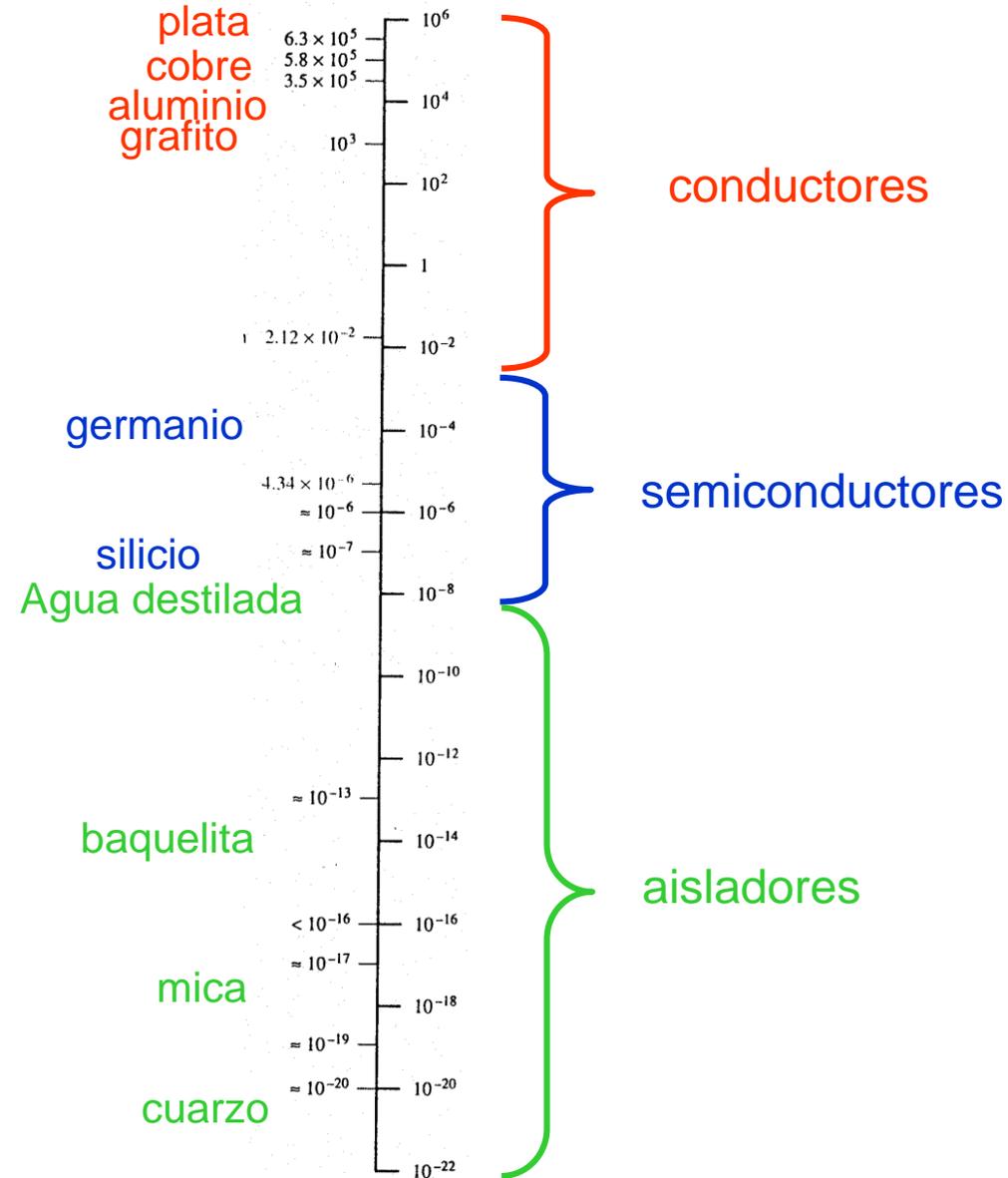
COBRE: $\rho = 10^{-6}\Omega\text{-cm}$

MICA: $\rho = 10^{12}\Omega\text{-cm}$

SILICIO: $\rho = 50 \times 10^3 \Omega\text{-cm}$

GERMANIO: $\rho = 50 \Omega\text{-cm}$

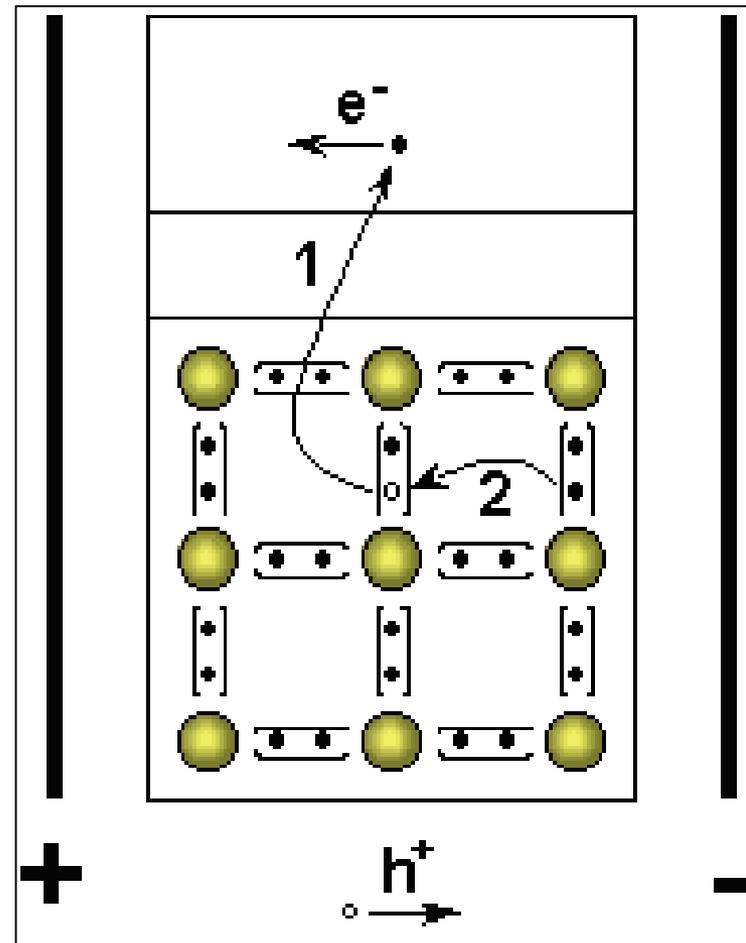
SEMICONDUCTORES: Introducción



Materiales semiconductores

Los semiconductores → tienen en su último nivel entre 2 y 6 e- de valencia.

Los semiconductores están formados por arreglos ordenados cristalinos de átomos en los cuales los vecinos más cercanos están unidos por enlaces covalentes.



Materiales semiconductores

Elementales: Germanio (Ge) y Silicio (Si)

Compuestos Gr (IV): SiC y SiGe

Compuestos GrI (II-V):

- Binarios: GaAs, GaP, GaSb, InAs, InP y InSb
- Ternarios: GaAsP, AlGaAs
- Cuaternarios: InGa, AsP

Compuestos Gr (II-VI): ZnS, ZnSe, ZnTe

Materiales de **conductividad intermedia** entre los metales y aislantes, que se modifica en gran medida por T, la excitación óptica y las impurezas.

Semiconductores Elementales

SILICIO

- Más utilizado.
- Material con estructura cúbica de diamante.
- Banda de energía es de 1,1 eV.
- Ventaja: opera a altas T.
- Red cristalina.
- Enlaces entre átomos: covalentes.
- Electrones de valencia: 4

GERMANIO

- No muy usado.
- Material con estructura cúbica de diamante.
- Banda de energía es de 0,67 eV.
- Opera a T menores de 80 °C.
- Red cristalina
- Enlaces entre átomos: covalentes
- Electrones de valencia: 4

Semiconductores : Grupo IV A

- Estructura atómica del Carbono (6 e⁻)



- Estructura atómica del Silicio (14 e⁻)



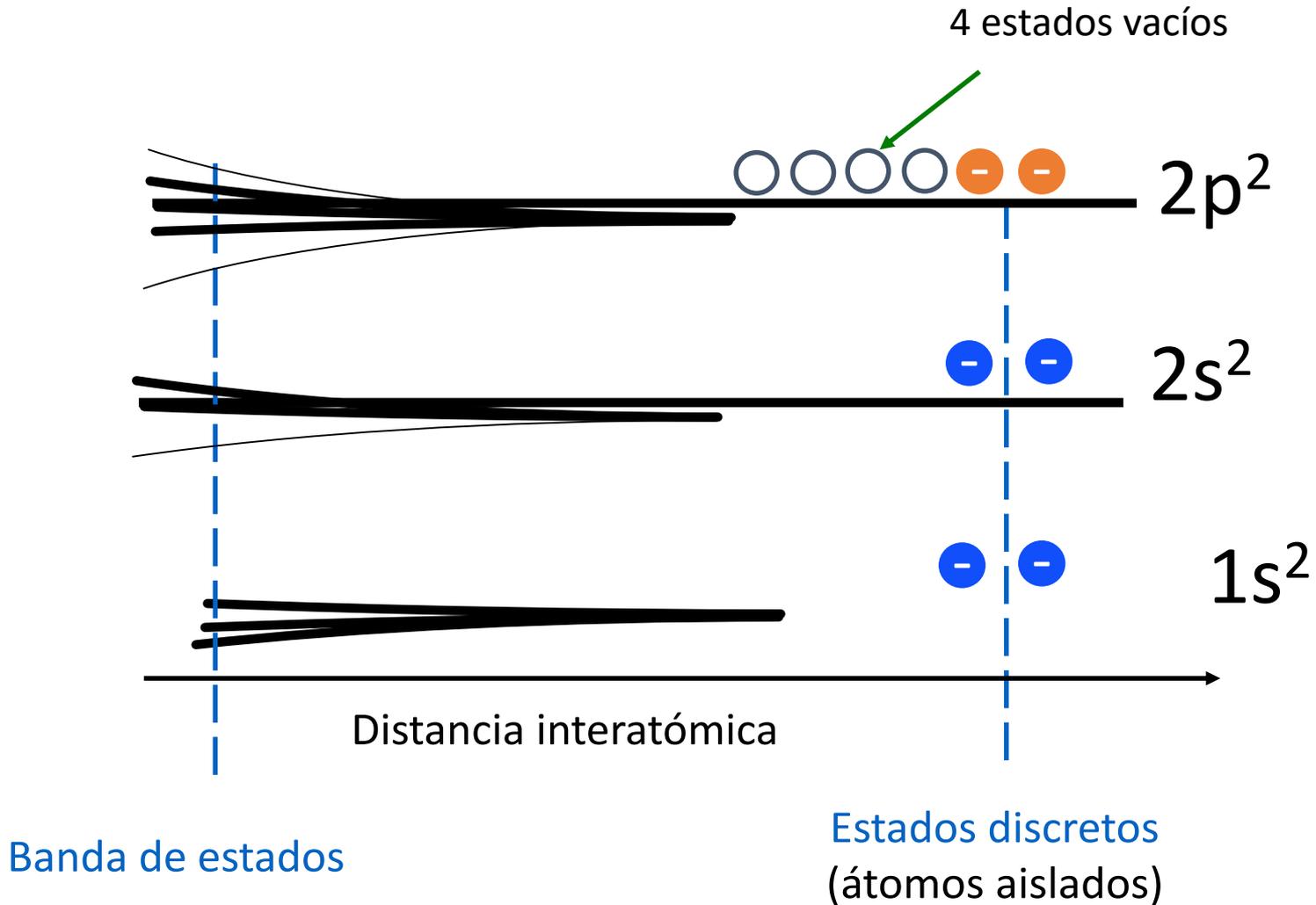
- Estructura atómica del Germanio (32 e⁻)



