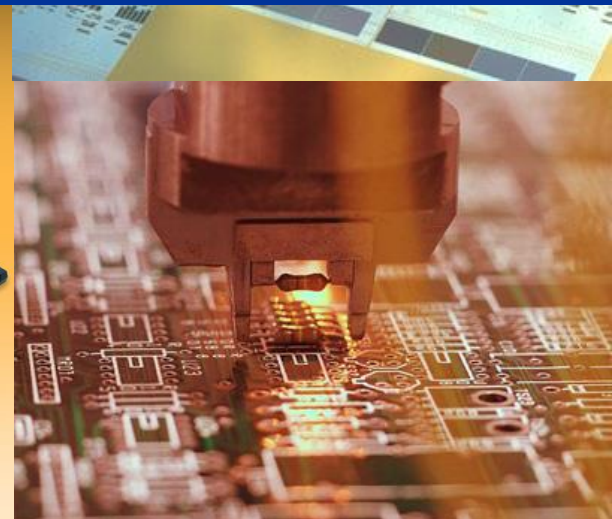


# EL-2207 ELEMENTOS ACTIVOS



**ITCR - Elementos Activos**

# SEMICONDUCTORES

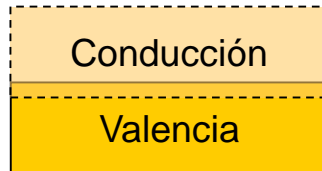
ELEMENTOS ACTIVOS

EL-2207

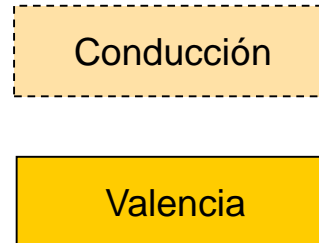
# Clasificación de Materiales – Modelo de Bandas (Repaso)

- Bandas de energía del material definen propiedades eléctricas, ópticas y térmicas
  - Clasificación de acuerdo con propiedades eléctricas

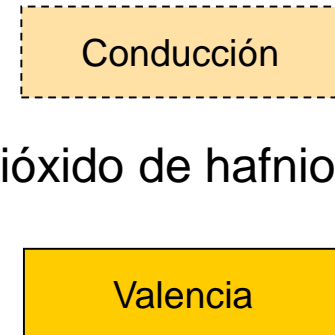
## Conductores



## Semiconductores



## Aislantes



Dióxido de hafnio  $\text{HfO}_2$

- Ancho de banda prohibida muy pequeño o traslape de bandas
- Cobre, Aluminio, Oro
- Banda prohibida = 1-3 eV
- Silicio, Germanio, compuestos como GaAs, InP
- Banda prohibida = 8-9 eV
- Diamante, dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ), nitruro de silicio ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ )



# Clasificación de los Elementos (Repaso)

The elements in the periodic table can be grouped by their metallic properties. An element is either a metal, a nonmetal, or a metalloid (an element that displays some properties of both metals and nonmetals).

1 displays some properties of both metals and nonmetals).

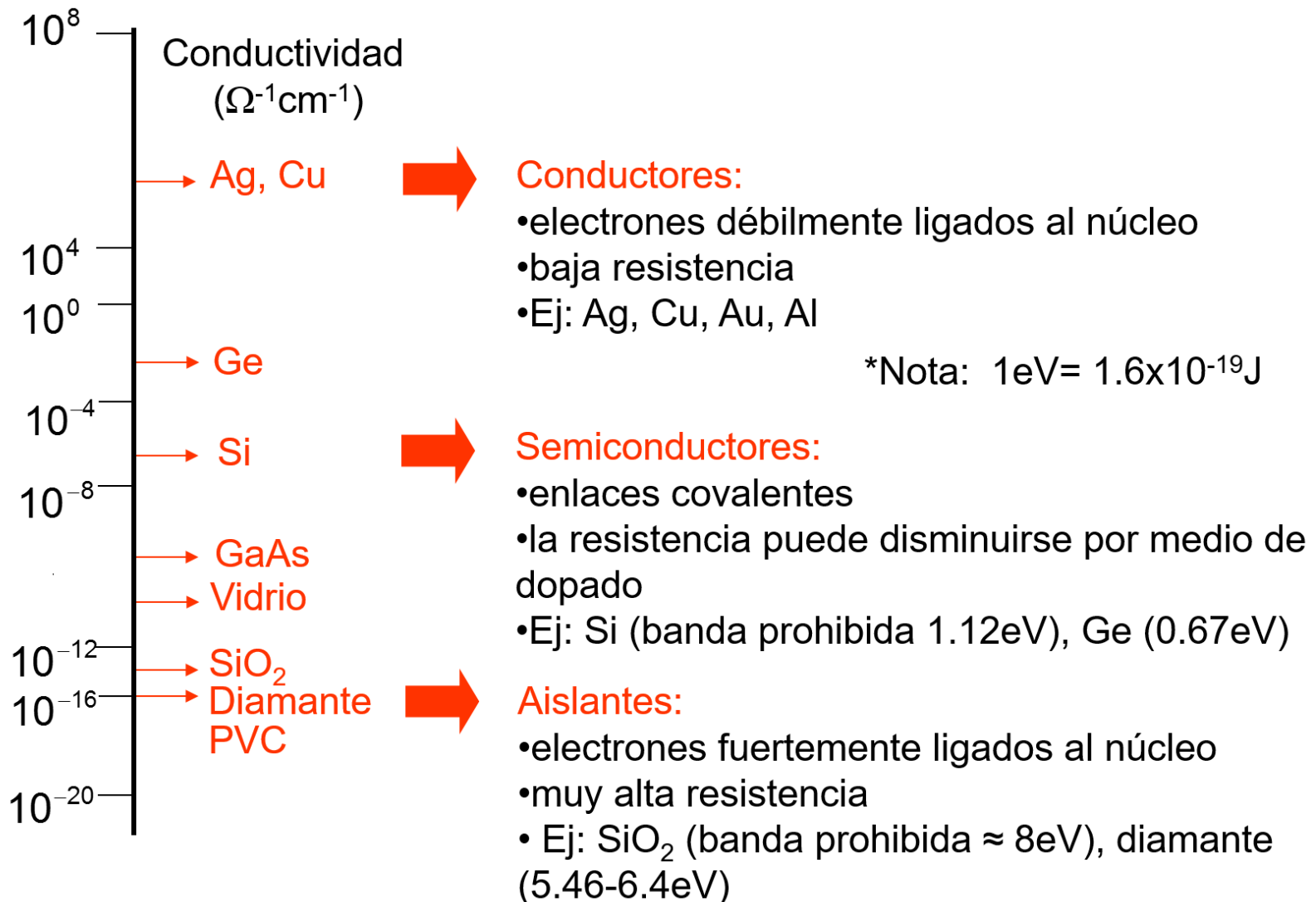
1 H 1.008	2 He 4.0026																
3 Li 6.94	4 Be 9.012	13 B 10.81	14 C 12.011	15 N 14.007	16 O 15.999	17 F 18.998	18 Ne 20.18										
11 Na 22.99	12 Mg 24.31	3 Al 26.98	4 Si 28.09	5 P 30.97	6 S 32.06	7 Cl 35.453	8 Ar 39.948										
19 K 39.10	20 Ca 40.18	21 Sc 44.96	22 Ti 47.90	23 V 50.94	24 Cr 51.996	25 Mn 54.94	26 Fe 55.85	27 Co 58.93	28 Ni 58.71	29 Cu 63.54	30 Zn 65.37	31 Ga 69.72	32 Ge 72.59	33 As 74.92	34 Se 78.96	35 Br 79.91	36 Kr 83.80
37 Rb 85.47	38 Sr 87.62	39 Y 88.906	40 Zr 91.22	41 Nb 92.91	42 Mo 95.94	43 Tc (99)	44 Ru 101.1	45 Rh 102.91	46 Pd 106.4	47 Ag 107.87	48 Cd 112.40	49 In 114.82	50 Sn 118.69	51 Sb 121.75	52 Te 127.60	53 I 126.90	54 Xe 131.30
55 Cs 132.91	56 Ba 137.34	57 La 138.91	72 Hf 178.49	73 Ta 180.95	74 W 183.85	75 Re 186.2	76 Os 190.2	77 Ir 192.2	78 Pt 195.09	79 Au 196.97	80 Hg 200.59	81 Tl 204.37	82 Pb 207.2	83 Bi 208.98	84 Po (210)	85 At (218)	86 Rn (222)
87 Fr (223)	88 Ra (226)	89 Ac (227)	104 Rf (261)	105 Db (262)	106 Sg (266)	107 Bh (264)	108 Hs (269)	109 Mt (268)	110 Uun (271)	111 Uuu (272)	112 Uub (277)						

 metal     metalloid     nonmetal

Lanthanide Series	58 <b>Ce</b> 140.12	59 <b>Pr</b> 140.91	60 <b>Nd</b> 144.24	61 <b>Pm</b> (147)	62 <b>Sm</b> 150.4	63 <b>Eu</b> 152.0	64 <b>Gd</b> 157.25	65 <b>Tb</b> 158.92	66 <b>Dy</b> 162.50	67 <b>Ho</b> 164.93	68 <b>Er</b> 167.26	69 <b>Tm</b> 168.93	70 <b>Yb</b> 173.04	71 <b>Lu</b> 174.97
	Actinide Series	90 <b>Th</b> 232.04	91 <b>Pa</b> 231.04	92 <b>U</b> 238.03	93 <b>Np</b> (237)	94 <b>Pu</b> (244)	95 <b>Am</b> (243)	96 <b>Cm</b> (247)	97 <b>Bk</b> (247)	98 <b>Cf</b> (251)	99 <b>Es</b> (252)	100 <b>Fm</b> (257)	101 <b>Md</b> (258)	102 <b>No</b> (259)

## ● Metallic Properties

# Clasificación de Materiales

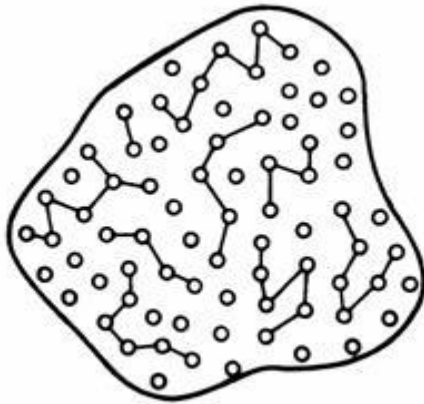


# Semiconductores

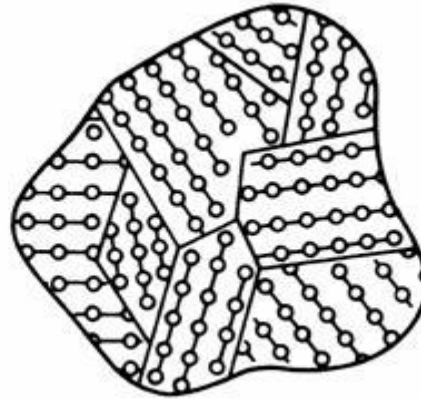
- Conductividad  $\sigma = 10^{-6} \text{ .. } 10^{-2} \text{ S/cm}$
- Semiconductores elementales:
  - Elementos semiconductores más importantes: silicio y germanio (grupo IV de tabla periódica)
  - Compuestos binarios:
    - Compuestos III-V: AlP, AlAs, GaN, GaP, GaAs, InAs, InP
    - Compuestos II-VI: ZnO, ZnSe, ZnTe, CdS, CdSe, CdTe
  - Compuestos ternarios: AlGaAs, GaAsP, HgCdTe, etc.
  - Compuestos cuaternarios: InGaAsP, AlGaInAs, etc.
  - Aleaciones:  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ,  $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{P}_y$
- Aplicaciones:
  - Transistores, circuitos integrados: Si, SiGe, GaAs
  - Diodos emisores de luz (LEDs): GaAs, GaN, GaP
  - Lasers (AlGaInAs, InGaAsP, GaAs, AlGaAs)
  - Detectores lumínicos (Si, InGaAsP, CdSe, InSb, HgCdTe)

# Sólidos Cristalinos

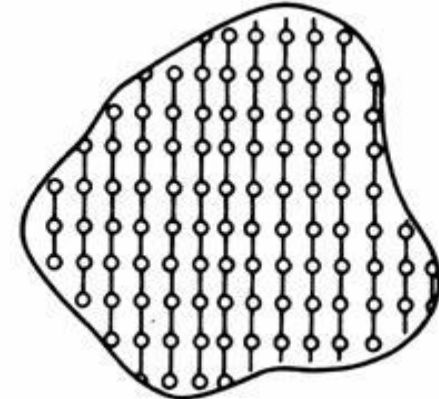
## Clasificación de sólidos: amorfos, policristalinos y cristalinos



Sólidos amorfos:  
átomos no siguen  
ningún orden, no  
forman estructura  
ordenada regular