4 e⁻ en la última capa

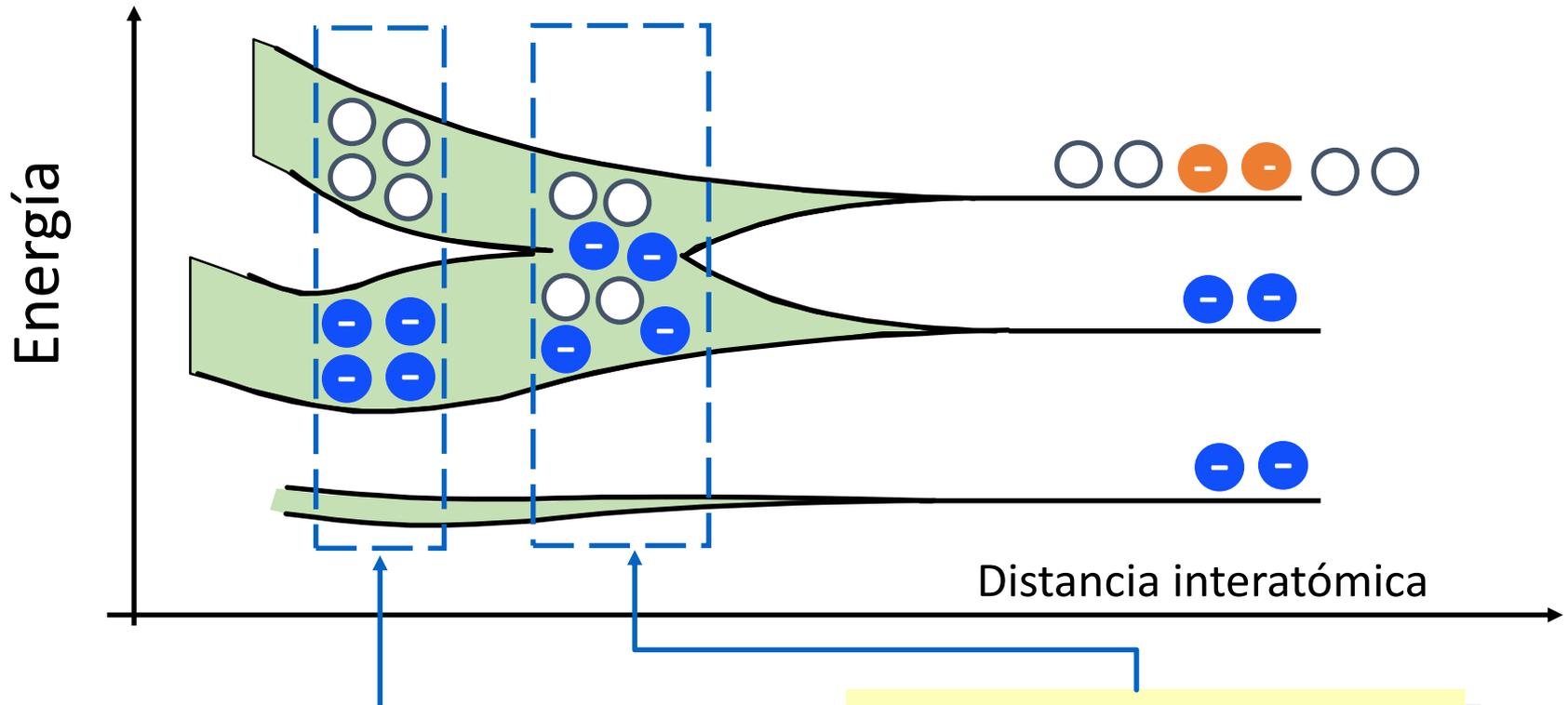
Materiales semiconductores

Carbono (g) (6 e⁻) 1s², 2s², 2p²



Materiales semiconductores

Reducción de la distancia interatómica del Carbono



Diamante:
Cúbico, transparente, duro y aislante

Grafito:
Hexagonal, negro, blando y conductor

SEMICONDUCTORES: Diagramas de bandas

Mayor distancia del electrón al núcleo, → mayor es el estado de energía.

Si $1e^-$ deja el átomo → tiene un estado de energía mayor que cualquier electrón en la estructura atómica neutra.

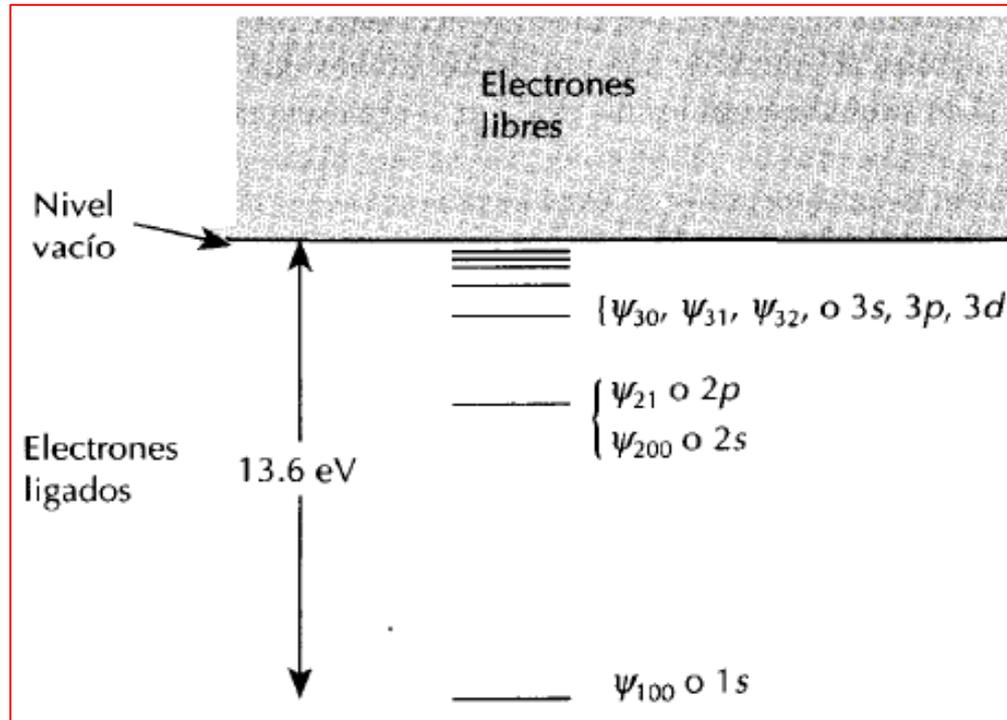


Niveles atómicos pueden estar influenciados por E° externa o E° interna al átomo dentro de la estructura cristalina.

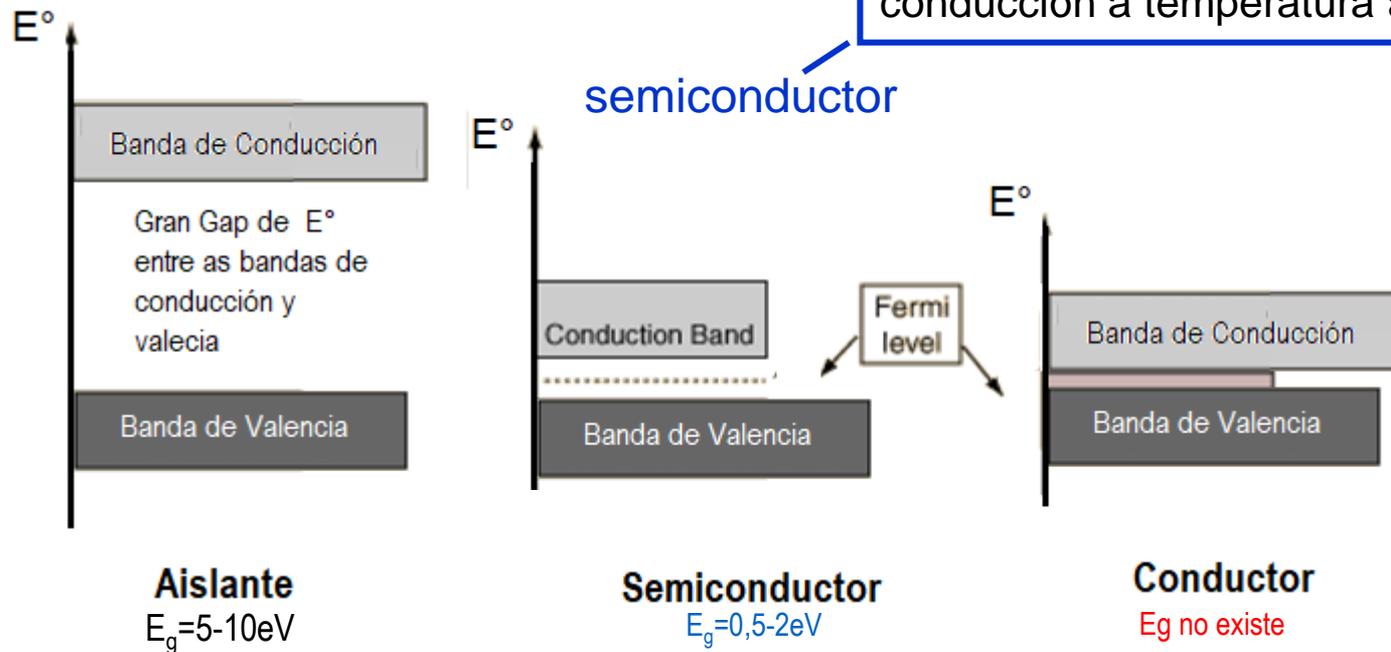
Átomo con estructura cristalina → banda de conducción y banda de valencia.

SEMICONDUCTORES: Teoría de bandas

Un sólido está formado por diversos átomos cuyos niveles de energía interactúan entre sí, resultando en un acoplamiento de los niveles discretos de energía formando bandas de niveles de energía permitidos.



Teoría de bandas



•Existen electrones en la banda de conducción a temperatura ambiente.

semiconductor

- Banda de conducción vacía
- Banda de valencia llena
- Gran cantidad de energía es requerida para desplazar un electrón de la banda de valencia a la de conducción

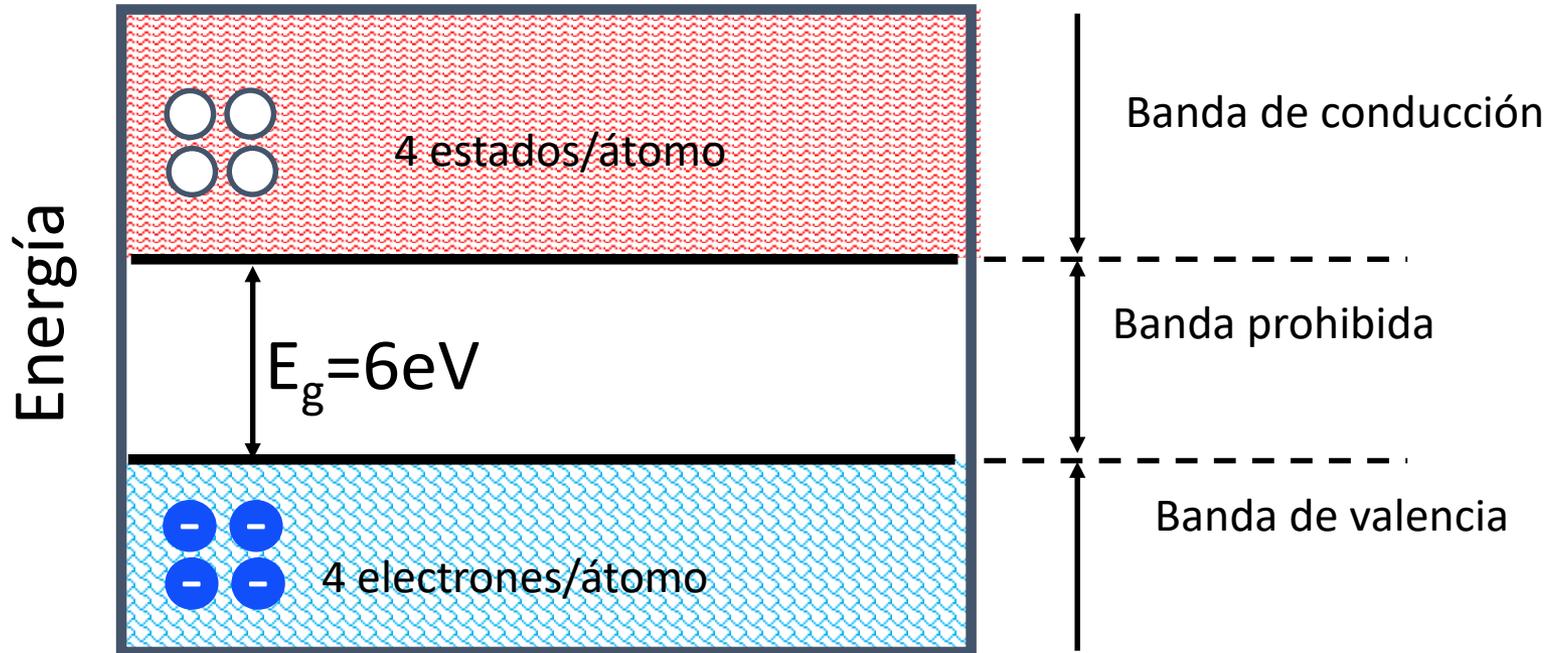
- Las bandas de conducción y de valencia se solapan.
- Existe un gran número de electrones en la banda de conducción a temperatura ambiente.

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

A 300K, algunos e- de semiconductores alcanzan este nivel. Al aumentar la T aumenta la conducción en los semiconductores (al contrario que en los metales).

Diagramas de bandas

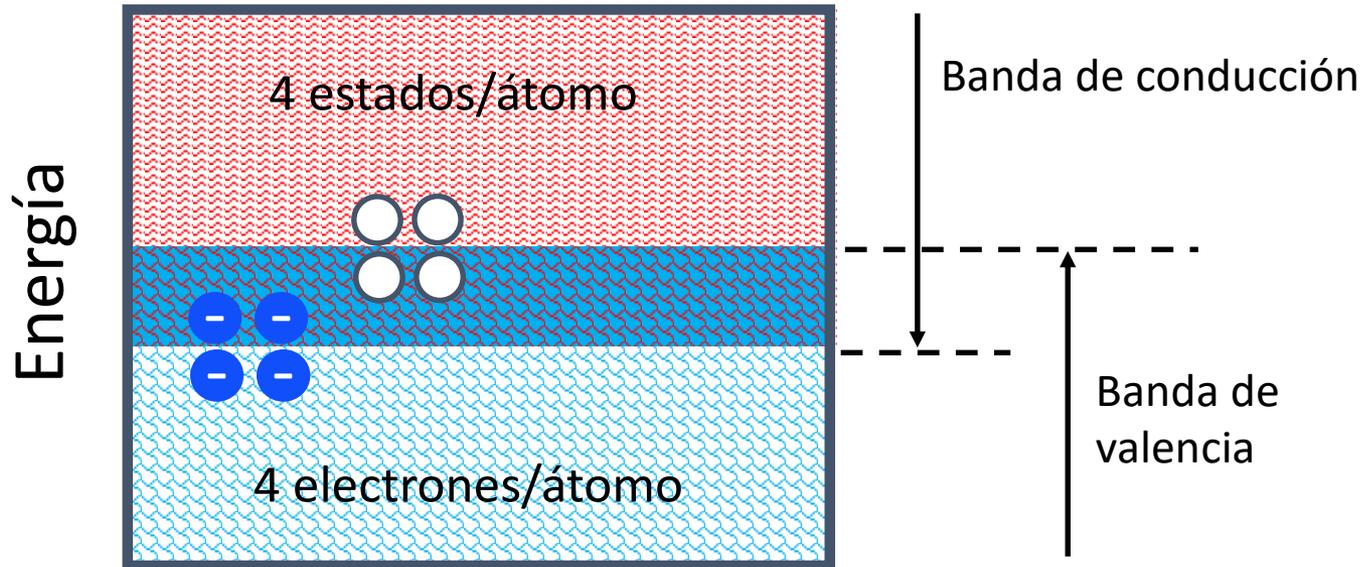
Carbono: *diamante*



Un e- de la banda de valencia logra la energía necesaria → saltar a la banda de conducción
A temperatura ambiente casi ningún electrón tiene esta energía → *Aislante*.

Diagramas de bandas

Carbono: *grafito*

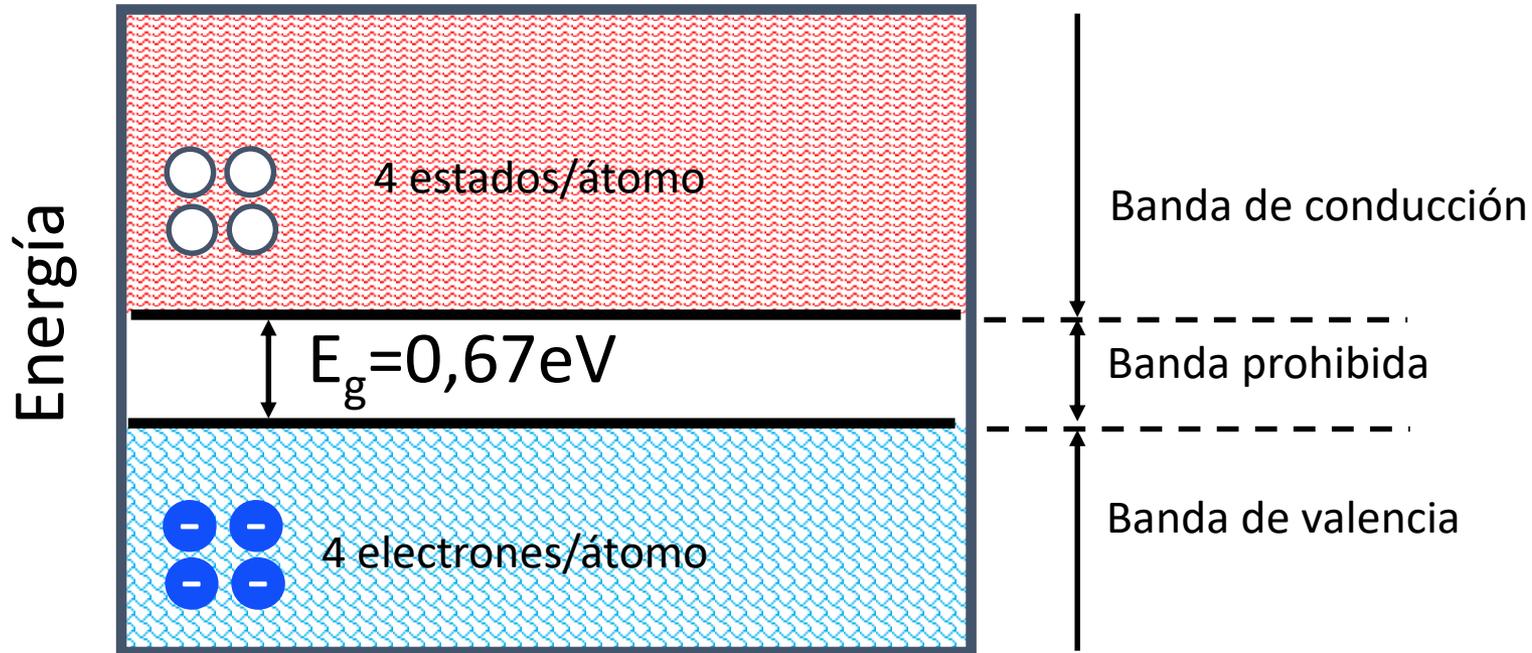


No tiene banda prohibida.

Los e⁻ de la banda de valencia tienen la misma energía que los estados vacíos en la banda de conducción. *T ambiente*
→ *conductor*.

Diagramas de bandas

Germanio

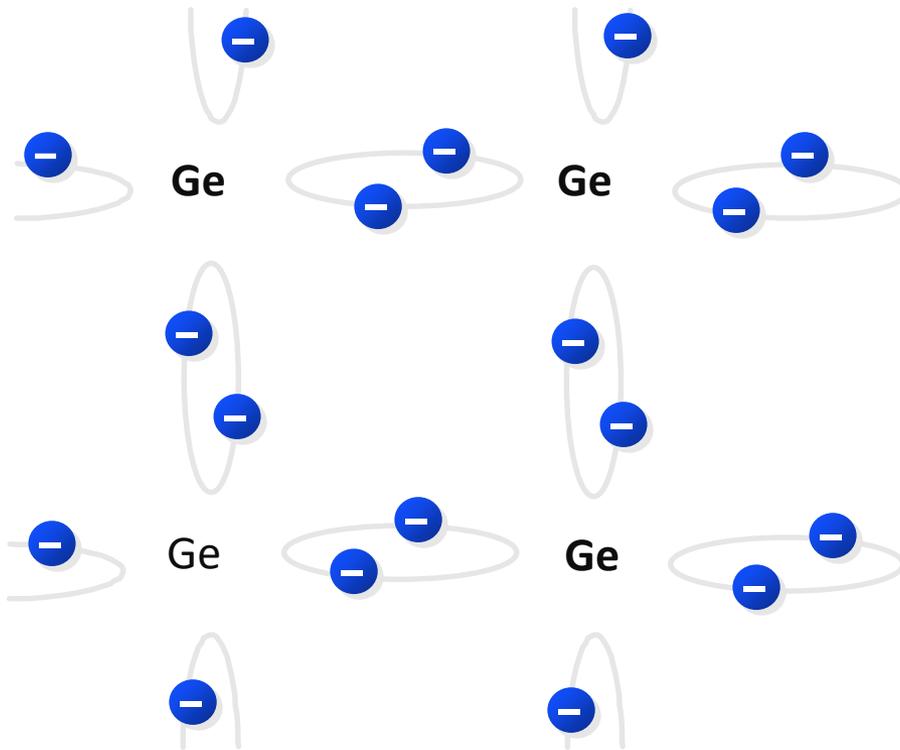


A T ambiente algunos e-tienen esta energía → *semiconductor*.

Ge a 0K

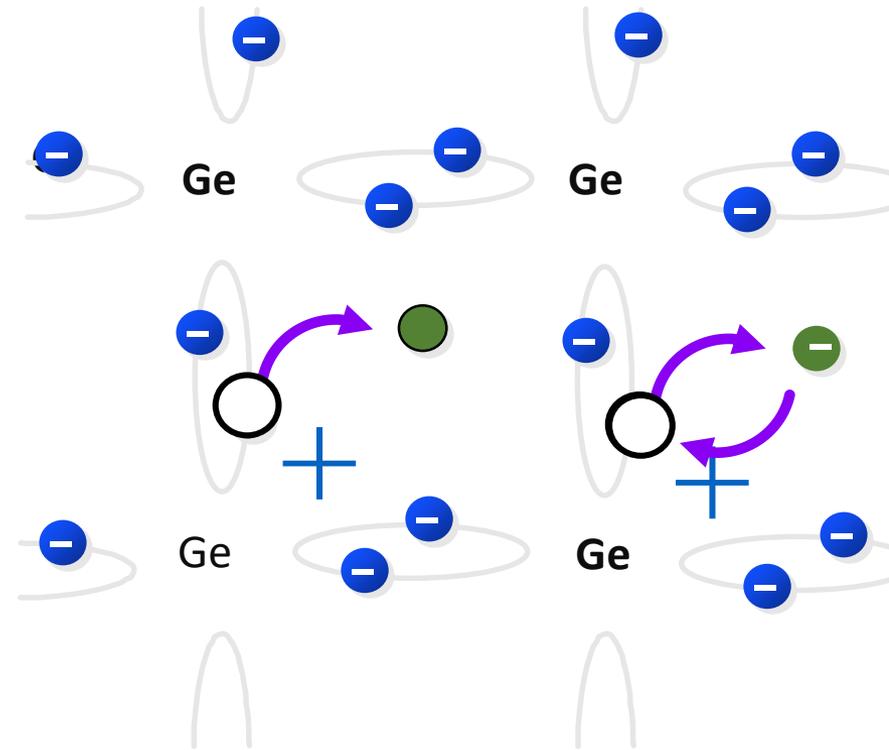
No existen enlaces covalentes rotos.

Los e- de la banda de valencia no pueden saltar a la banda de conducción.

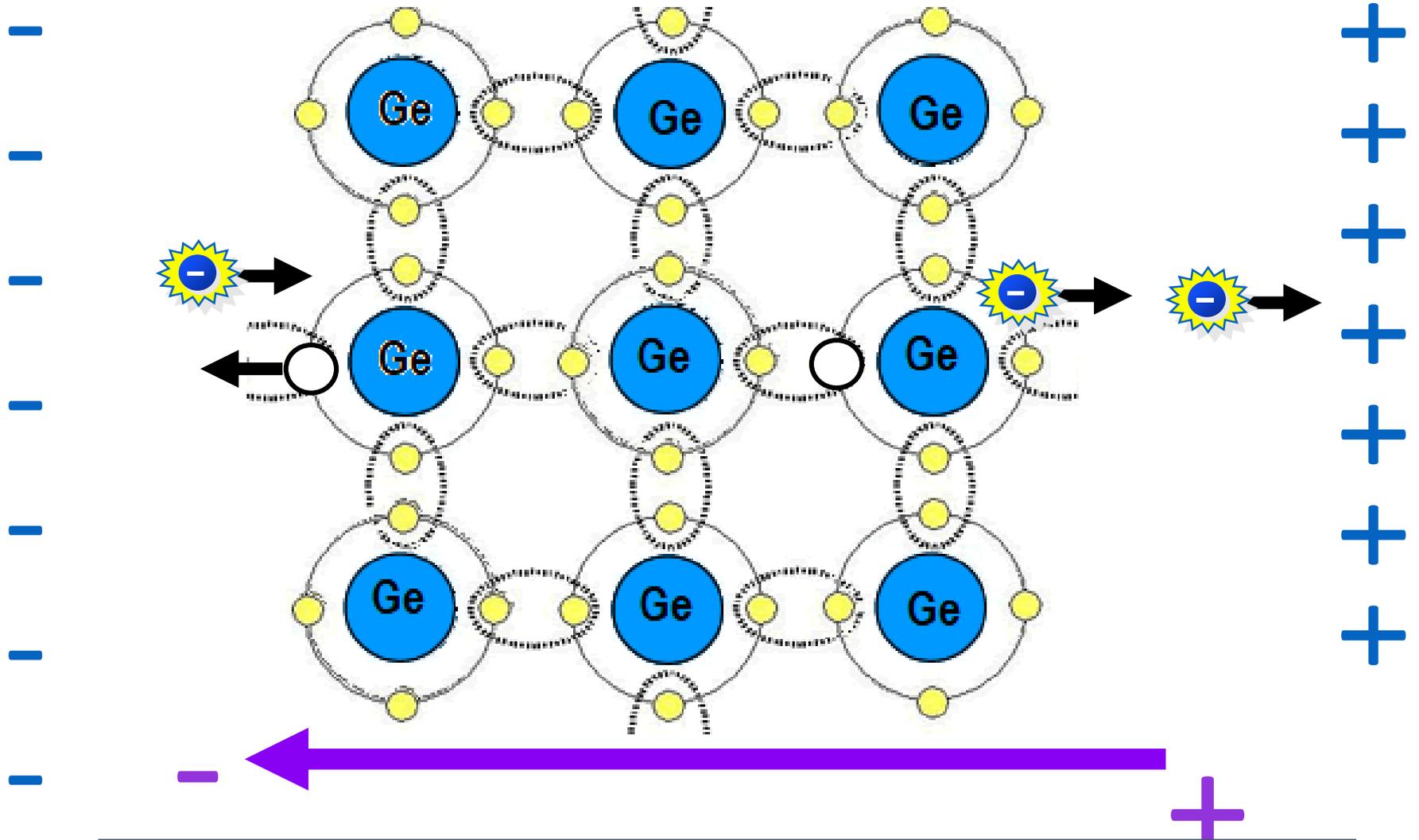


Ge a 300K

- 1 enlace roto cada $1,7 \cdot 10^9$ áts.
- Un e- "libre" y una carga "+" por cada enlace roto.