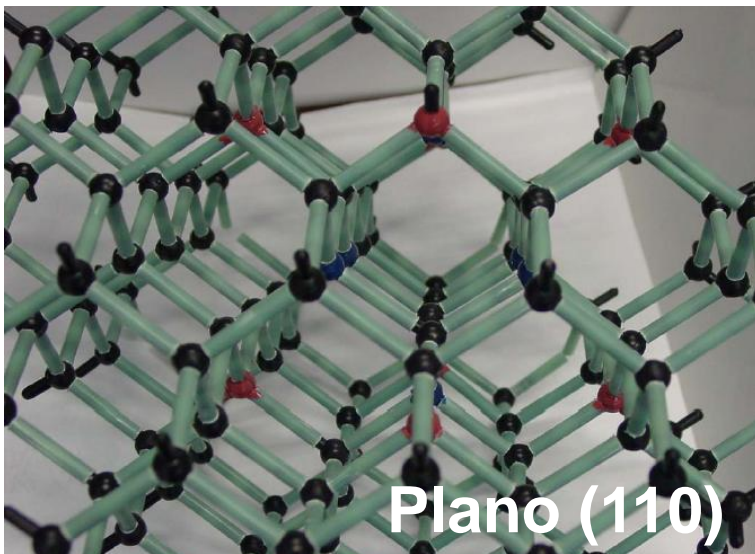
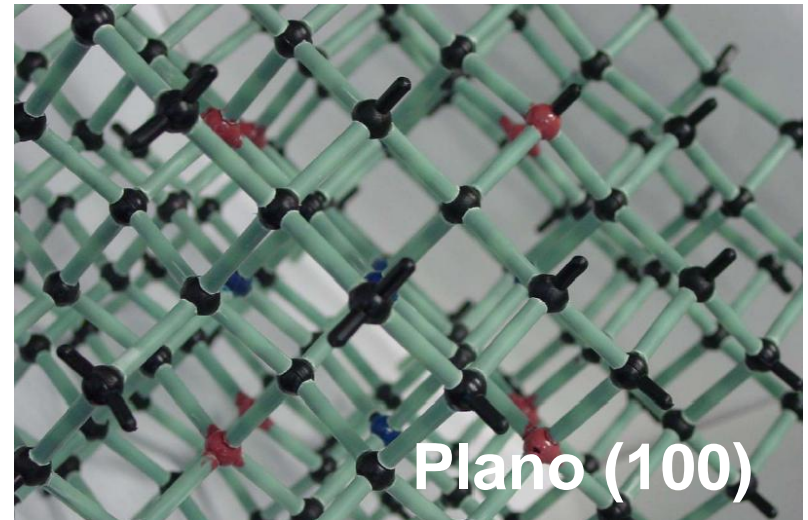
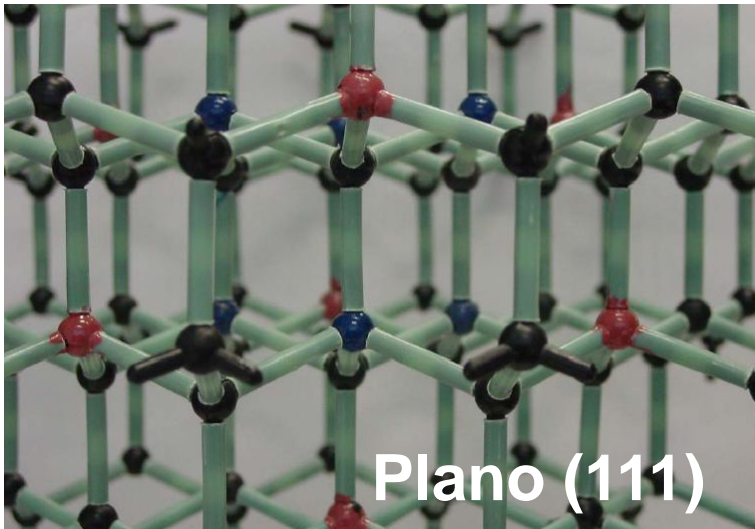
Policristalinos:  
segmentos cristalinos,  
no estructura regular  
en todo el material



Sólidos cristalinos:  
átomos forman una  
estructura regular en  
todo el material

El grado de cristalinidad determina propiedades y aplicación del material

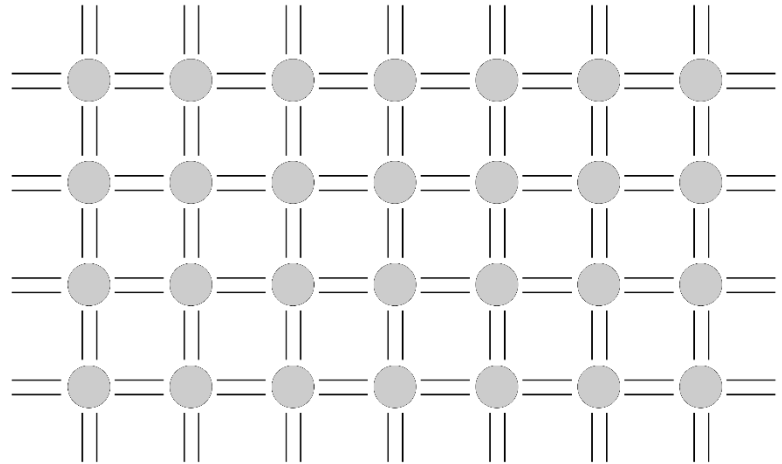
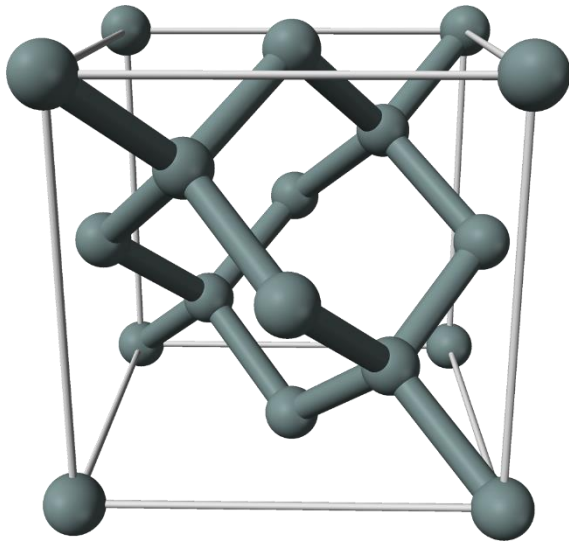
# Crystal de Silicio



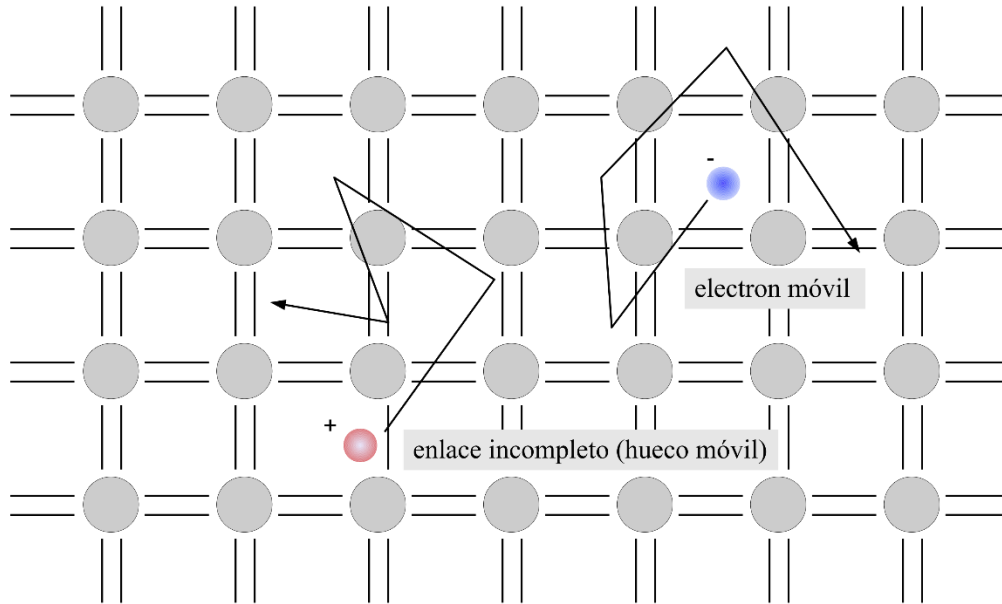
- Orientación del cristal afecta
  - Proceso de fabricación de circuitos integrados
  - Comportamiento de los dispositivos fabricados