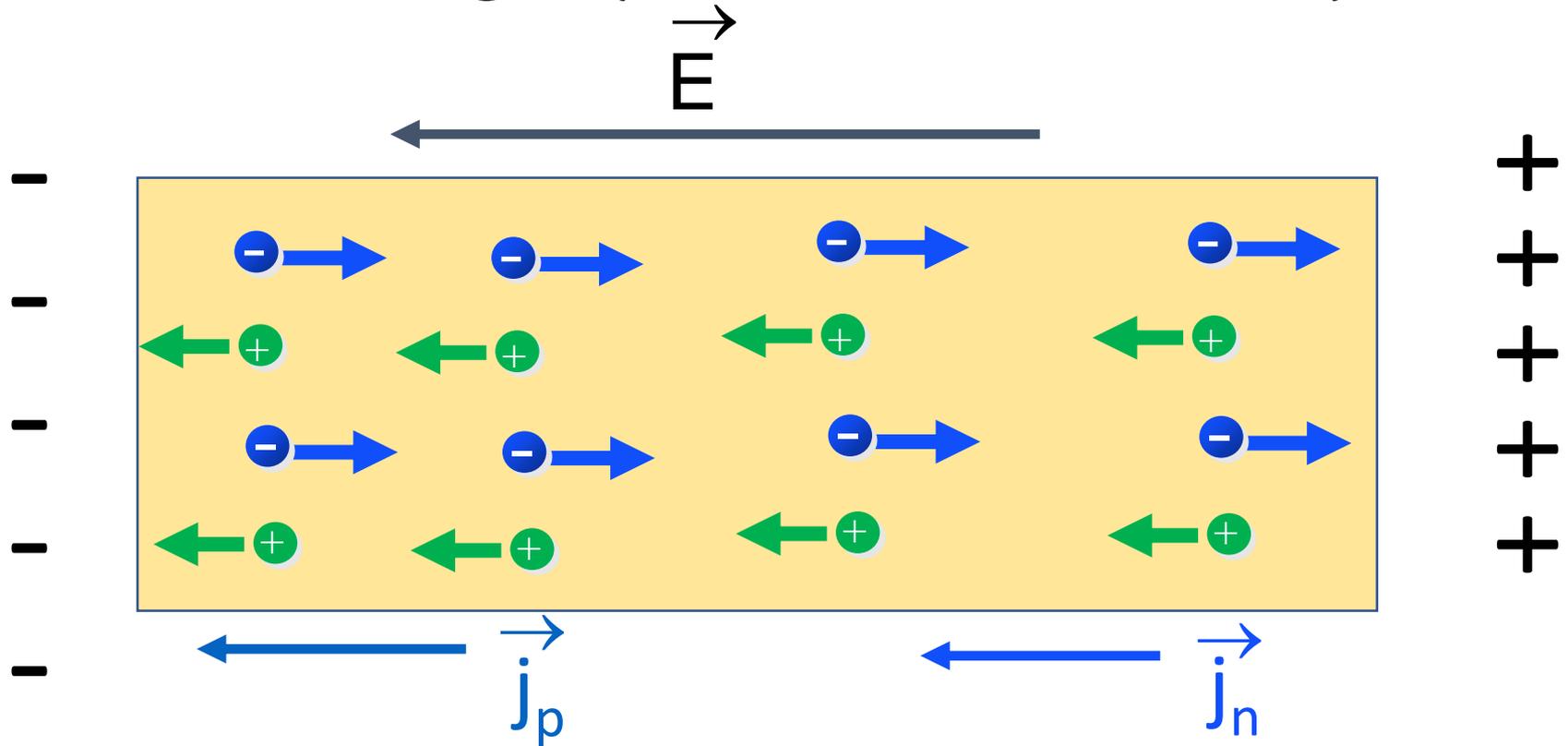


Aplicación de un campo externo



• El electrón libre se mueve por acción del campo.

APLICACIÓN DE CAMPO ELECTRICO EXTERNO: Movimiento de cargas (corriente de arrastre)



Existe corriente eléctrica debida a los dos portadores de carga:

$$\vec{j}_p = q \cdot \mu_p \cdot p \cdot \vec{E} \quad \text{densidad de corriente de huecos.}$$

$$\vec{j}_n = q \cdot \mu_n \cdot n \cdot \vec{E} \quad \text{densidad de corriente de electrones.}$$

Movimiento de cargas por un E exterior

$$\vec{j}_p = q \cdot \mu_p \cdot p \cdot \vec{E}$$

$$\vec{j}_n = q \cdot \mu_n \cdot n \cdot \vec{E}$$

q = carga del electrón

μ_p = movilidad de los h

μ_n = movilidad de los e

p = concentración de h

n = concentración de e-

E = intensidad del campo eléctrico

	Ge (cm ² /V·s)	Si (cm ² /V·s)	As Ga (cm ² /V·s)
μ_n	3900	1350	8500
μ_p	1900	480	400

Clasificación de Semiconductores

Ge: $n_i = 2 \cdot 10^{13}$ portadores/cm³

Si: $n_i = 10^{10}$ portadores/cm³

- **Intrínsecos**

Con propiedades semiconductoras debido a su “composición”. No hay impurezas ; $n = p = n_i$

- **Extrínsecos**

Se añaden impurezas (dopado), para mejorar sus propiedades conductoras

Tipo N

Dopaje tipo N → producir disponibilidad de e- portadores en el material (portadores de carga negativa).

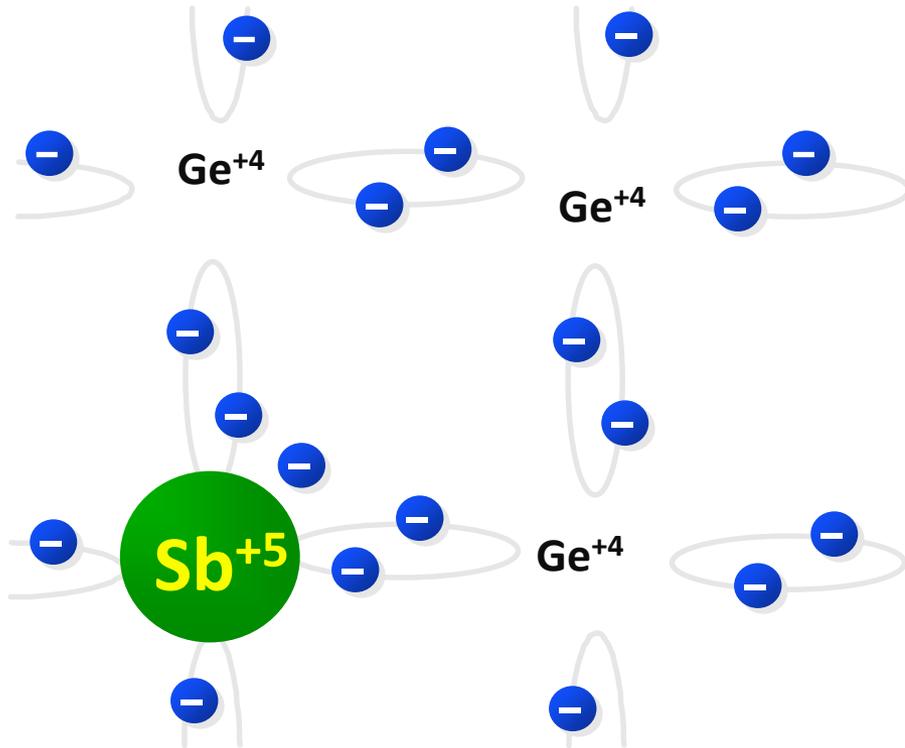
Tipo P

Dopaje tipo P → crear abundancia de huecos (portadores de carga positiva).

Semiconductores Extrínsecos Tipo-n

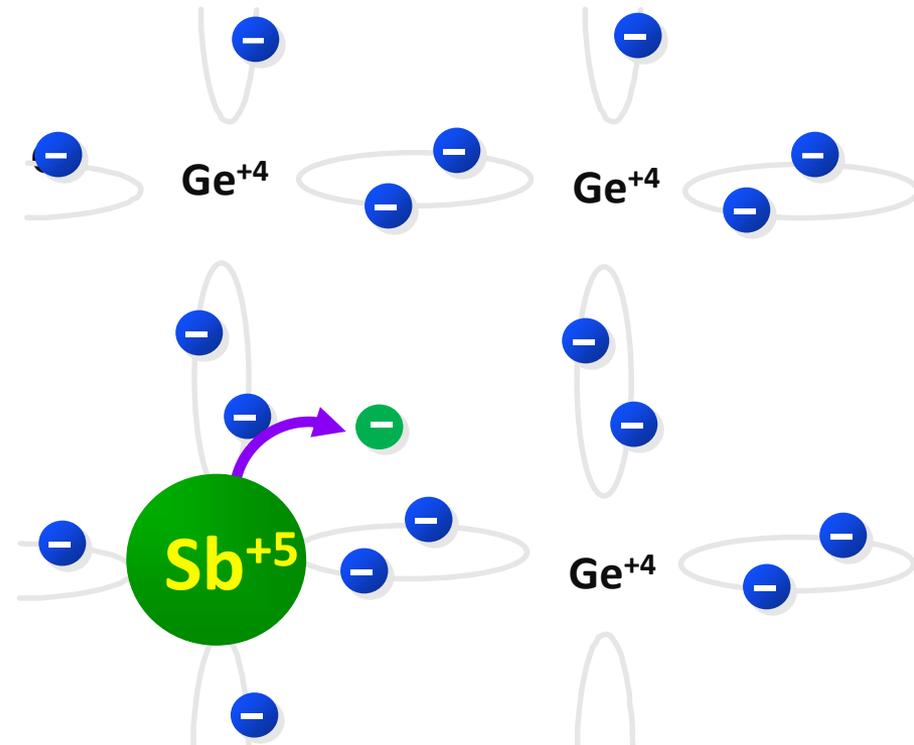
Introducción de impurezas del grupo V

(0K)



e- adicional ligado al Sb

(300K)

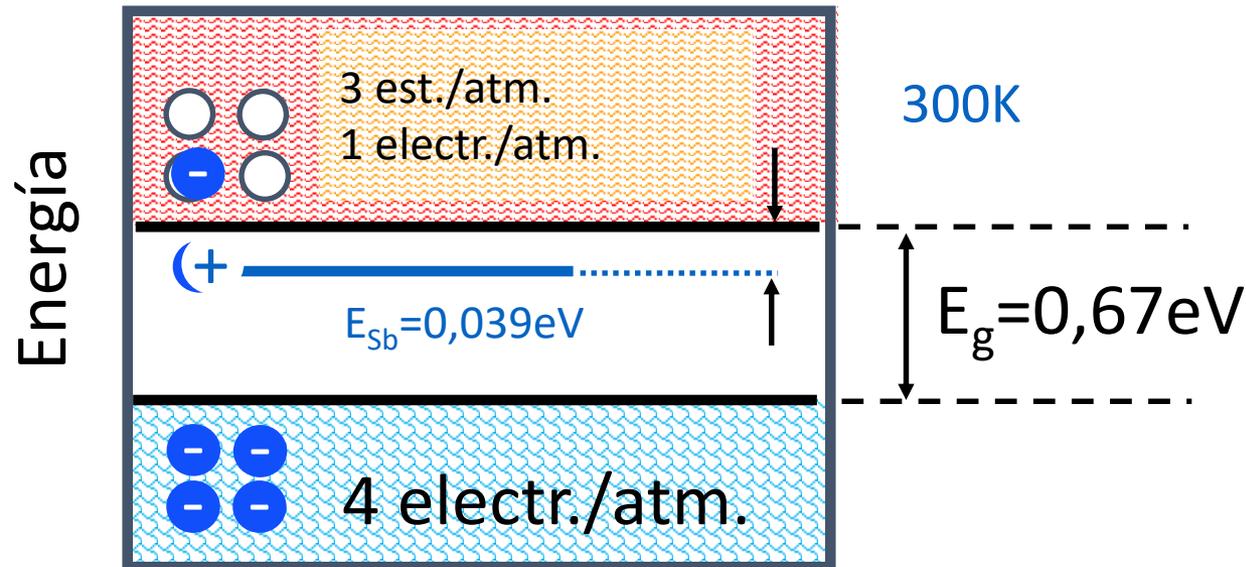


e- adicional queda libre

El Sb es un donador → en Ge hay más electrones que huecos.