# Estructura cristalina



# Equilibrio térmico



Tasa de generación

$$G = G_{th}(T) + G_{op}$$

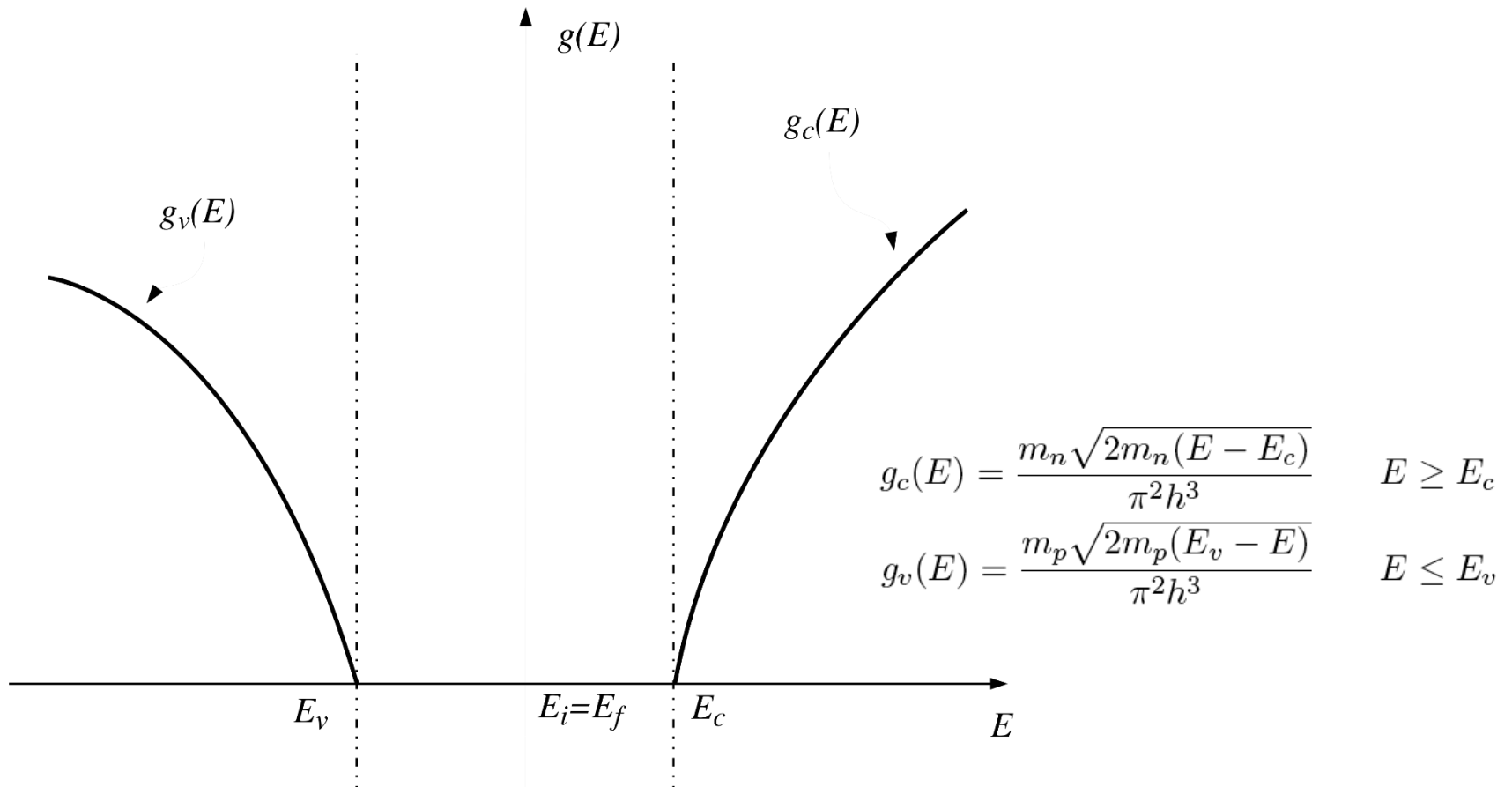
Tasa de recombinación

$$R = k \times n \times p$$

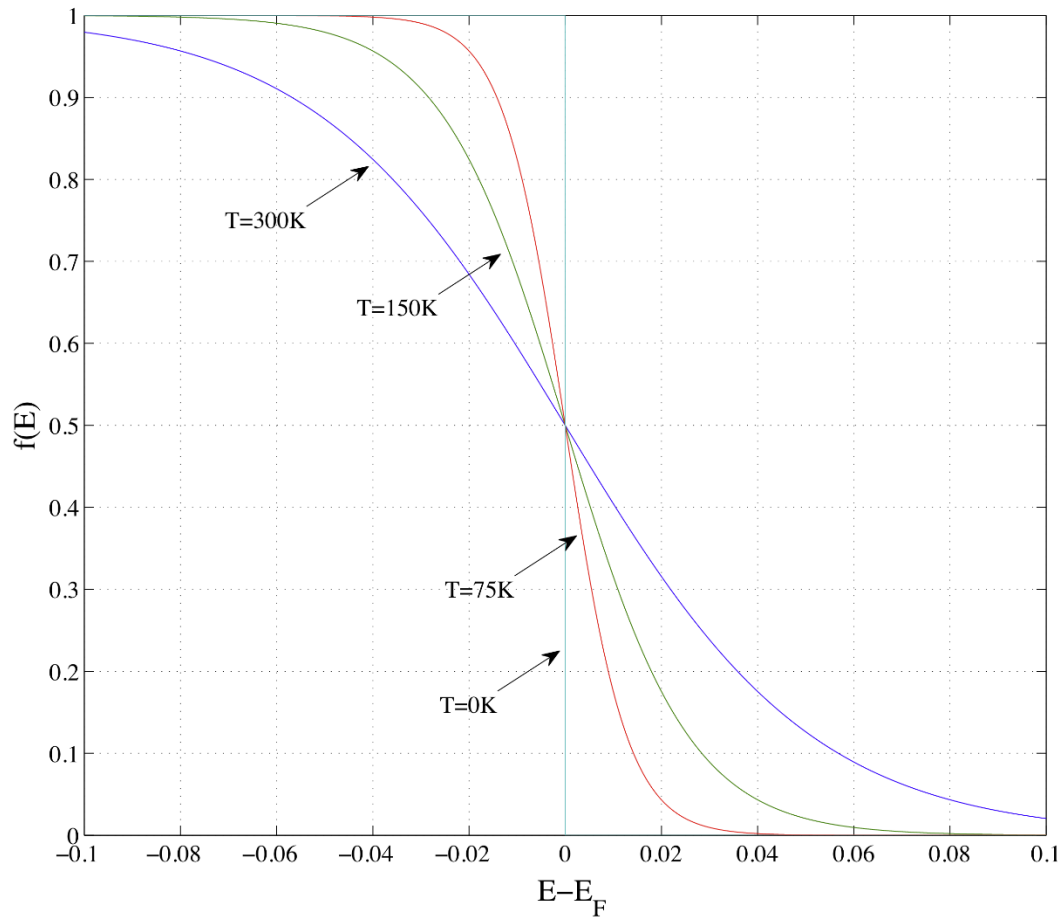
Ley de acción de masas

$$n_i^2 = \frac{G_{th}(T) + G_{op}}{k}$$

# Equilibrio térmico



# Función de Fermi



Electrones

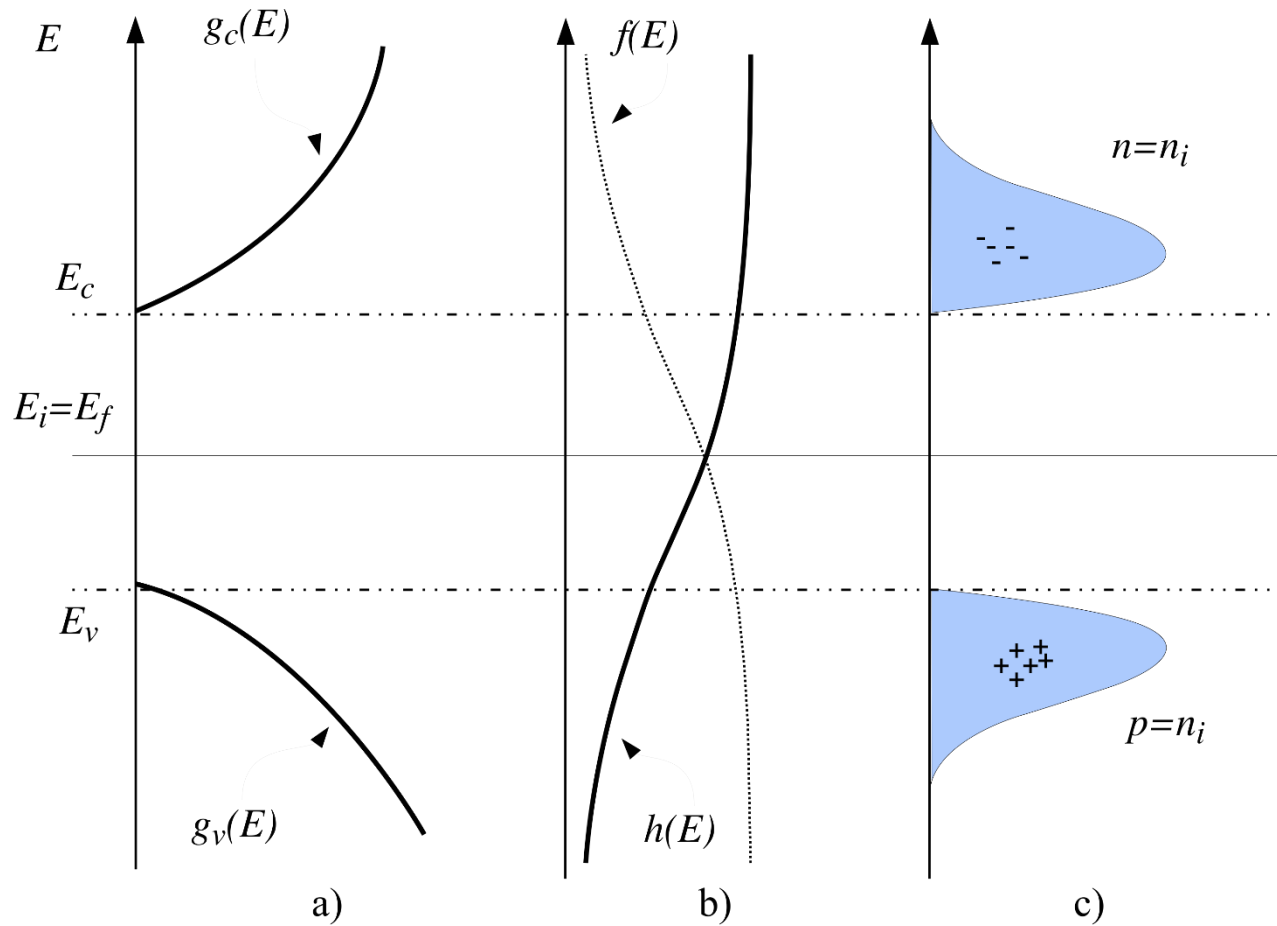
$$f(E) = \frac{1}{1 + e^{(E-E_F)/kT}}$$

Huecos

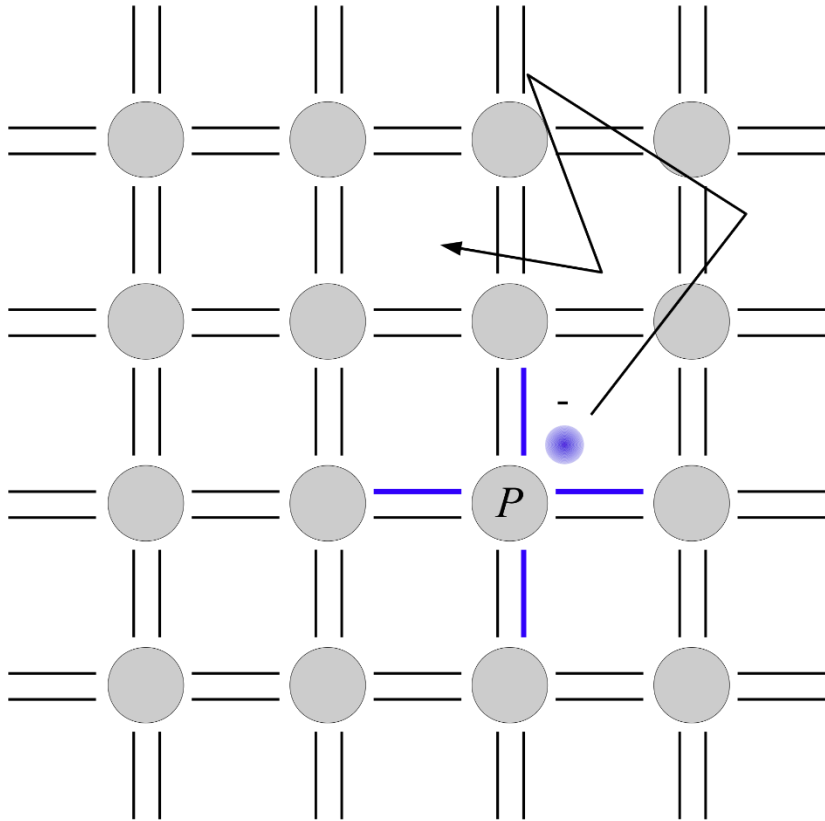
$$h(E) = 1 - \frac{1}{1 + e^{(E-E_F)/kT}}$$



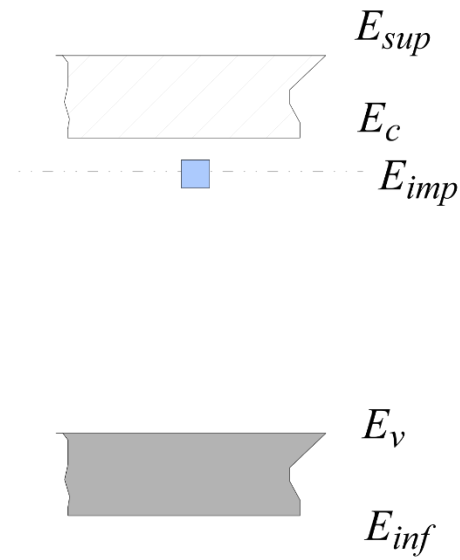
# Función de Fermi



# Dopado N

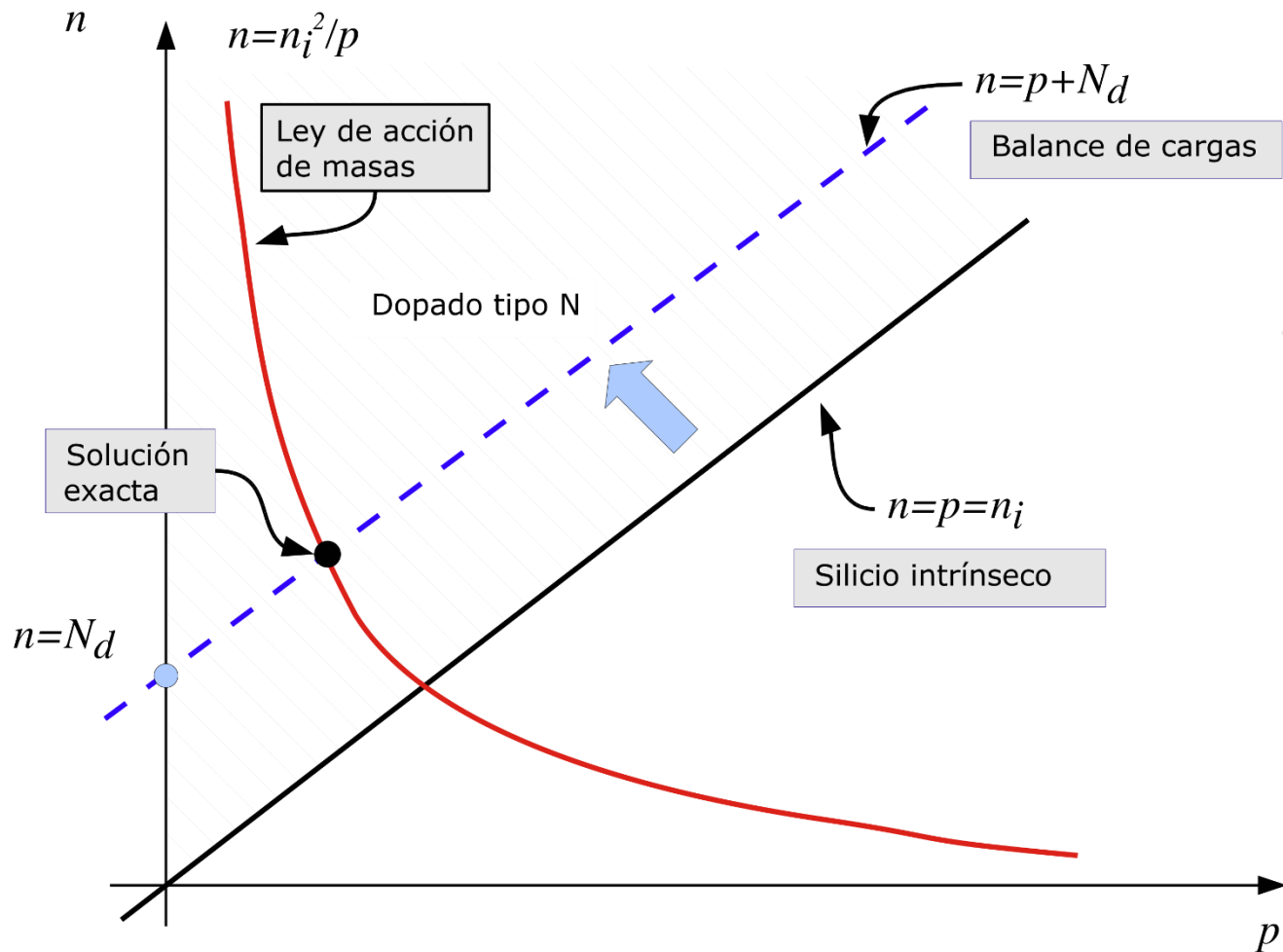


a)



b)

# Equilibrio de cargas



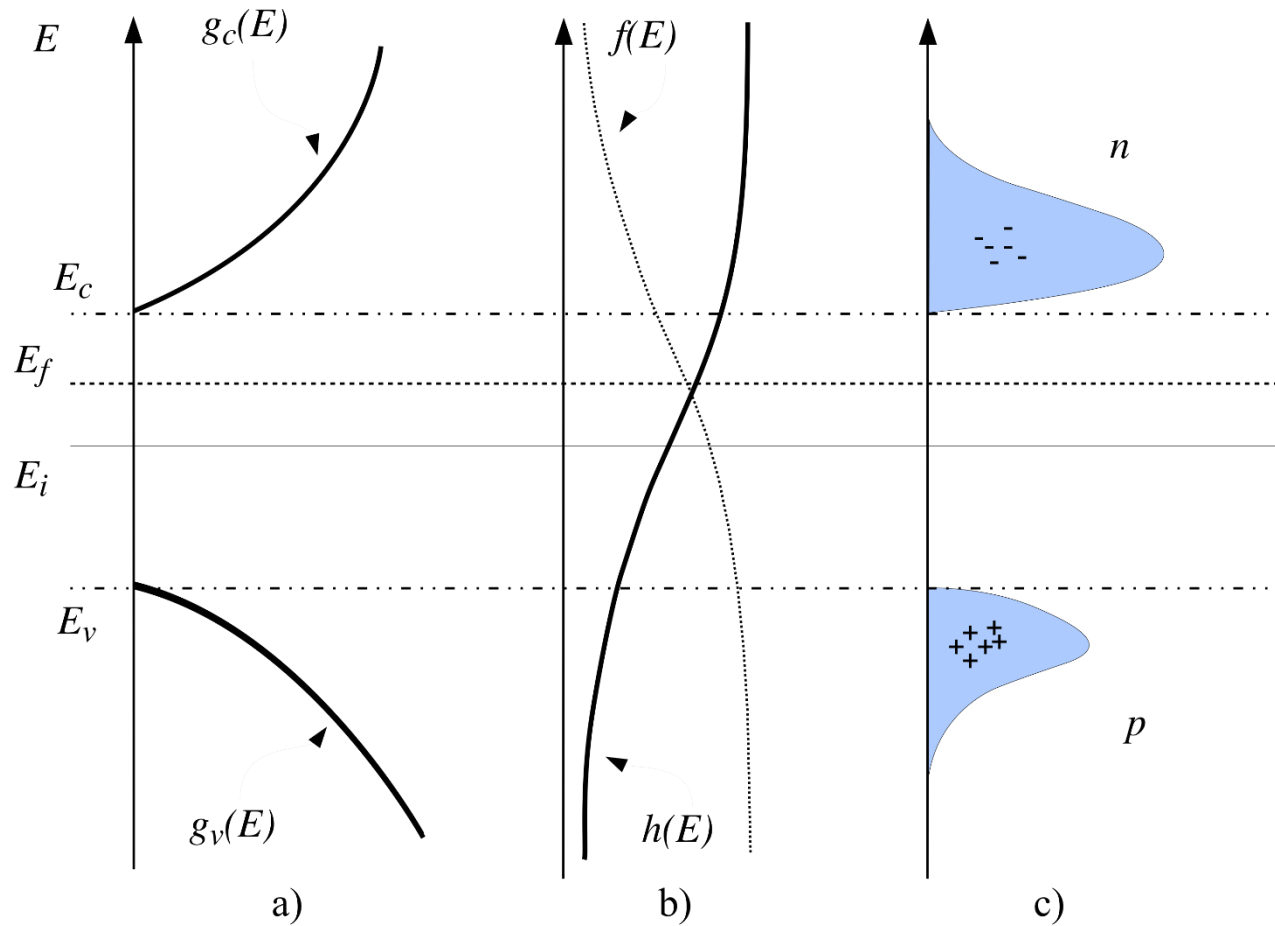
$$\rho = 0 = q(-n + p + N_d)$$

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

$$n \approx N_d$$

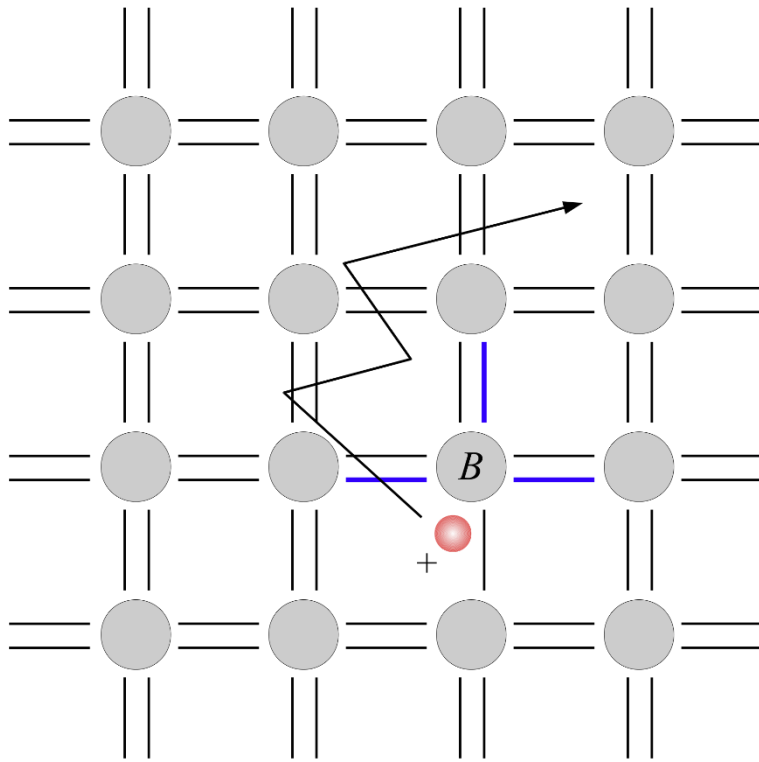
$$p \approx n_i^2 / N_d$$

# Densidad de estados

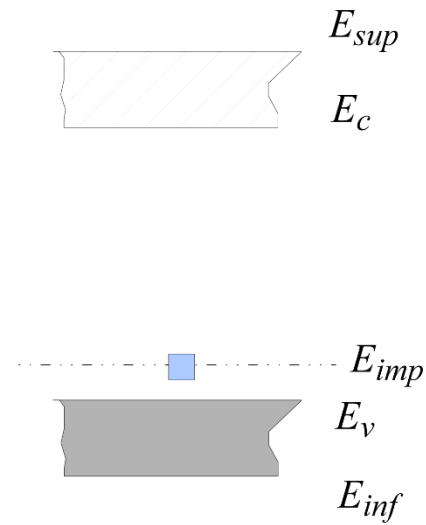




# Dopado P

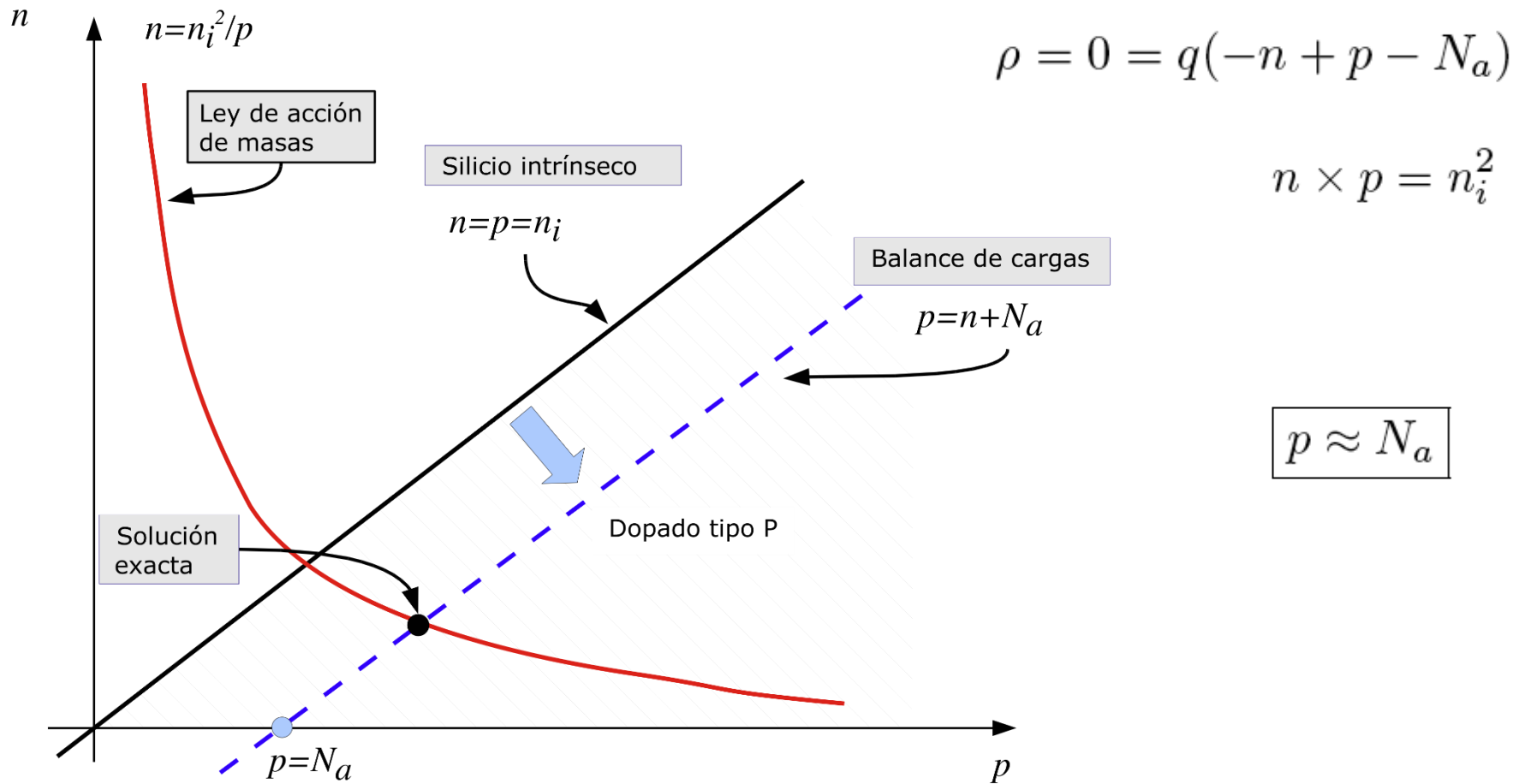


a)

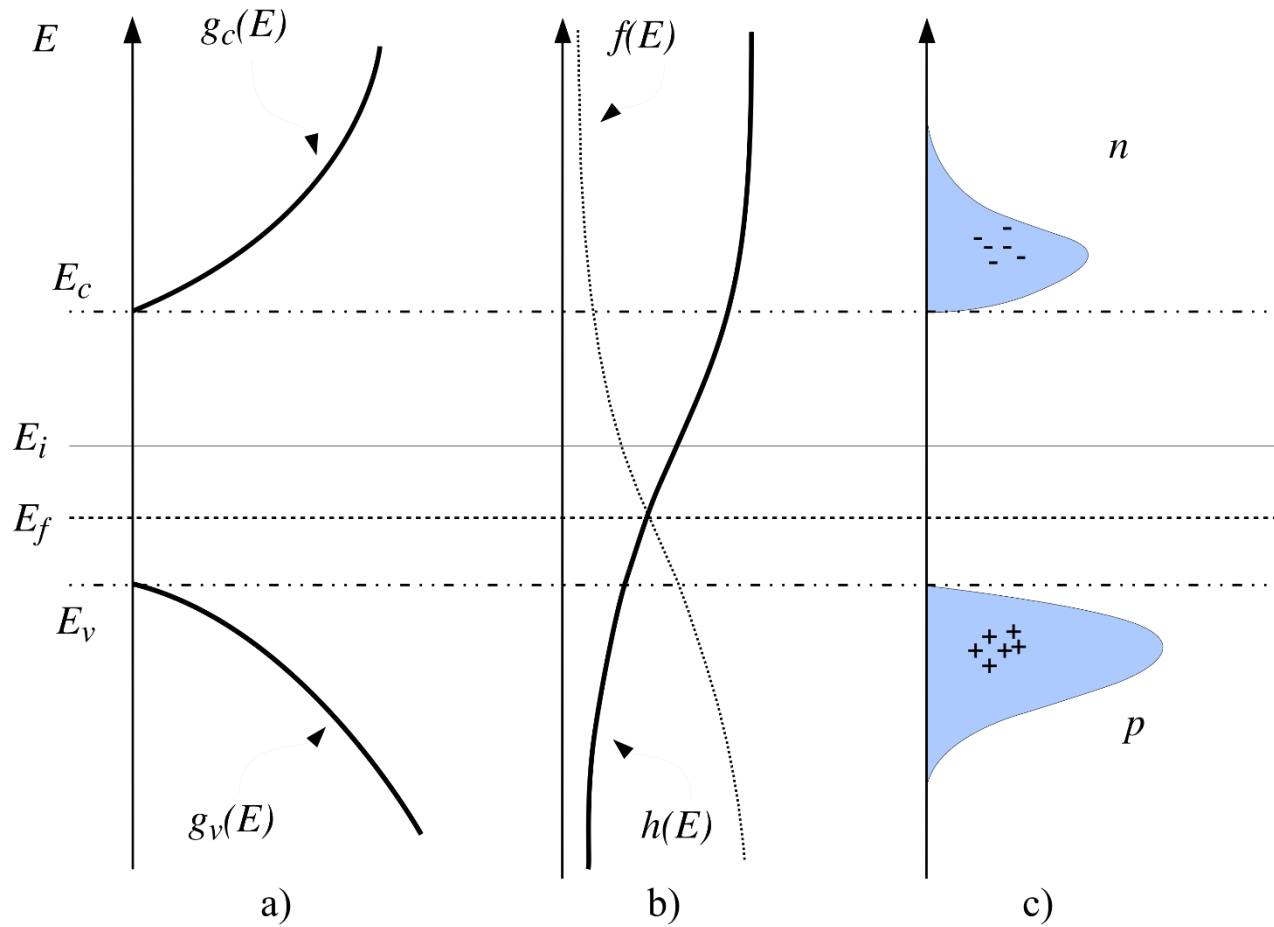


b)

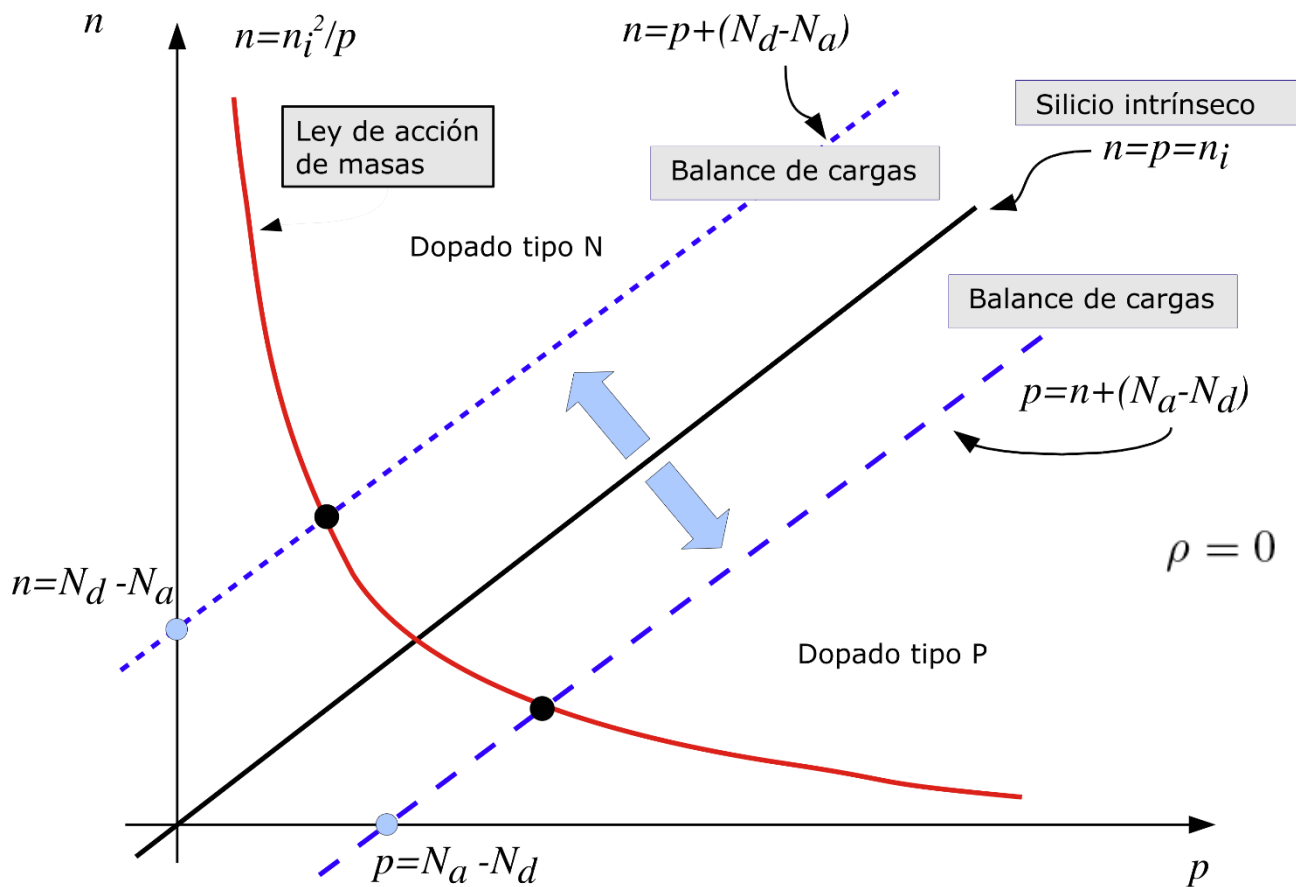
# Equilibrio de cargas



# Densidad de estados



# Compensación



$$\begin{aligned}\rho = 0 &= q(-n + p - N_a + N_d) \\ &= q(-n + p + (N_d - N_a))\end{aligned}$$