Semiconductores Extrínsecos: Tipo-n

Diagrama de bandas

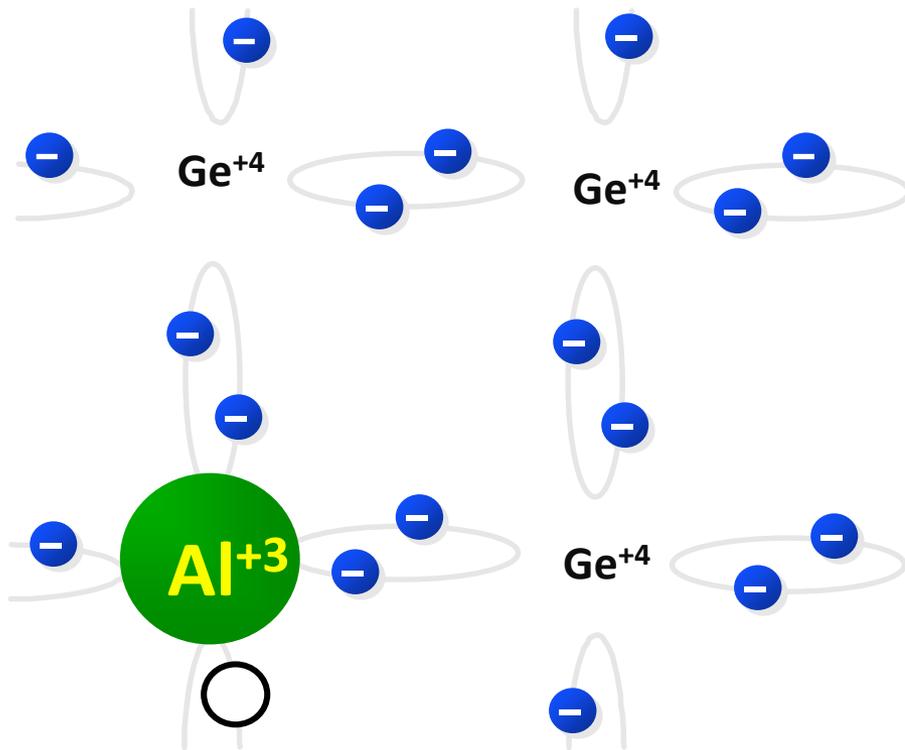


El Sb genera un estado permitido en la banda prohibida, muy cerca de la banda de conducción. La energía necesaria para alcanzar la banda de conducción se consigue a la temperatura ambiente.

Semiconductores Extrínsecos: Tipo-p

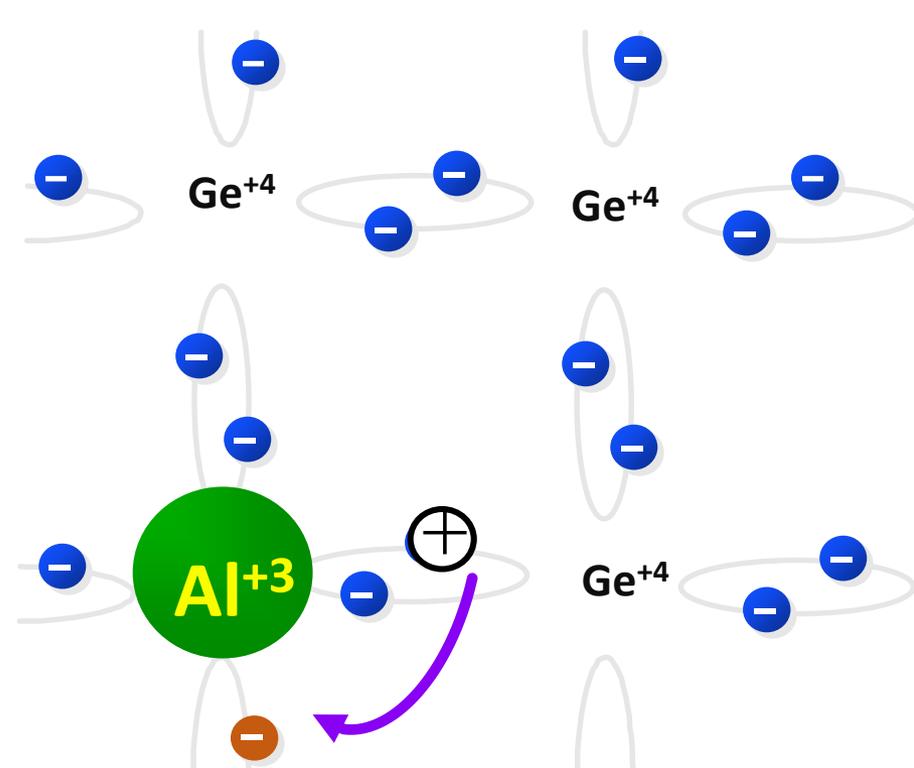
Introducción de impurezas del grupo III

0K)



Deficiencia de e^- en Al

(300K)

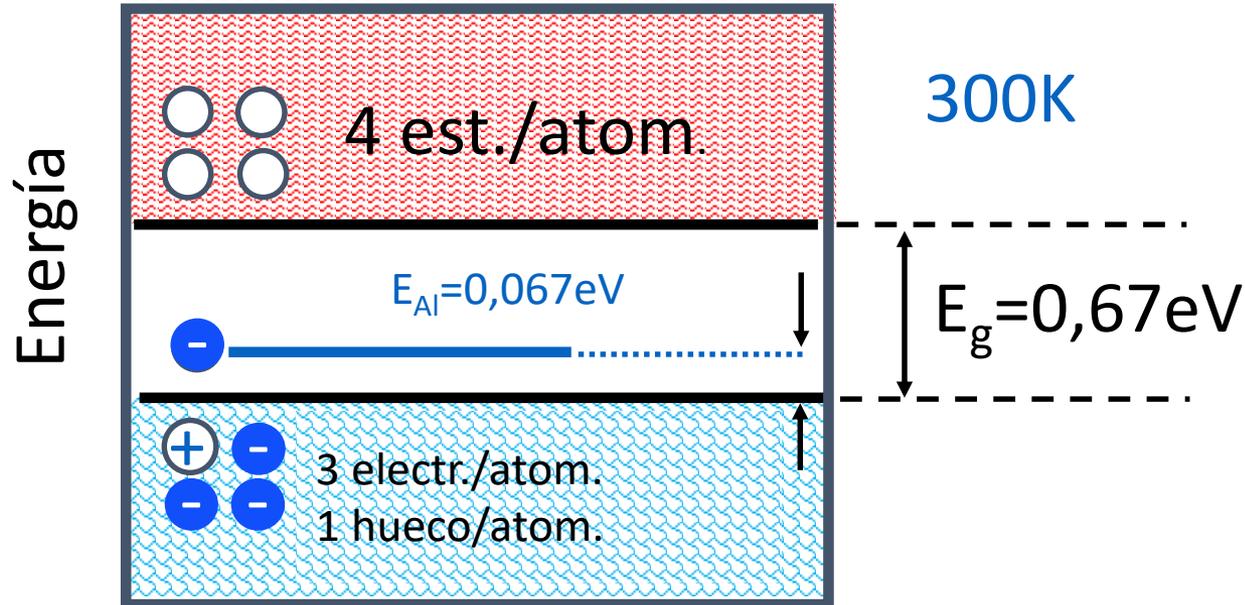


Los h del Al se cubren

El Al es un aceptor → en Ge hay más huecos que electrones .

Semiconductores Extrínsecos Tipo-p

Diagrama de bandas



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.

Semiconductores: RESUMEN

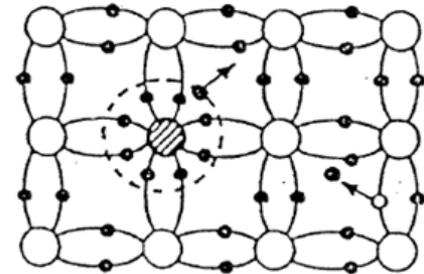
Semiconductores intrínsecos:

- Igual número de huecos y de electrones

Semiconductores extrínsecos:

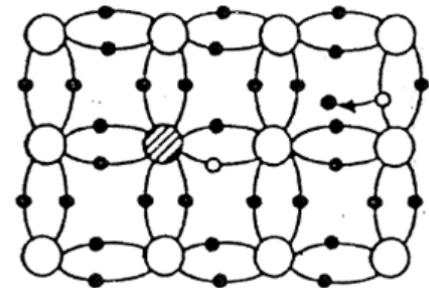
Tipo-p:

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



Tipo-n:

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

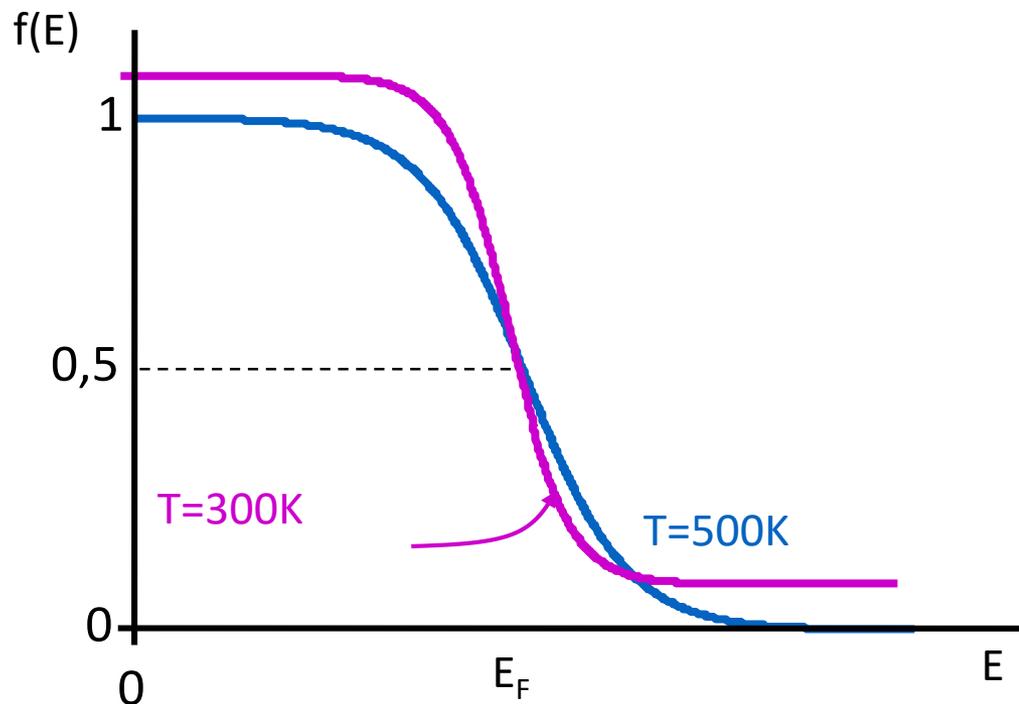


Distribución de Fermi-Dirac $f(E)$

$f(E)$ es la probabilidad de que un estado de energía E esté ocupado por una partícula (electrón) en equilibrio