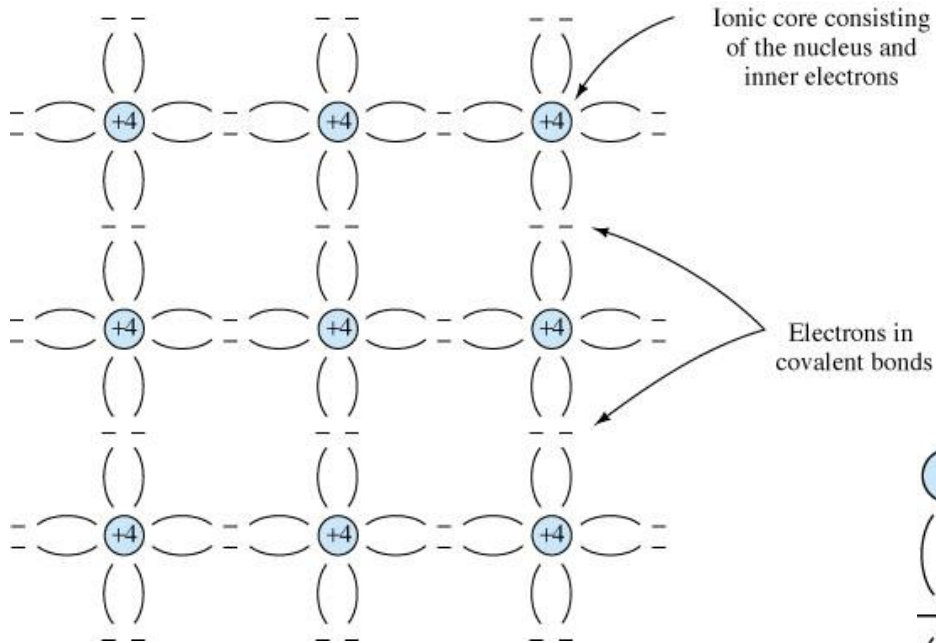
$$n \approx N_d - N_a$$

$$p \approx \frac{n_i^2}{N_d - N_a}$$





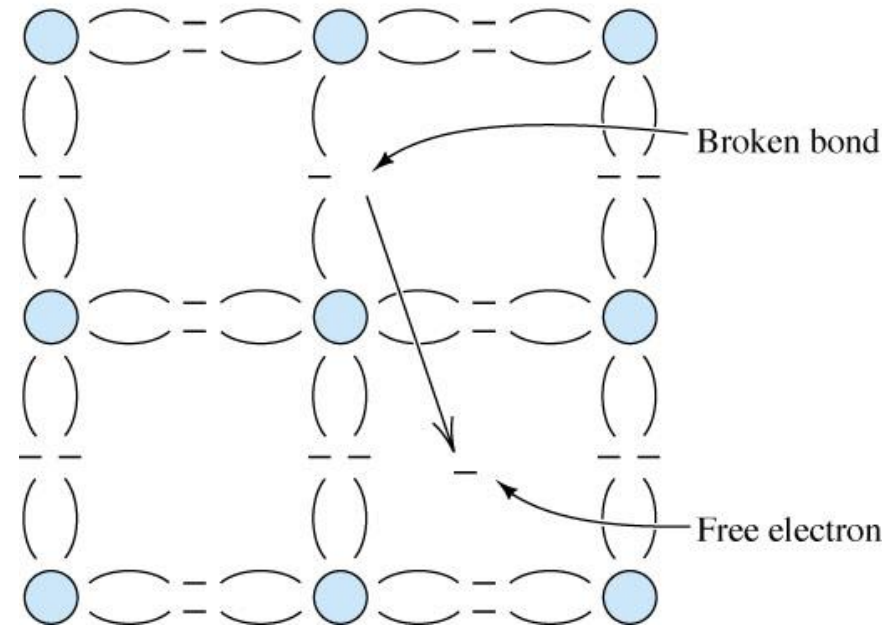
# Generación y Recombinación



Si: 4 electrones de valencia  
Enlaces covalentes

La energía térmica puede romper un enlace, crear una vacante (hueco) y un electrón libre.

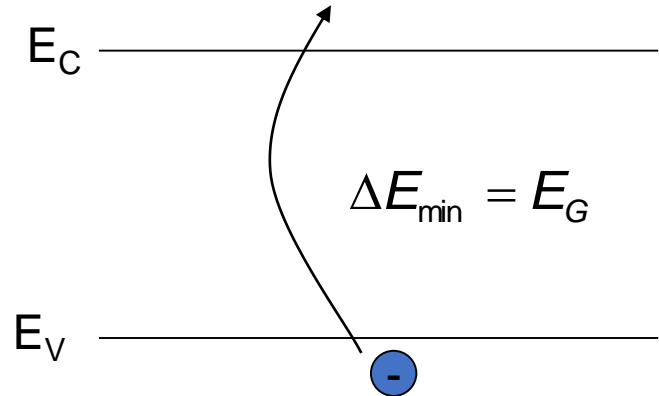
El hueco y el electrón pueden moverse libremente en el cristal.



# Generación y Recombinación

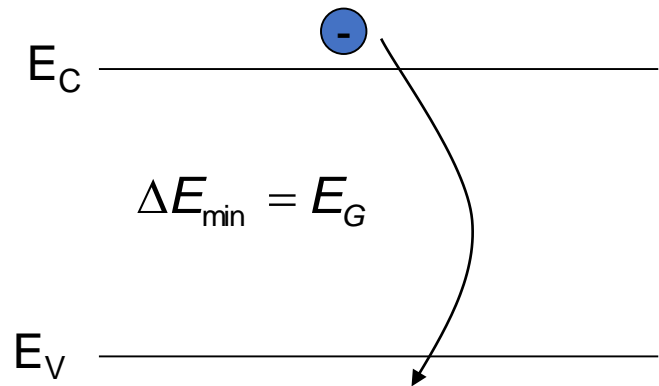
- **Generación:**

- Transición de un electrón de la banda de valencia a la banda de conducción
- Genera un hueco en la banda de valencia
- Creación de pares electrón-hueco



- **Recombinación:**

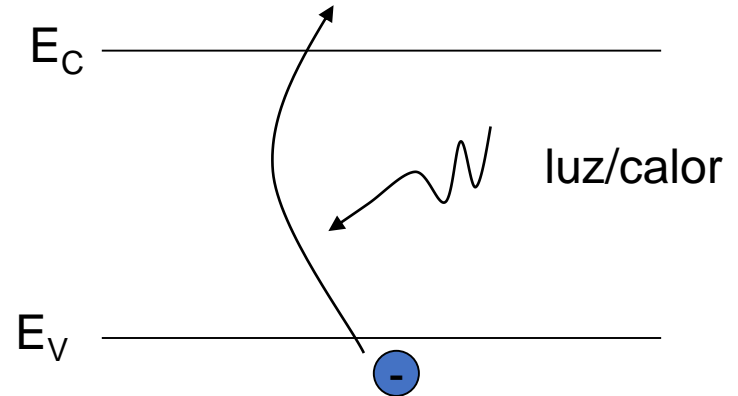
- Transición de un electrón de la banda de conducción a la banda de valencia
- Elimina un hueco de la banda de valencia
- Eliminación de pares electrón-hueco



# Causas de Generación y Recombinación

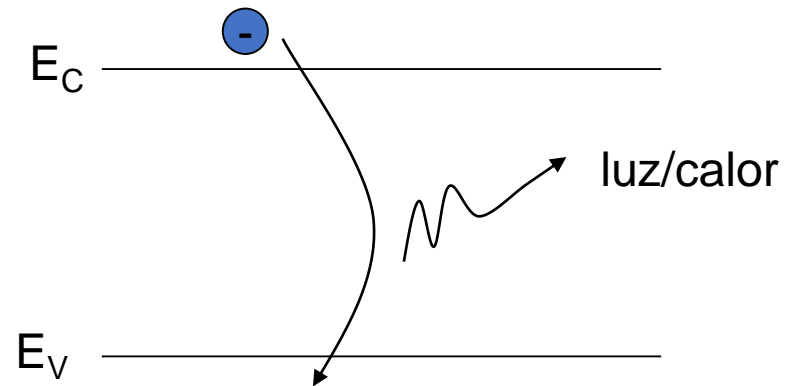
- Energía térmica

- Generación térmica directa
  - Ruptura de enlaces debido a vibración causada por temperatura
- Recombinación térmica directa
  - Liberación de calor debido a aniquilación de pares electrón-hueco



- Energía lumínica

- Fotones transfieren energía a un electrón para pasar de banda de valencia a banda de conducción
- Electrones liberan fotones al pasar de banda de conducción a banda de valencia





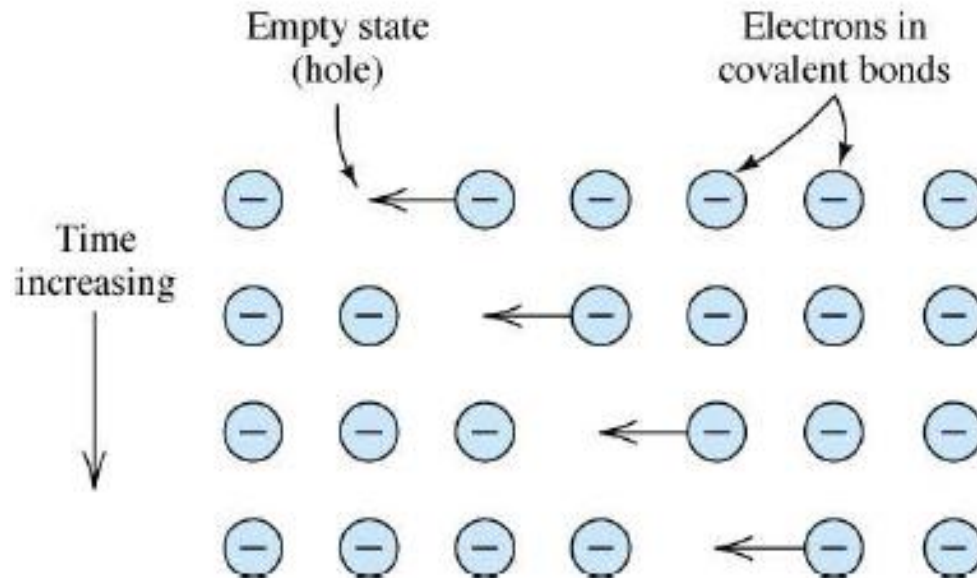
# El Concepto de Hueco

- El concepto de hueco es una representación de la banda de valencia con un estado electrónico vacío
- Estado vacío representado por una partícula de carga positiva, con igual magnitud de carga que el electrón
- Los electrones se mueven en la banda de conducción, los huecos se mueven en la banda de valencia
- Electrones y huecos interactúan en el proceso de conducción de corriente de huecos
- Masa efectiva\* de hueco 2..3 veces mayor que la de electrón

\*Masa efectiva: toma en cuenta el efecto del potencial del cristal y permite tratar a la partícula como si fuera una partícula libre en el vacío

# Corriente de Huecos

El movimiento de portadores de carga libres (electrones y huecos) causa un flujo de corriente en el semiconductor