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

E_F =nivel de Fermi
 k =constante de Boltzmann
 T =temperatura absoluta



“n” en la banda de conducción

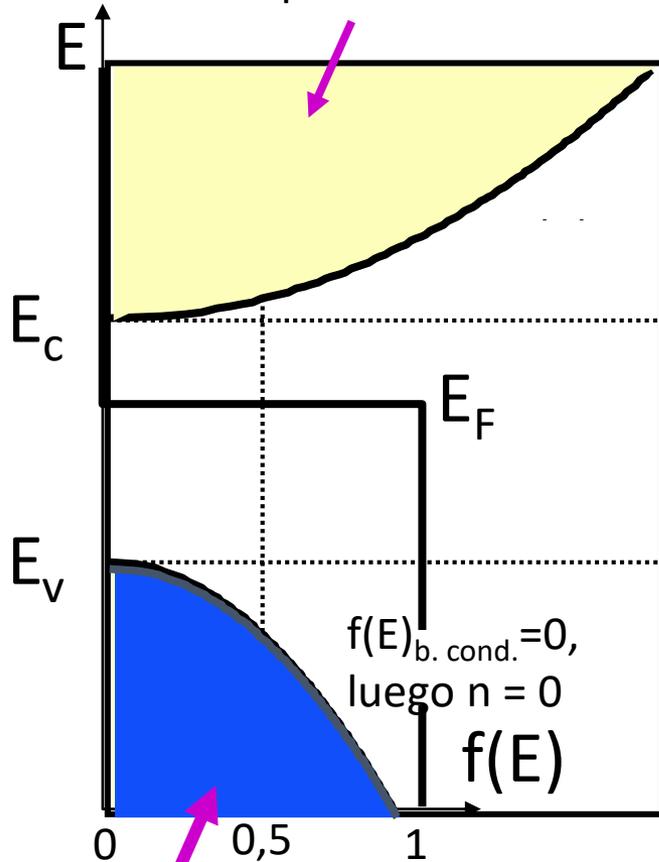
En general:

$$n = \int_{E_c}^{\infty} g_c(E) \cdot f(E) \cdot dE$$

T=0K

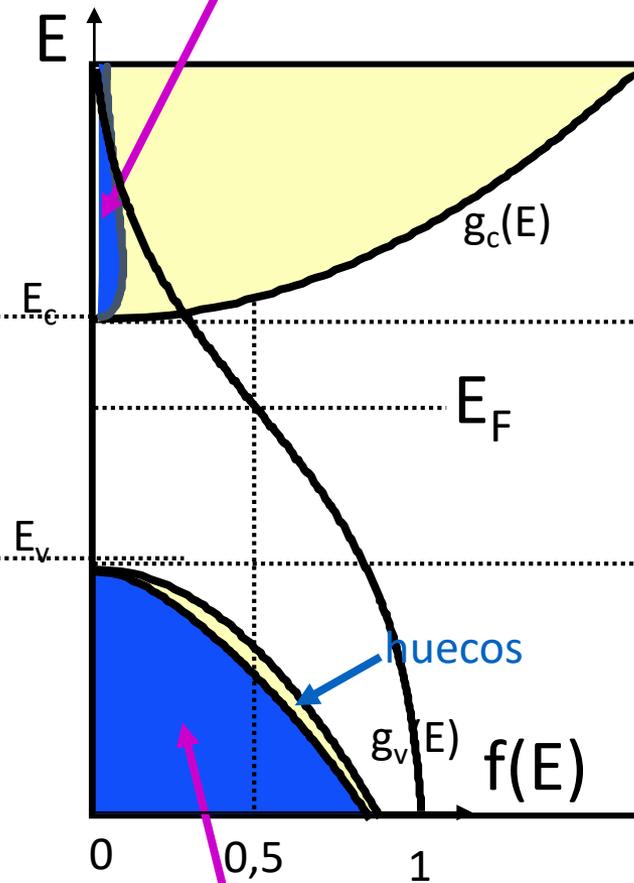
Estados completamente vacíos

Estados posibles



T > T(E_F)

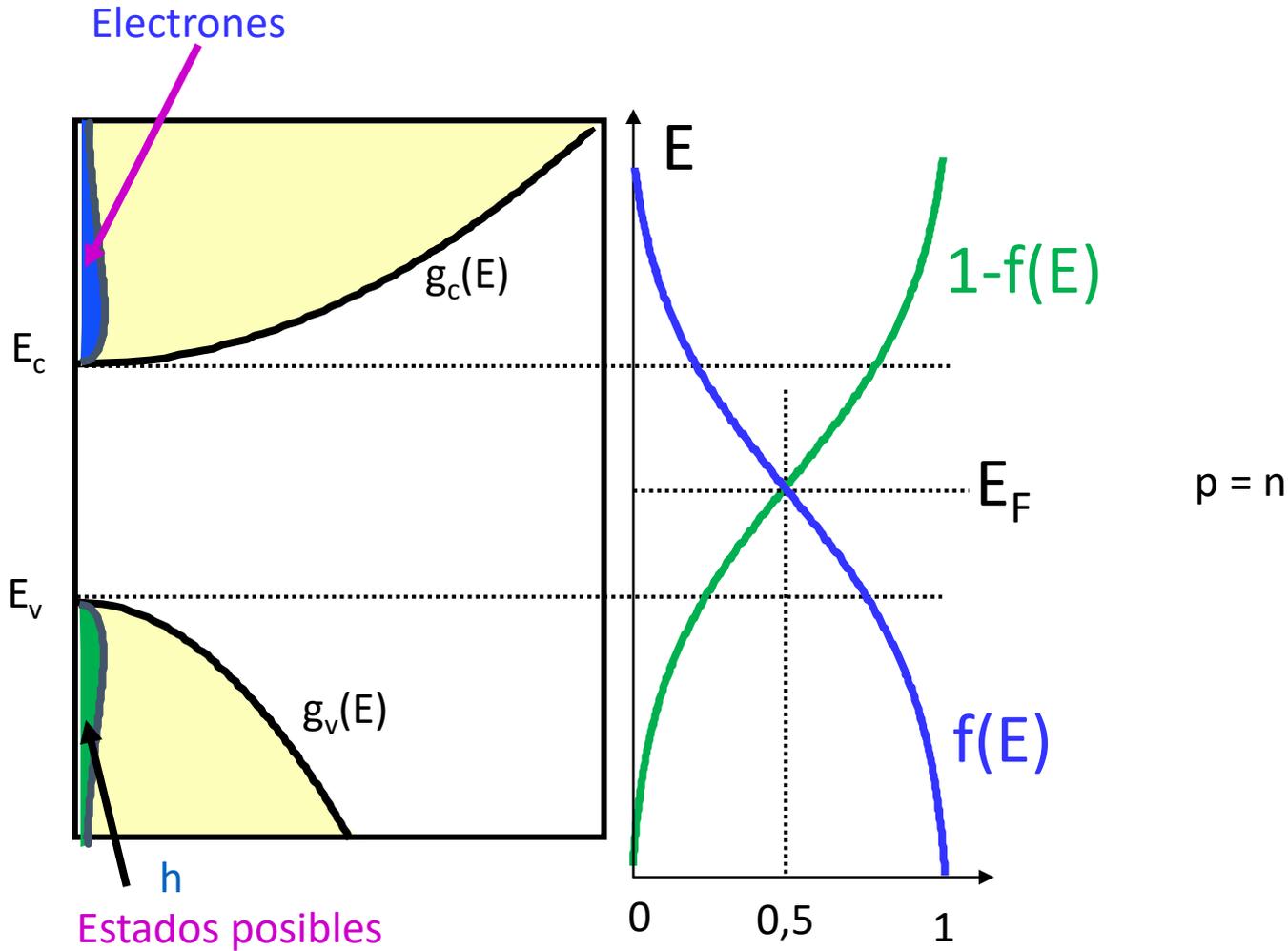
n electrones/vol.



Semi lleno

Estados completamente llenos de electrones

“p” en la banda de valencia

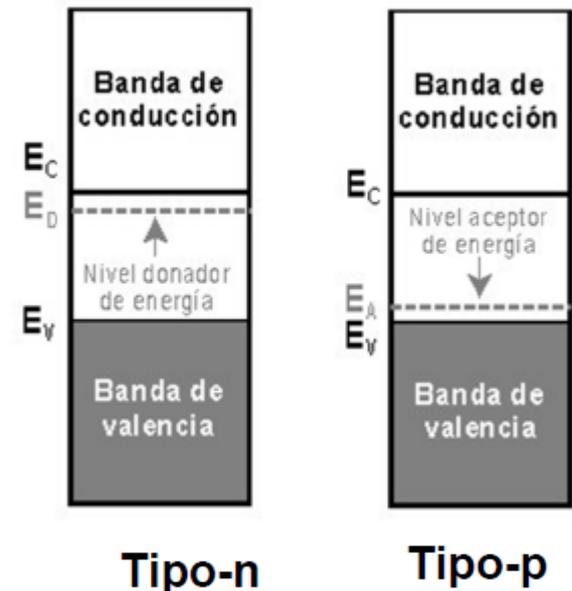


Concentración de portadores en los semiconductores extrínsecos

N_D = concentr. donador N_A = concentr. aceptador

Neutralidad eléctrica (el semiconductor intrínseco es neutro y la sustancia dopante también → es neutro el semiconductor extrínseco)

Semiconductor tipo-n:	$n = p + N_D$
Semiconductor tipo-p:	$n + N_A = p$
Ambos :	$n + N_A = p + N_D$



Producto $n \cdot p$

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

Simplificaciones si $N_D \gg n_i$

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

La concentración de portadores mayoritarios

$$p_n \approx \frac{n_i^2}{N_D}$$

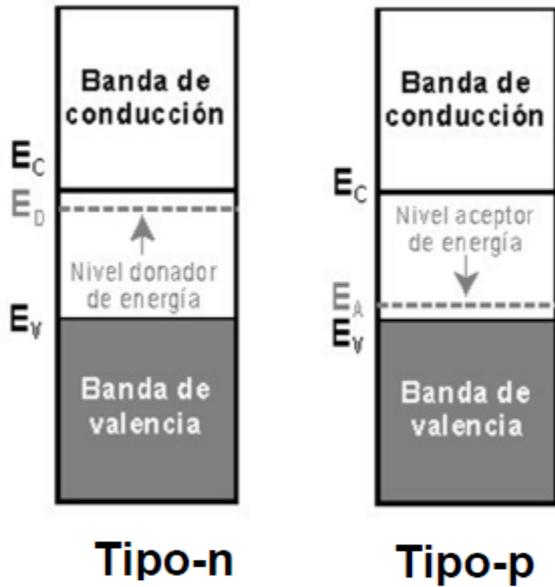
Simplificaciones si $N_A \gg n_i$

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

La concentración de portadores mayoritarios

$$n_p \approx \frac{n_i^2}{N_A}$$

Modificación del nivel de Fermi en semiconductores extrínsecos



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

$$n \approx N_D$$

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

$$p \approx N_A$$

La concentración de portadores mayoritarios

$$E_{F(n)} = E_C - kT \ln \frac{N_C}{N_D}$$

$$E_{F(p)} = E_V + kT \ln \frac{N_V}{N_A}$$

$$p_n \approx \frac{n_i^2}{N_D}$$

$$n_p \approx \frac{n_i^2}{N_A}$$

Conductividad total en semiconductores extrínsecos

Conductividad total es aportada por huecos y electrones mayoritarios

$$\sigma = (n\mu_n + p\mu_p) e$$



$$n \gg p$$
$$n \approx N_D$$

$$\sigma_n \approx n_n \mu_n e$$



$$p \gg n$$

$$p \approx N_A$$

$$\sigma_p \approx p_p \mu_p e$$

Corriente neta en semiconductores

2 tipos

Corriente de arrastre → por acción de (E). e- y h se mueven en sentido opuesto (h en sentido del campo y e en sentido opuesto)

Densidad de corriente de arrastre ($J_{x \text{ campo}}$) x= n ó p

$$\vec{j}_p = q \cdot \mu_p \cdot p \cdot \vec{E}$$

$$\vec{j}_n = q \cdot \mu_n \cdot n \cdot \vec{E}$$

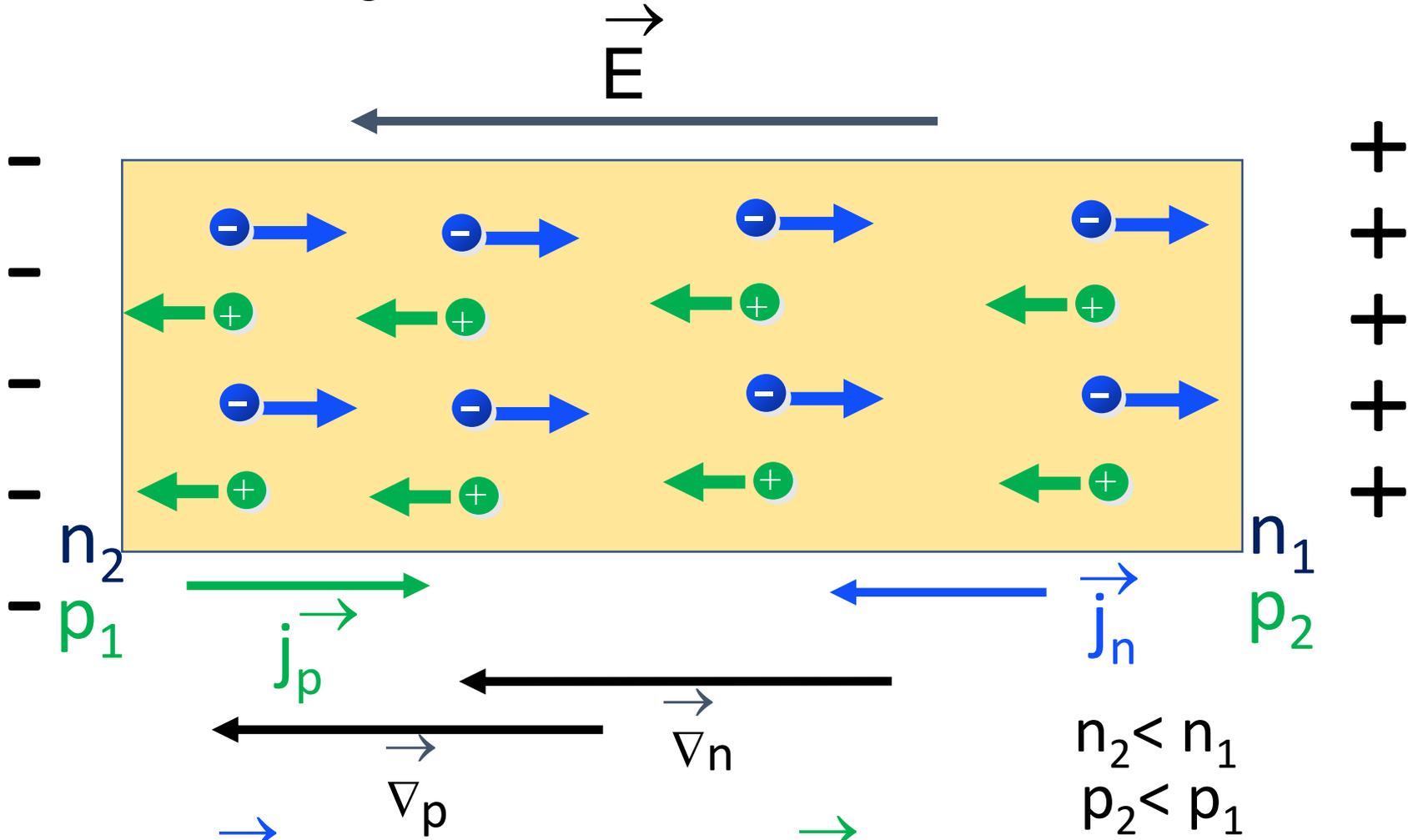
Corriente de difusión → por presencia del ∇C de portadores. El material no es uniforme