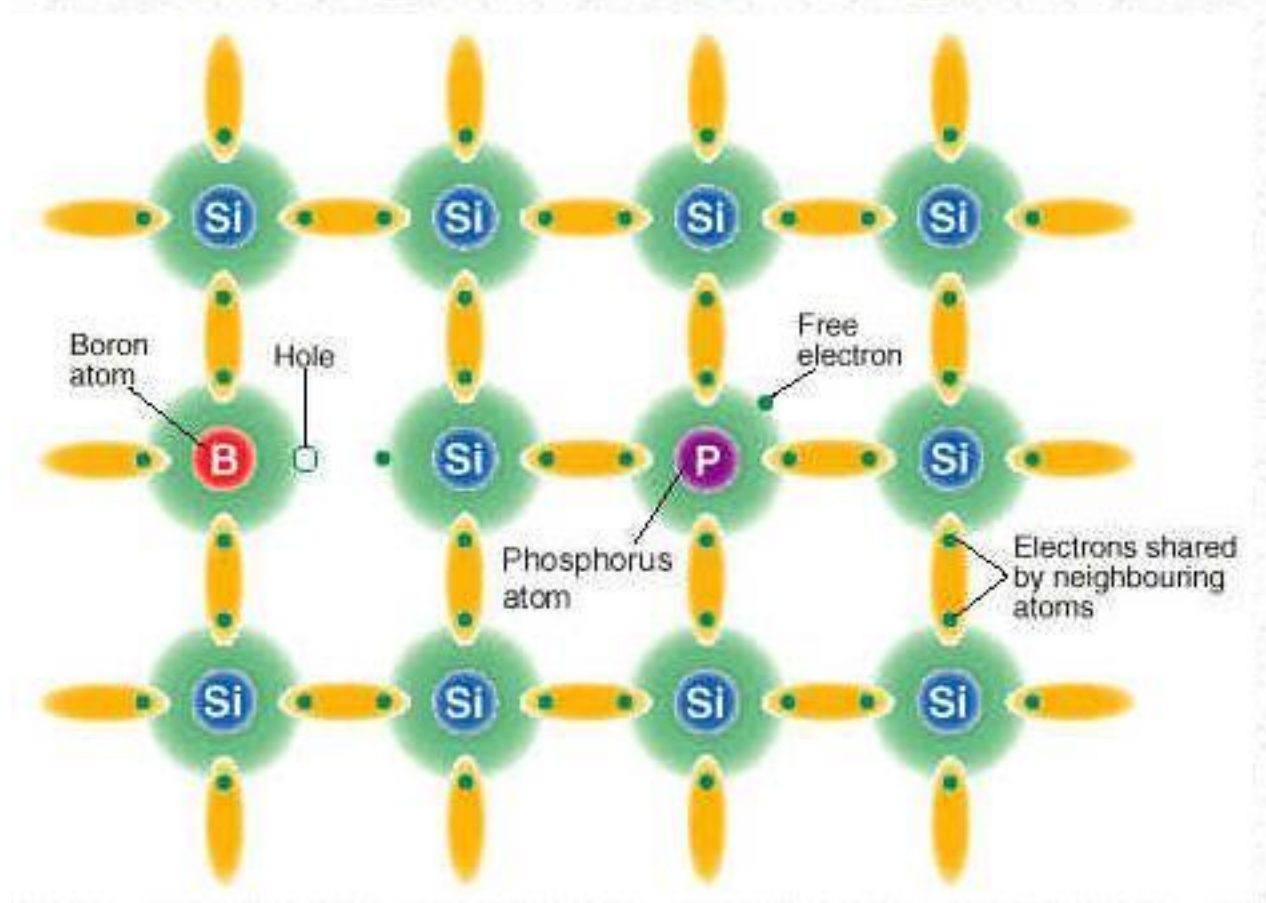


Conforme los electrones se mueven a la izquierda para llenar un hueco, el hueco se mueve a la derecha  $\Rightarrow$  equivale a una corriente de huecos

La corriente de huecos tiene la misma dirección que la corriente técnica

# Dopado

Dopado: Introducción de impurezas (átomos) sustitucionales en un material INTRÍNSECO (puro) para modificar su conductividad eléctrica

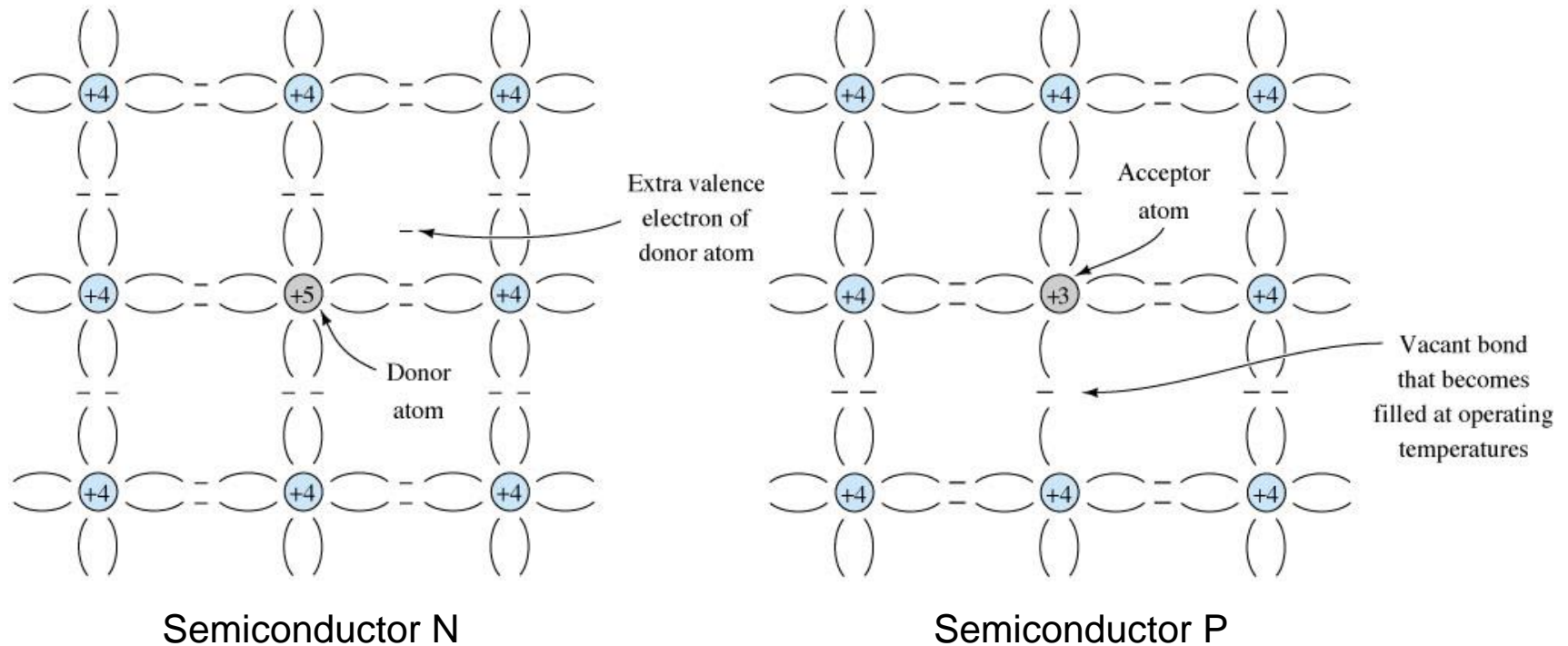


Los materiales dopados se conocen como materiales EXTRÍNSECOS

# Dopado

→ Donadores: 5 electrones de valencia (As, P, Sb) → semiconductor de tipo N

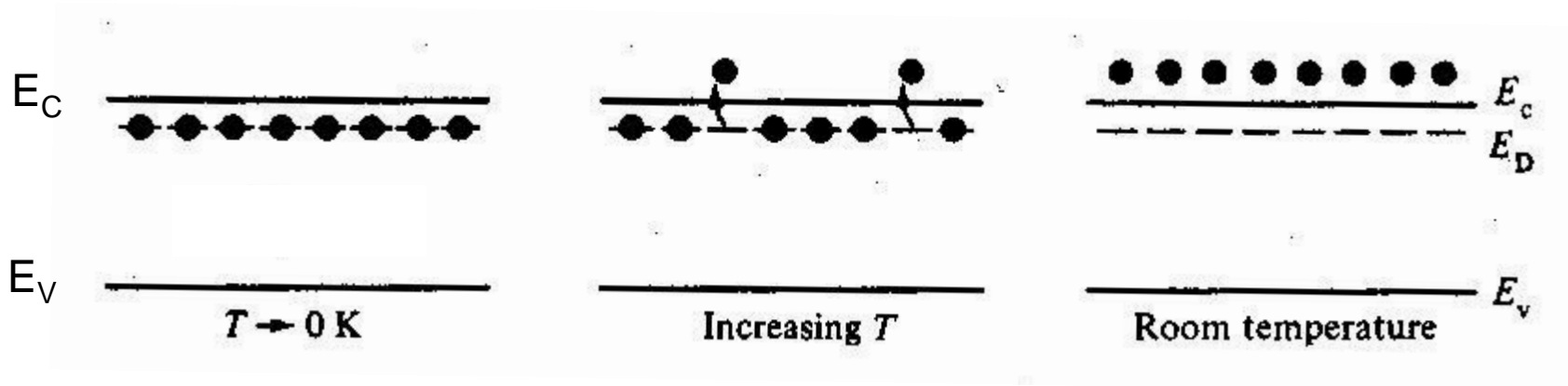
→ Aceptores: 3 electrones de valencia (B, In) → semiconductor de tipo P



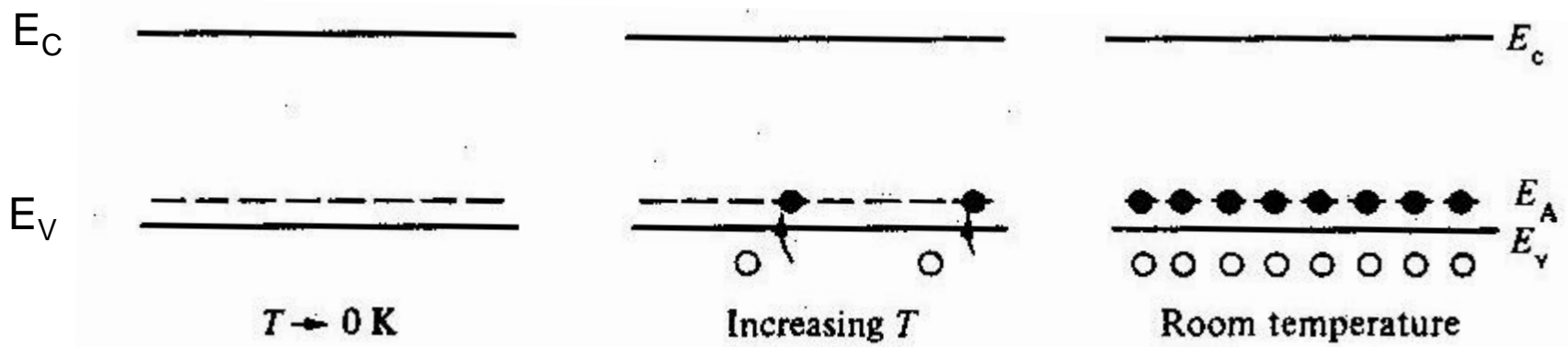
El dopado NO ALTERA la neutralidad eléctrica del material

# Efecto Dopado

Semiconductor N



Semiconductor P



# Portadores de Carga

- Existen dos portadores de carga en semiconductores:
  - Electrones
  - Huecos

En un material extrínseco, se distingue entre portadores mayoritarios y minoritarios con base en la concentración de portadores

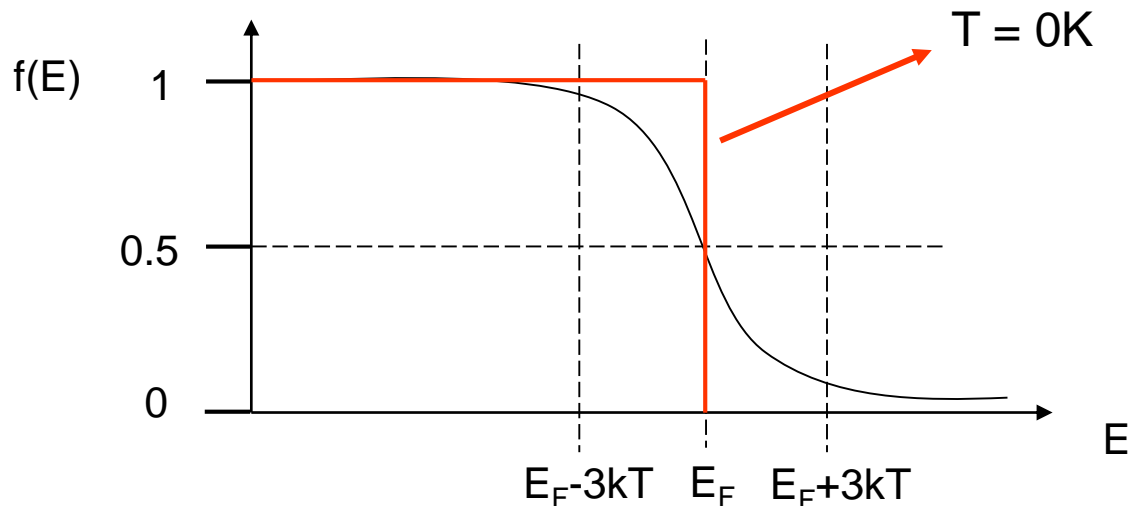
- Portadores mayoritarios: portadores presentes en mayor número en el semiconductor:
  - huecos en semiconductor P
  - electrones en semiconductor N
- Portadores minoritarios: portadores presentes en menor número en el semiconductor:
  - electrones en semiconductor P
  - huecos en semiconductor N

# Nivel de Fermi

- $E_F$  : valor de energía en el que la probabilidad de ocupación del estado electrónico es 1/2
- Distribución de Fermi-Dirac: probabilidad de ocupación de un estado electrónico de energía  $E$

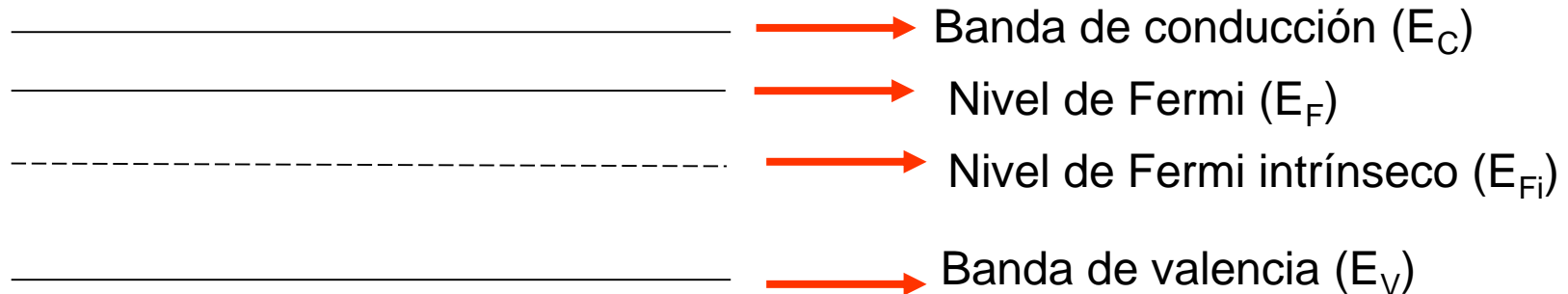
$$f(E) = \frac{1}{1 + e^{\frac{E - E_F}{kT}}}$$