Densidad de corriente por difusión ($J_{x \text{ dif}}$) x= n ó p

$$\vec{j}_n = n \cdot D_n \cdot \vec{\nabla} n$$

$$\vec{j}_p = -p \cdot D_p \cdot \vec{\nabla} p$$

DIFUSIÓN DE e- y h



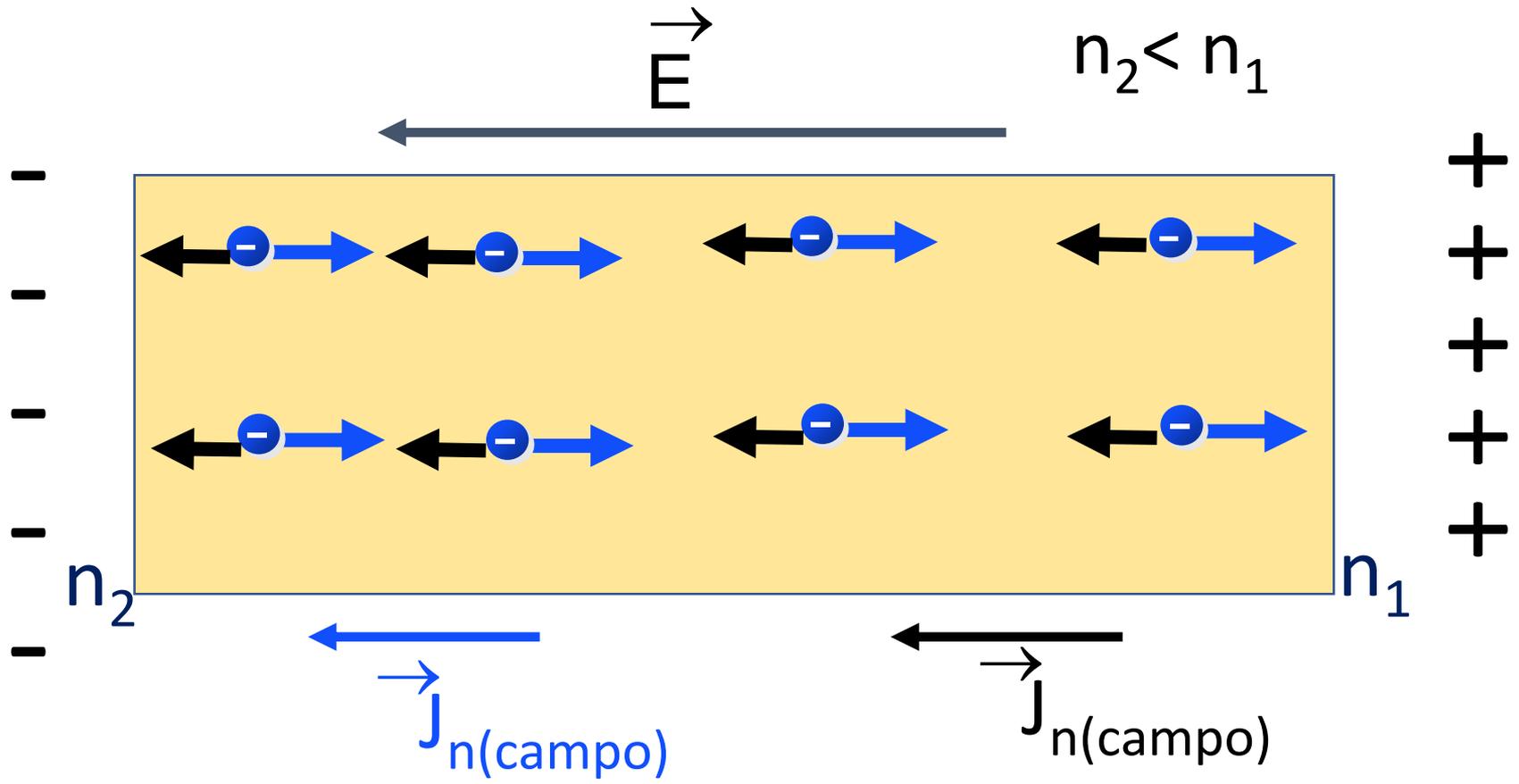
$$\vec{j}_n = n \cdot D_n \cdot \vec{\nabla} n$$

$$\vec{j}_p = p \cdot D_p \cdot \vec{\nabla} p$$

Las corrientes de difusión no dependen de las concentraciones, sino de la variación espacial de las concentraciones (gradiente)

	Ge (cm ² /s)	Si (cm ² /s)
D _n	100	35
D _p	50	12,5

EQUILIBRIO entre DIFUSIÓN y CAMPO ELECTRICO en electrones



$$\vec{j}_{n \text{ difusión}} = \vec{\nabla} q \cdot D_n \cdot n$$

$$j_{n \text{ campo}} = q \cdot \mu_n \cdot n \cdot E$$

$$j_{n \text{ difusión}} = q \cdot D_n \cdot dn/dx$$

Equilibrio: $j_{n \text{ difusión}} + j_{n \text{ campo}} = 0$

EQUILIBRIO entre DIFUSIÓN y CAMPO ELECTRICO en electrones

$$\text{Equilibrio: } j_{n \text{ difusión}} + j_{n \text{ campo}} = 0$$

$$j_{n \text{ difusión}} = q \cdot D_n \cdot dn/dx$$

$$E = -dV/dx$$

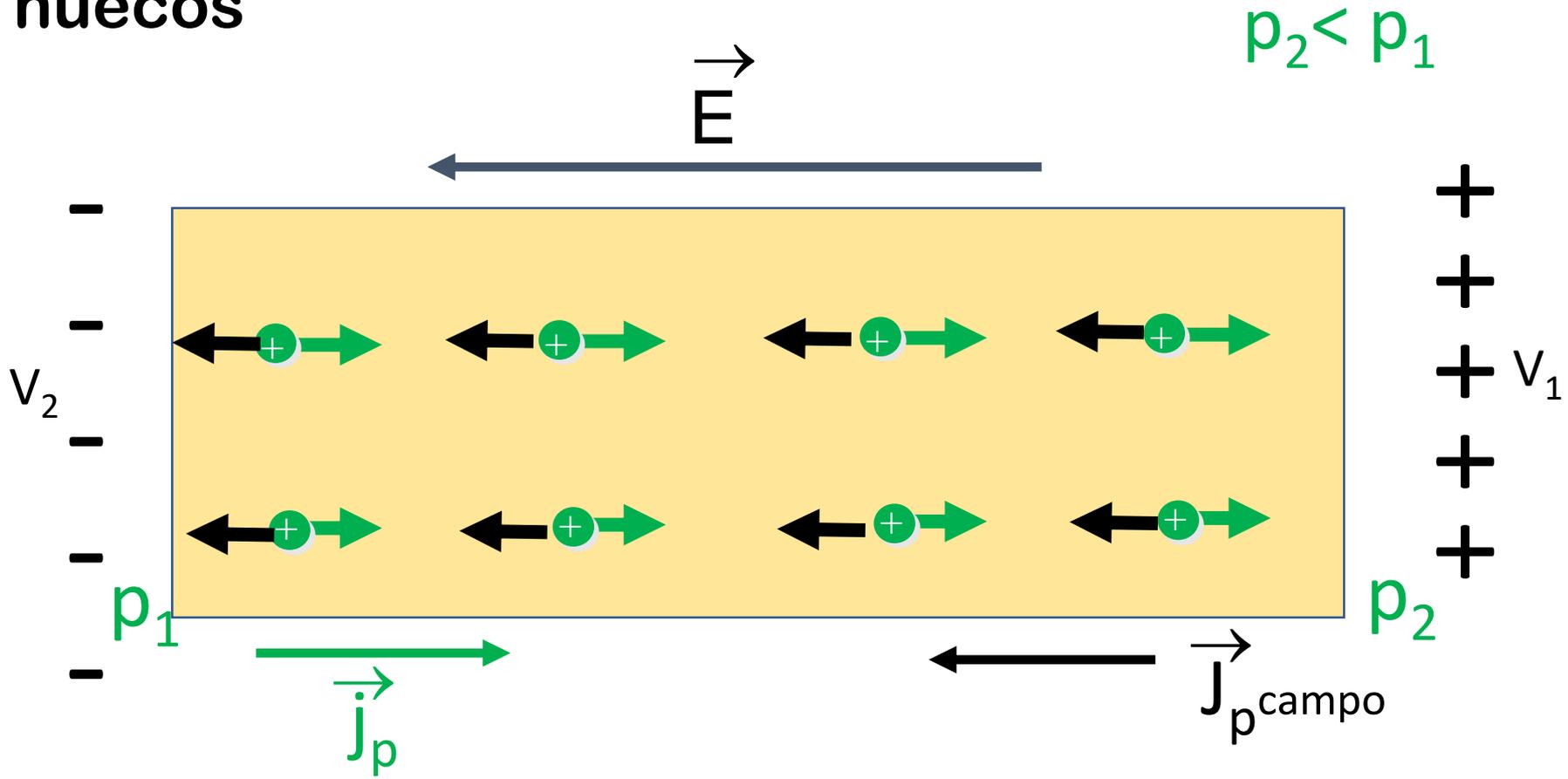
$$j_{n \text{ campo}} = q \cdot \mu_n \cdot n \cdot E$$

Sustituyo y resuelvo:

$$V_{21} = V_2 - V_1 = -(D_n / \mu_n) \cdot \ln(n_1 / n_2)$$

La densidad de corriente total es la suma de la densidad de corriente de arrastre y la corriente de difusión

EQUILIBRIO entre DIFUSIÓN y CAMPO ELECTRICO en huecos



$j_{p \text{ difusión}} = -q \cdot D_p \cdot dp/dx$

$\vec{j}_p = q \cdot D_p \cdot \vec{\nabla} p$

$j_p = q \cdot \mu_p \cdot p \cdot E$

Equilibrio: $j_{p \text{ difusión}} + j_{p \text{ campo}} = 0$

EQUILIBRIO entre DIFUSIÓN y CAMPO ELECTRICO en huecos

$$\text{Equilibrio: } j_{n \text{ difusión}} + j_{n \text{ campo}} = 0$$

$$j_{p \text{ difusión}} = q \cdot D_p \cdot dp/dx$$

$$E = -dV/dx$$

$$j_{p \text{ campo}} = q \cdot \mu_p \cdot p \cdot E$$

Sustituyo y resuelvo:

$$V_{21} = V_2 - V_1 = -(D_p / \mu_p) \cdot \ln(p_1 / p_2)$$

Equilibrio difusión-E para h y e-

Relación de Einstein

Si $p_1 \cdot n_1 = n_i^2$ $p_2 \cdot n_2 = n_i^2$

se obtiene: $p_1/p_2 = n_2/n_1$ $D_p/\mu_p = D_n/\mu_n$

considerando: $n_1 = n_i \cdot e^{(E_F - E_{Fi1})/kT}$ $n_2 = n_i \cdot e^{(E_F - E_{Fi2})/kT}$