$k$ : constante de Boltzmann,  $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$   
 $T$ : temperatura (K)

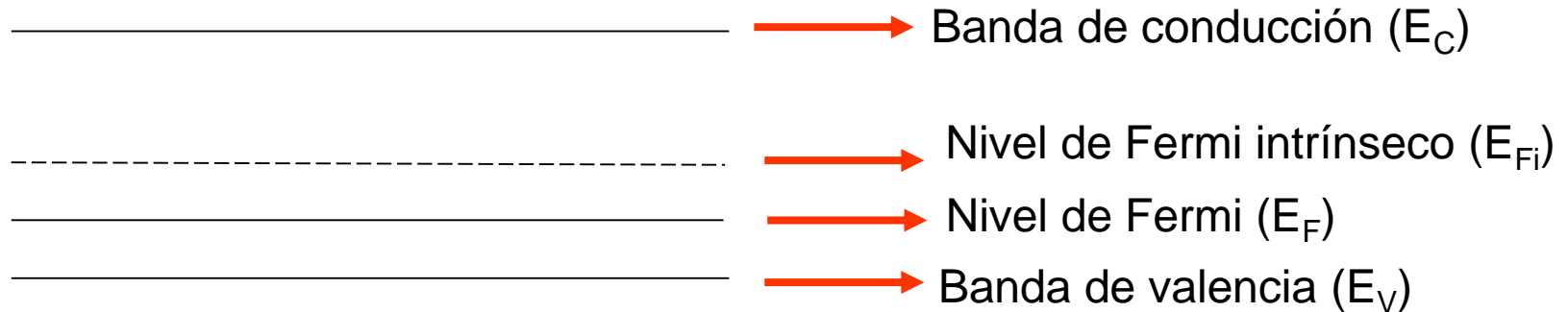


# Influencia del Dopado en Nivel de Fermi

- Semiconductor N: nivel de Fermi está cerca de banda de conducción



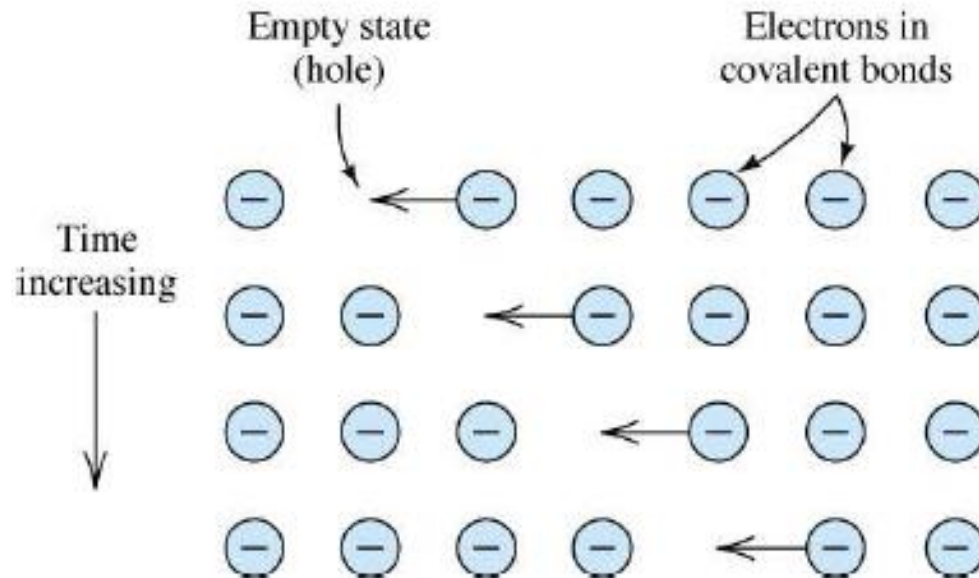
- Semiconductor P: nivel de Fermi está cerca de banda de valencia





# Corriente de Huecos

El movimiento de portadores de carga libres (electrones y huecos) causa un flujo de corriente en el semiconductor



Conforme los electrones se mueven a la izquierda para llenar un hueco, el hueco se mueve a la derecha  $\Rightarrow$  equivale a una corriente de huecos

La corriente de huecos tiene la misma dirección que la corriente técnica

# Concentración de Portadores de Carga

- Ley de acción de masas: en un semiconductor no degenerado en equilibrio,

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

$n_i$  : concentración intrínseca de portadores de carga [ $\text{cm}^{-3}$ ]  
 $n$ : concentración de electrones libres [ $\text{cm}^{-3}$ ]  
 $p$ : concentración de huecos [ $\text{cm}^{-3}$ ]

- La concentración de portadores de carga y el nivel de Fermi están relacionados como sigue:

$$n = n_i \cdot e^{\frac{(E_F - E_i)}{kT}}$$

$$p = n_i \cdot e^{\frac{(E_i - E_F)}{kT}}$$

$$n_i \approx 1.45 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3} \text{ para Si}$$

# Concentración de Portadores de Carga

- Material tipo P:  $n_{po} \approx \frac{n_i^2}{N_A}$ ,  $p_{po} \approx N_A$

$n_{po}$ : concentración de electrones en material p en equilibrio

$p_{po}$ : concentración de huecos en material p en equilibrio

$N_A$ : concentración de aceptores

$$E_i - E_F = kT \ln \frac{N_A}{n_i}$$

Diferencia entre nivel de Fermi intrínseco y extrínseco del semiconductor P

- Material tipo N:  $p_{no} \approx \frac{n_i^2}{N_D}$ ,  $n_{no} \approx N_D$

$p_{no}$ : concentración de huecos en material n en equilibrio

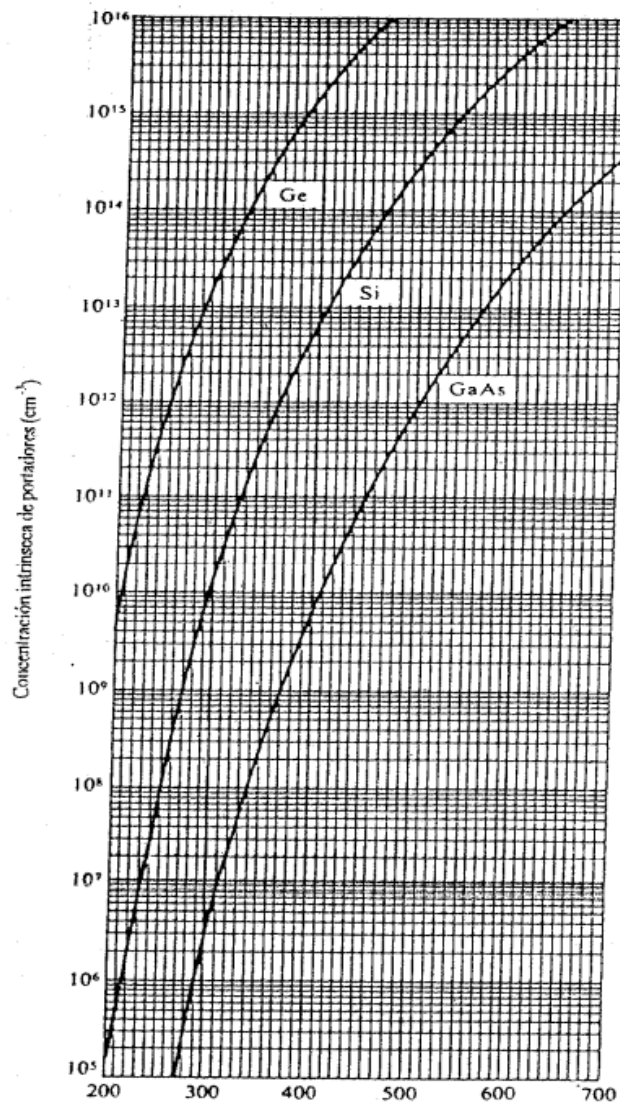
$n_{no}$ : concentración de electrones en material n en equilibrio

$N_D$ : concentración de donadores

$$E_F - E_i = kT \ln \frac{N_D}{n_i}$$

Diferencia entre nivel de Fermi intrínseco y extrínseco del semiconductor N

# $n_i$ vs Temperatura



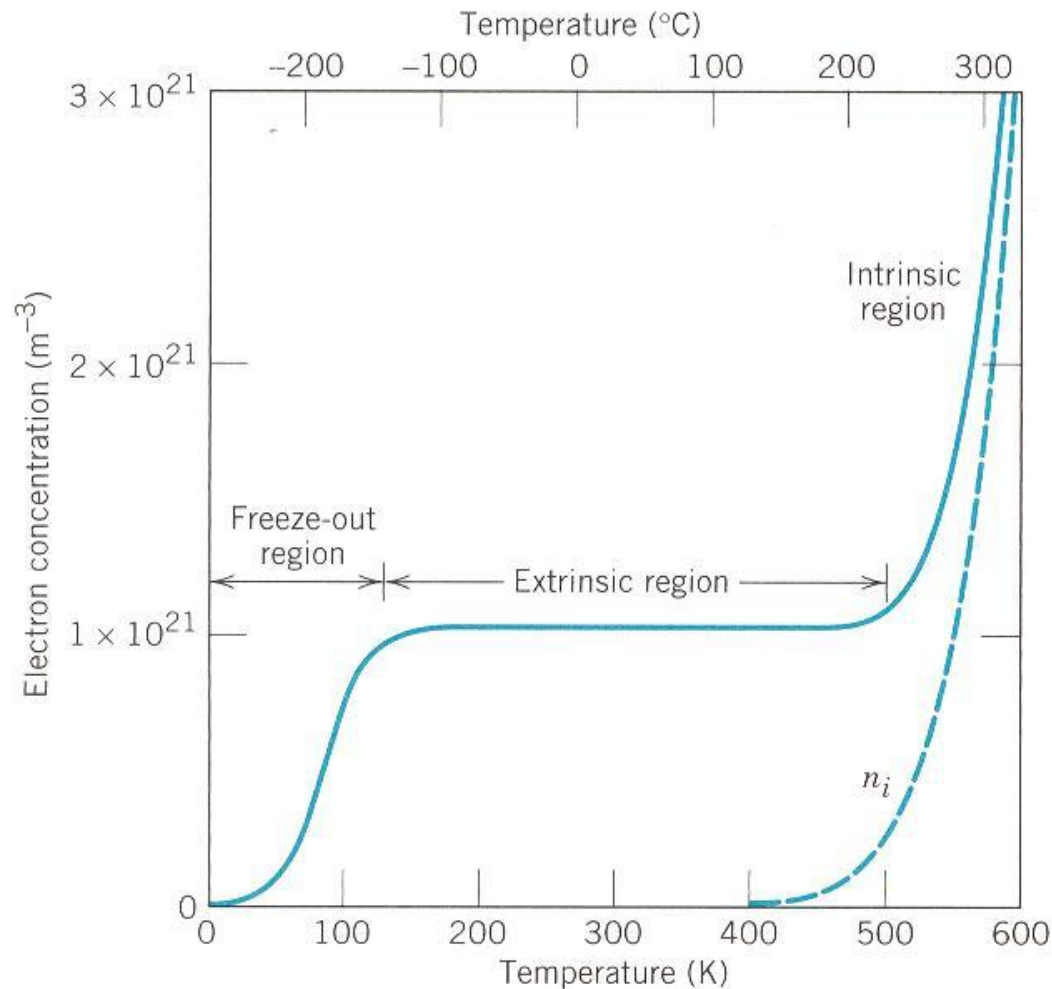
Si	
$T$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$n_i$ ( $\text{cm}^{-3}$ )
0	$1.04 \times 10^9$
5	$1.70 \times 10^9$
10	$2.71 \times 10^9$
15	$4.28 \times 10^9$
20	$6.64 \times 10^9$
25	$1.02 \times 10^{10}$
30	$1.54 \times 10^{10}$
35	$2.29 \times 10^{10}$
40	$3.37 \times 10^{10}$
45	$4.90 \times 10^{10}$
50	$7.06 \times 10^{10}$
300 K	$1.18 \times 10^{10}$

GaAs	
$T$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$n_i$ ( $\text{cm}^{-3}$ )
0	$1.02 \times 10^5$
5	$1.89 \times 10^5$
10	$3.45 \times 10^5$
15	$6.15 \times 10^5$
20	$1.08 \times 10^6$
25	$1.85 \times 10^6$
30	$3.13 \times 10^6$
35	$5.20 \times 10^6$
40	$8.51 \times 10^6$
45	$1.37 \times 10^7$
50	$2.18 \times 10^7$
300 K	$2.25 \times 10^6$

# Efecto de Temperatura en Semiconductores Extrínsecos

- Temperatura afecta el comportamiento de semiconductores
- Bajas temperaturas: energía térmica insuficiente para ionizar todos los átomos de impurezas
  - Concentración de portadores mayoritarios es menor que concentración de dopado
- Temperaturas medias: energía térmica es suficiente para ionizar todos los átomos de impurezas
- Altas temperaturas: El nivel de Fermi se acerca al nivel de Fermi intrínseco
  - Material se comporta como semiconductor intrínseco
  - $n_i$  en un semiconductor intrínseco aumenta con  $T$ 
    - Conductividad aumenta con  $T$

# Efecto de Temperatura en Semiconductores Extrínsecos



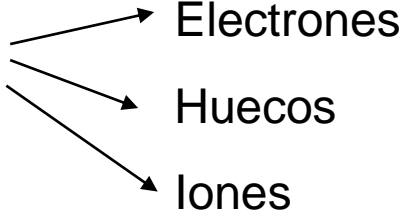
## Energías de ionización en Silicio

Fósforo	0.045eV
Arsénico	0.05eV
Boron	0.045eV
Aluminio	0.06eV

- Semiconductor extrínseco se comporta como intrínseco a altas temperaturas
  - $E_F \rightarrow E_{Fi}$ ,  $n_i$  aumenta con  $T$ ,  $\sigma$  aumenta con  $T$