$$E_{Fi2} - E_{Fi1} = q \cdot (V_1 - V_2)$$

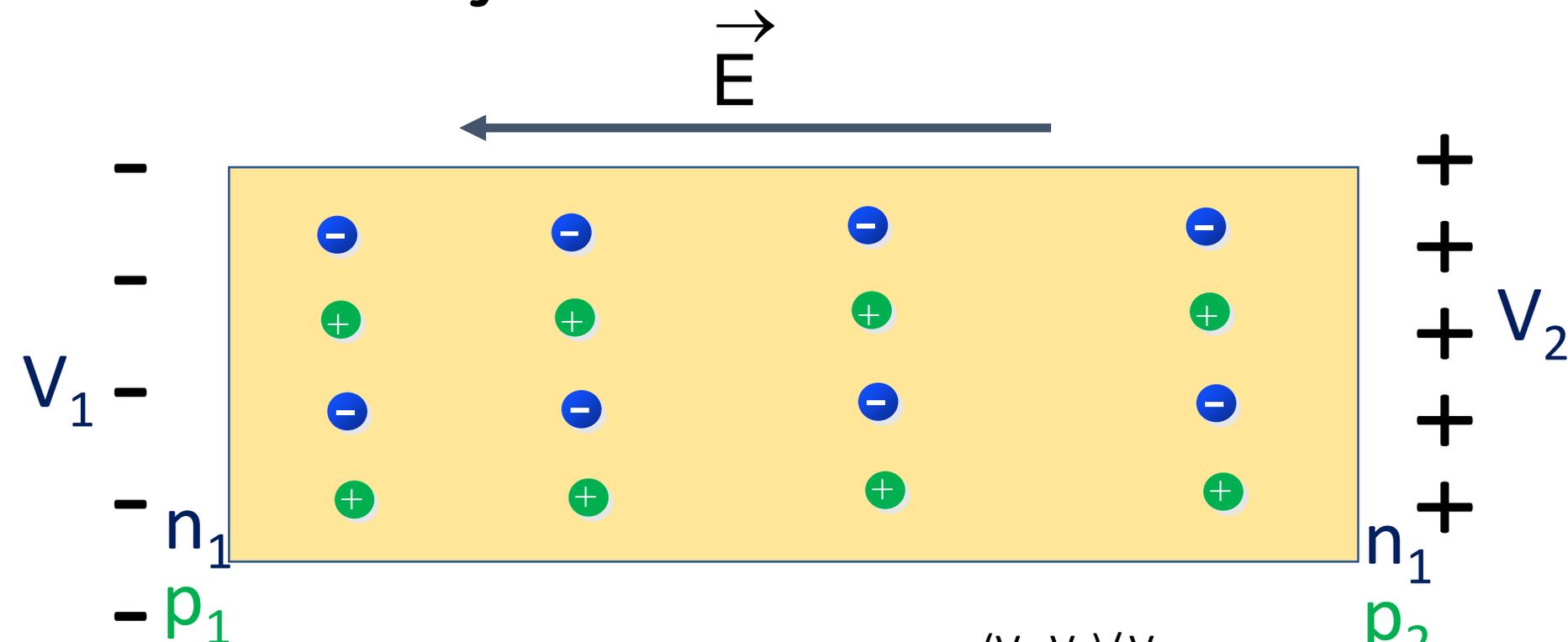
se obtiene: $n_2/n_1 = e^{q \cdot (V_2 - V_1)/kT}$ y, por tanto:

$$\cancel{V_2 - V_1} = (D_n/\mu_n) \cdot \ln(n_2/n_1) = (D_n/\mu_n) \cdot q \cdot \cancel{(V_2 - V_1)/kT}$$

$$D_n/\mu_n = kT/q = V_T \text{ (Relación de Einstein)}$$

también: $D_n/\mu_n = D_p/\mu_p = kT/q = V_T \rightarrow 26\text{mV (300K)}$

DIFUSIÓN DE e- y h



$$V_2 - V_1 = V_T \ln(n_2/n_1)$$

$$V_2 - V_1 = V_T \ln(p_1/p_2)$$

$$\begin{cases} p_1/p_2 = e^{(V_2 - V_1)/V_T} \\ n_2/n_1 = e^{(V_2 - V_1)/V_T} \end{cases}$$

$$\begin{aligned} n_2 &> n_1 \\ p_2 &< p_1 \end{aligned}$$

($V_T = 26\text{mV}$ a 300K)

Evolución temporal y espacial de un exceso en la concentración de minoritarios

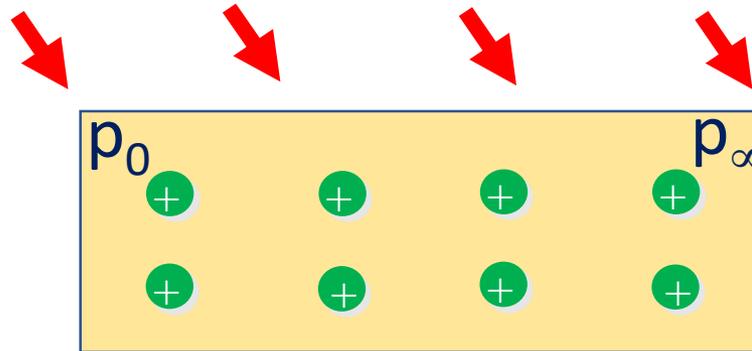
Considero semiconductor **tipo-n**

Para $t < 0$, $p(t) = p_\infty$



$$n_\infty \gg p_\infty$$

Para $t = 0$, incide luz $\rightarrow \Delta p = \Delta n$ $p(0) = n(0) = n_0 \approx n_\infty$
 (Hipótesis de baja inyección: $p_0 \ll n_\infty$)



$$n'(x) = n(x) - n_\infty$$

$$p'(x) = p(x) - p_\infty$$

1)

$$p'_0 \gg p_\infty$$

$$n'_0 \ll n_\infty$$

2)

$$p'_0 \cong p_0 \gg p_\infty$$

$$n'_0 \cong n_\infty$$

$$p'(0) = n'_0$$

$$n(0) = n_{(0)} \approx n'_0 + n_\infty$$

Idem para p

Evolución temporal y espacial de un exceso en la concentración de minoritarios

Definimos el “exceso de minoritarios”:

$$p'(x) = p(x) - p_{\infty} \quad p'_0 = p_0 - p_{\infty}$$

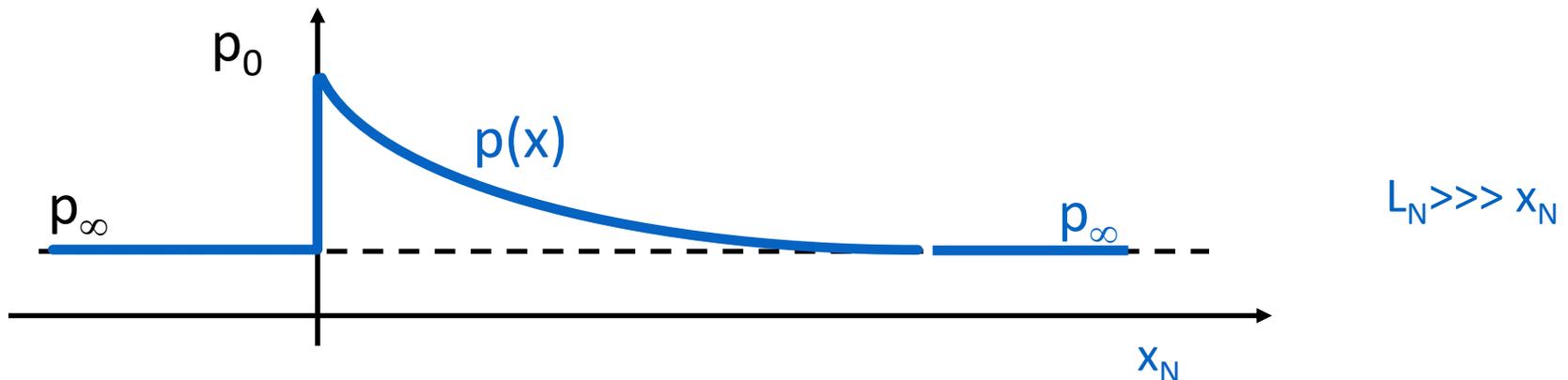
Cesa la luz => Hay un exceso de concentración de huecos con relación a la de equilibrio térmico. Se incrementan las recombinaciones.

La tasa de recombinación de huecos debe ser proporcional al exceso en su concentración:

$$-dp/dx = K \cdot p'(x) = K \cdot [p(x) - p_{\infty}]$$

$$-p(x) = p_{\infty} + (p_0 - p_{\infty}) \cdot e^{-x/L_p}$$

donde $L_p = K^{-1}$ (longitud de difusión de los huecos)



En el caso de la evolución...

$$p'(t) = p(t) - p_\infty \quad p'_0 = p_0 - p_\infty \rightarrow \text{similar a la evolución espacial}$$

La tasa de recombinación de huecos debe ser proporcional al exceso en su concentración:

$$-dp/dt = K_1 \cdot p' \quad (dp/dt = dp'/dt) \text{ donde } p' \text{ es la concentración de minoritarios luego de la inyección.}$$

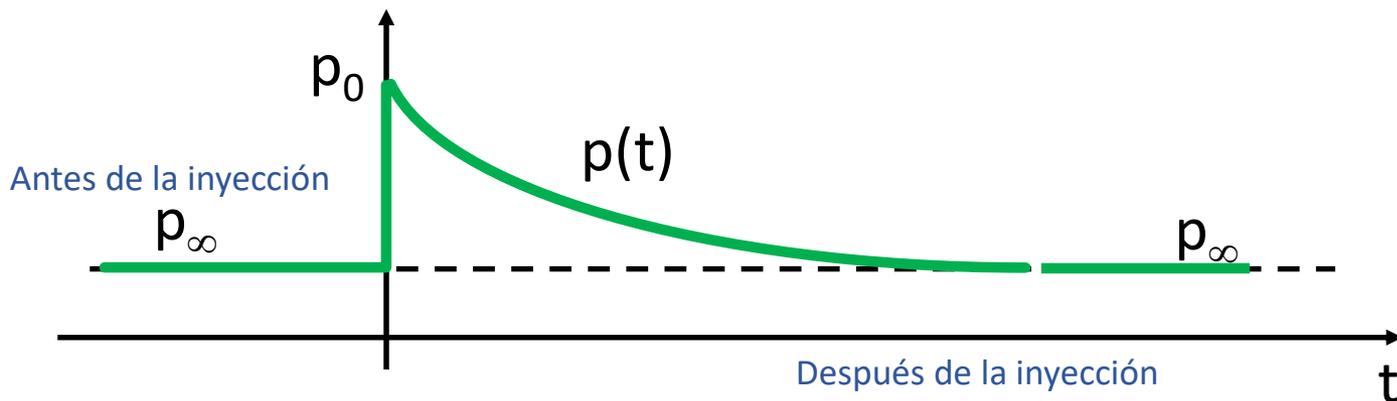
Integrando:

$$p(t) = p_\infty + (p_0 - p_\infty) \cdot e^{-t/\tau_p}$$

donde $\tau_p = 1/K_1$ (vida media de los huecos)

Constante de equilibrio del proceso

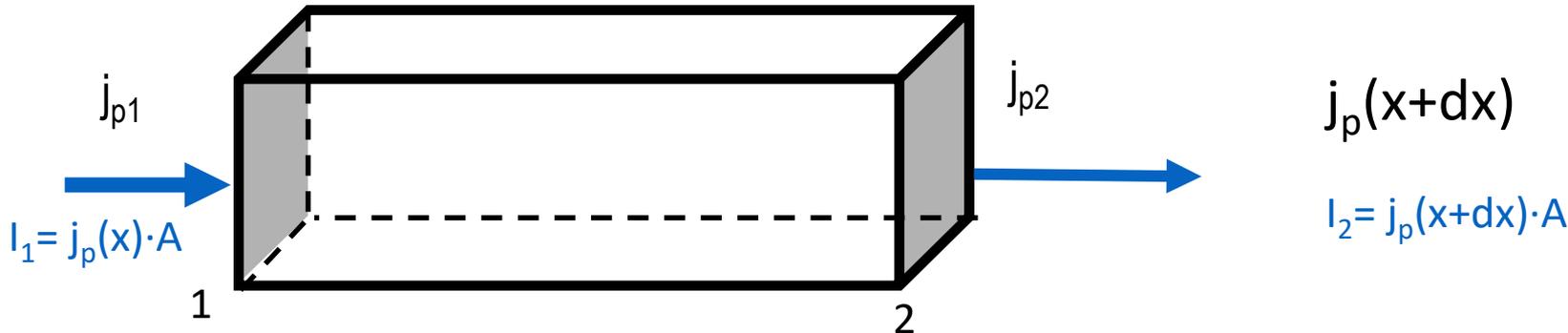
Al momento de la inyección



Ecuación de continuidad de excesos minoritarios

Relacionar la variación temporal y espacial de la concentración de los portadores. Considero los huecos

1) Existe una acumulación de h al entrar y salir → distinta densidad de corriente



3) Por la luz se produce un exceso de concentración de huecos y electrones

Variación de la concentración de huecos en el volumen A · dx por unidad de tiempo (G_L):

$$G_L = \frac{j_p(x) \cdot A - j_p(x+dx) \cdot A}{q \cdot A \cdot dx}$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = G_L - [p(t) - p_\infty] / \tau_p - \nabla \cdot \vec{j}_p / q$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = G_L - [n(t) - n_\infty] / \tau_n + \nabla \cdot \vec{j}_n / q$$