# Transporte de Portadores de Carga

La corriente eléctrica consiste en el movimiento de cargas



```
graph LR; A[La corriente eléctrica consiste en el movimiento de cargas] --> B[Electrones]; A --> C[Huecos]; A --> D[Iones];
```

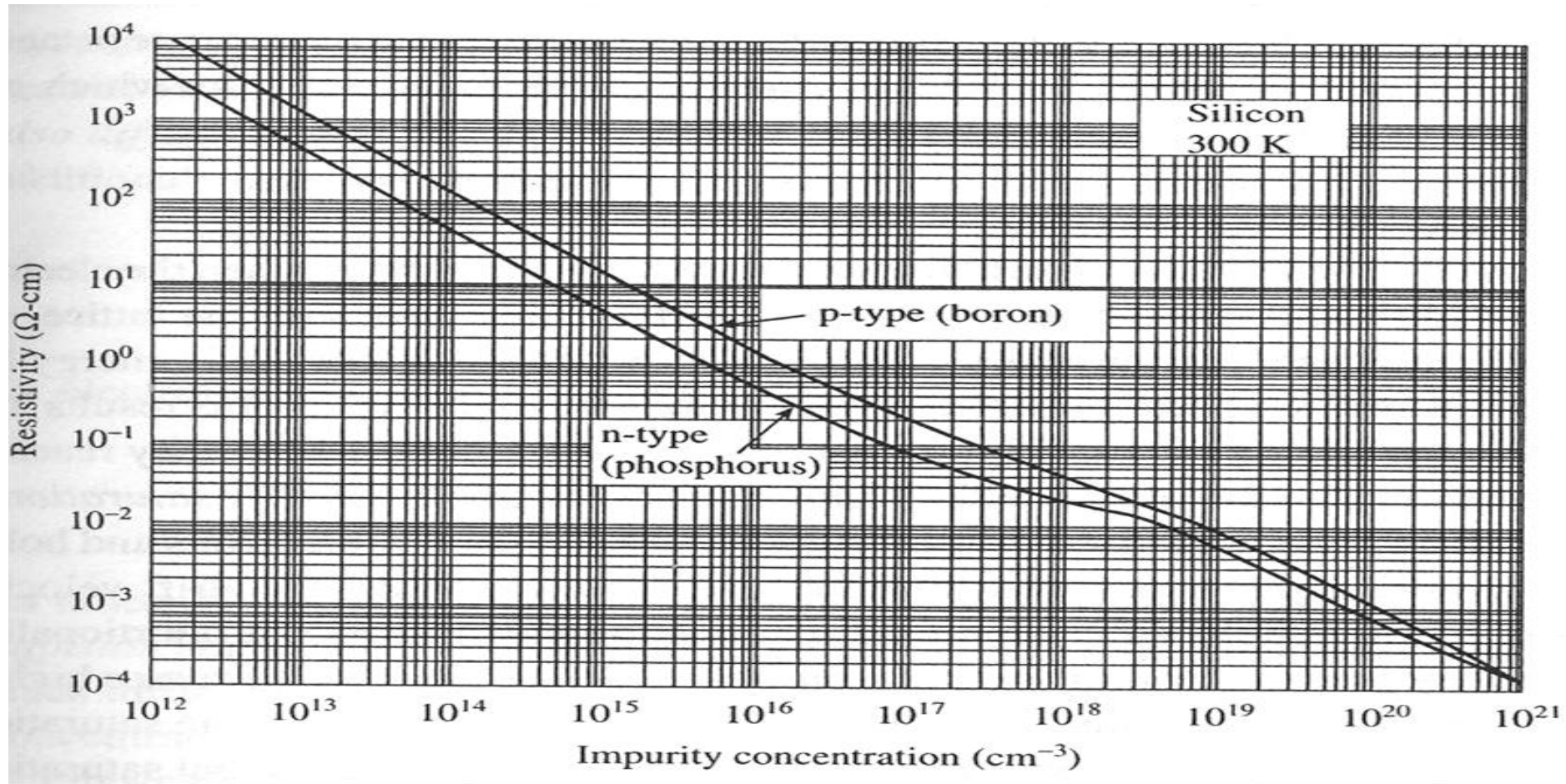
- Los átomos de dopado pueden ionizarse como parte del proceso de conducción eléctrica:
  - Los átomos donadores se ionizan positivamente al ceder un electrón para la conducción eléctrica ( $N_D^+$ )
  - Los átomos aceptores se ionizan negativamente al recibir un electrón durante la conducción eléctrica ( $N_A^-$ )
  - En semiconductores, los dopantes ionizados son inmóviles y no contribuyen a la conducción

## Existen 2 mecanismos de transporte de portadores de carga

1. Corriente de difusión, debido a gradientes de concentración de portadores de carga
2. Corriente de arrastre, debido a la aplicación de un campo eléctrico



# Resistividad vs Dopado





# Movilidad

- En ausencia de un campo eléctrico, el electrón presenta un movimiento térmico aleatorio con una velocidad térmica promedio  $v_t$
- Al aplicar un campo eléctrico, el electrón adquiere una velocidad de arrastre determinada por

$$\vec{v}_d = \mu \cdot \vec{E} \quad \text{para } |E| < 5 \times 10^3 \text{ V/cm}$$

$v_d$ : velocidad de arrastre (cm/s)

$\mu$ : movilidad (cm<sup>2</sup>/Vs)

$E$ : campo eléctrico (V/cm)

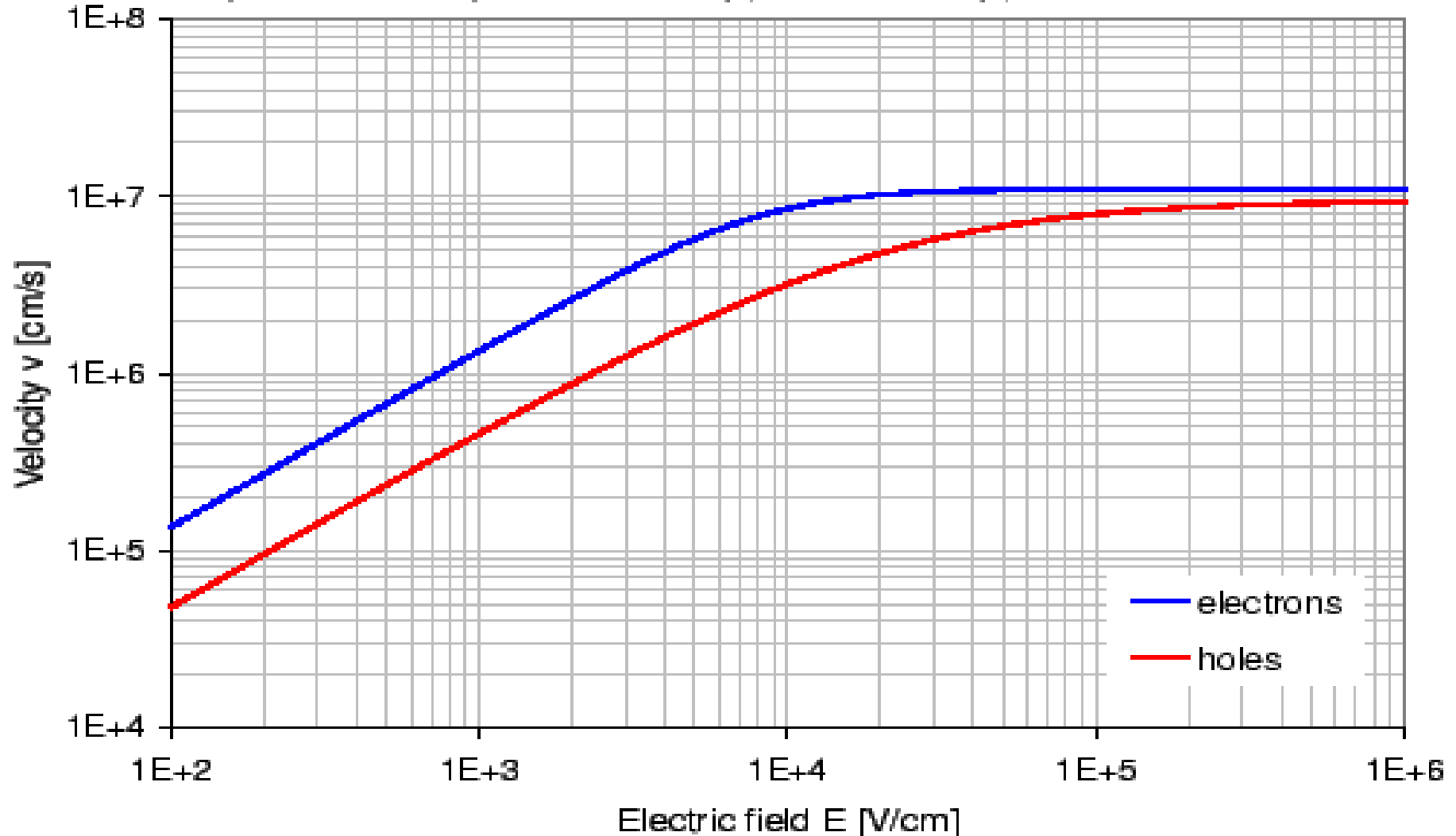
Para  $|E| > 10^5 \text{ V/cm}$  la velocidad de arrastre se satura  $\approx 10^7 \text{ cm/s}$

- Los electrones tienen una movilidad mayor que los huecos en un factor de 2..3 → ante un campo eléctrico, los electrones son 2..3 veces más rápidos que los huecos
- La movilidad está determinada por: masa efectiva, dispersión por impurezas, dispersión por la estructura cristalina

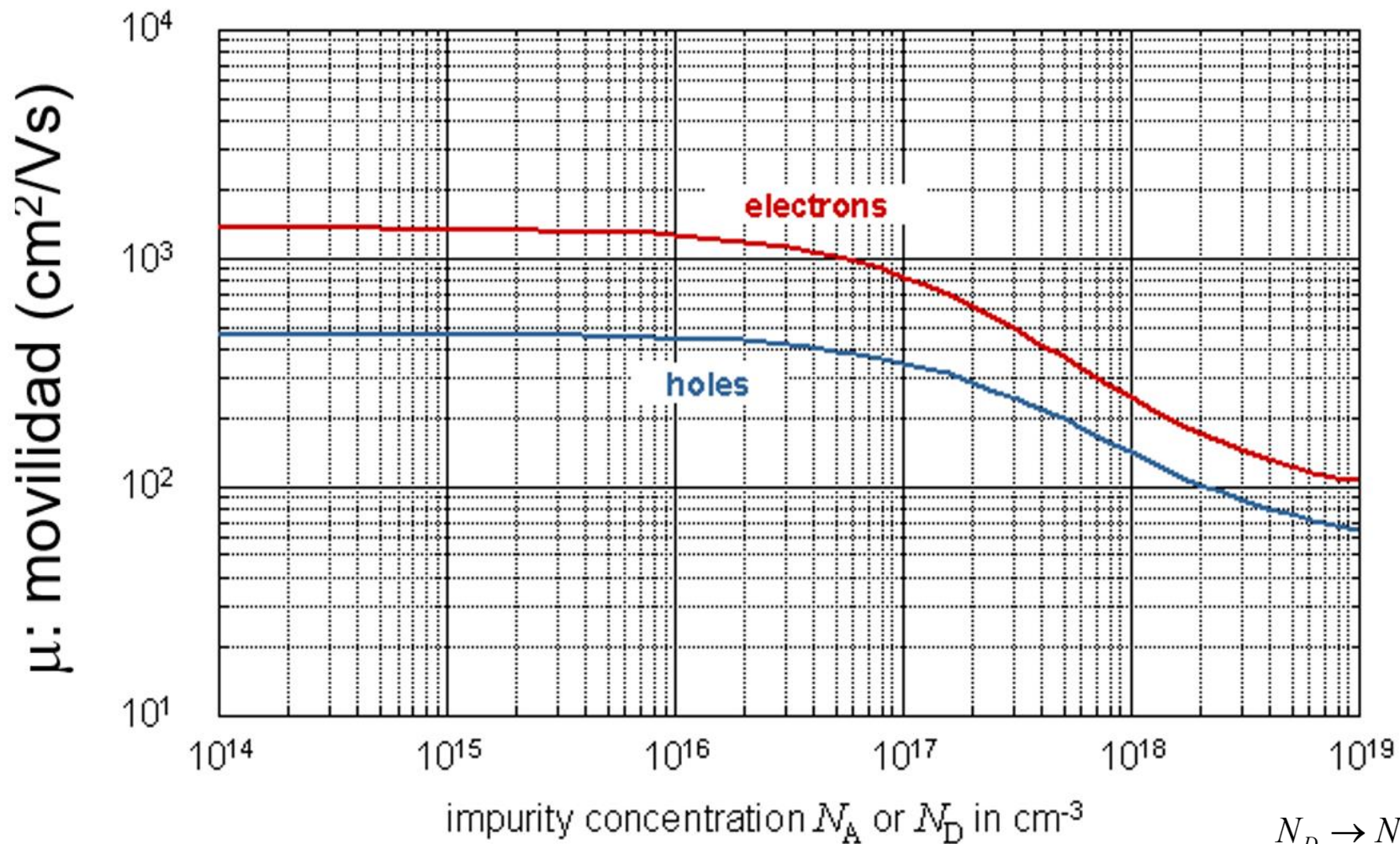
# Velocidad de arrastre vs Campo Eléctrico

## Carrier velocities vs. electric field

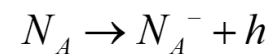
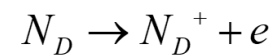
$\mu_e = 1350 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ,  $\mu_h = 480 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ,  $v_{e,sat} = 1.1 \text{ E}7 \text{ cm/s}$ ,  $v_{h,sat} = 9.5 \text{ E}6 \text{ cm/s}$



# Movilidad vs Dopado



El caso ilustrado corresponde al silicio



# Movilidad vs Temperatura

