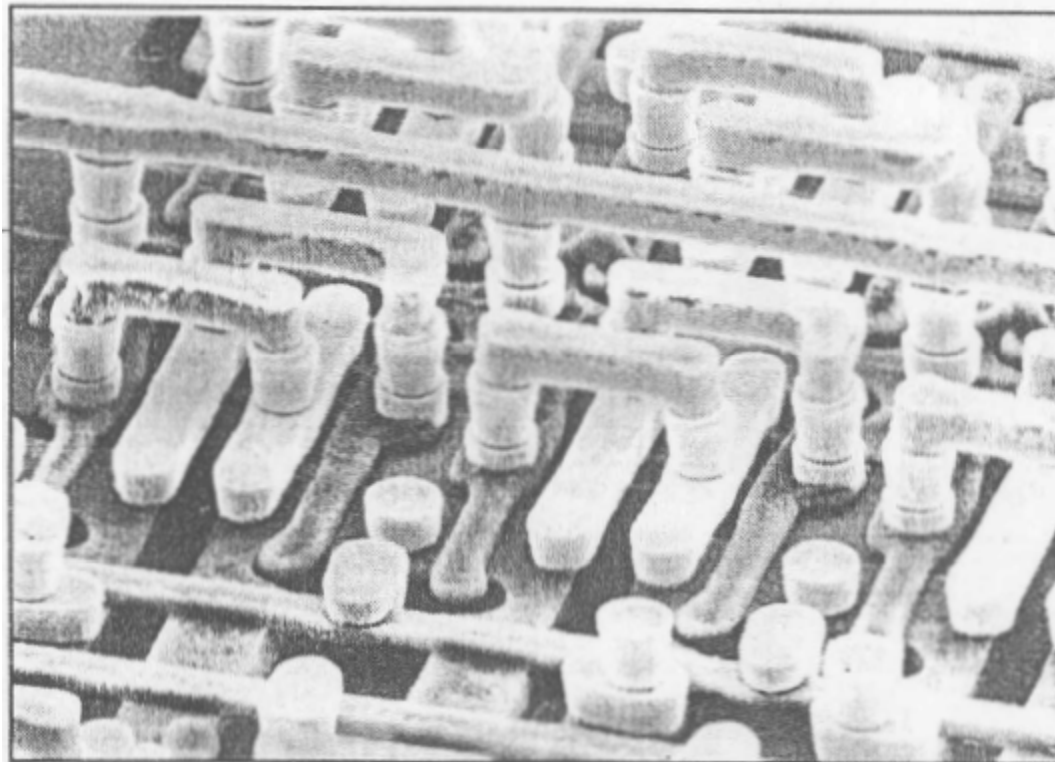


# Física de los Semiconductores



# Estructura atómica

- De acuerdo al modelo mecanocuántico del átomo, existen niveles energéticos discretos en los cuales pueden residir los electrones.
- Cada uno de estos niveles está representado por un conjunto de números cuánticos:
  - $n$  = nivel principal
  - $l$  = subnivel azimutal (0, 1, 2, 3)

Valor	Subnivel	Significado
0	s	sharp
1	p	principal
2	d	diffuse
3	f	fundamental

- $m$  = momento magnético
  - $s$  = spin (sentido de giro)
- **Principio de Exclusión de Pauli:** 2 electrones no pueden tener el mismo número cuántico ( $n, l, m, s$ ).

# Estructura atómica del Si

- El silicio tiene número atómico 14; es decir que posee 14 electrones.
- Distribución de electrones:

- Orbital 1s  $\rightarrow$  2
- Orbital 2s  $\rightarrow$  2
- Orbital 2p  $\rightarrow$  6
- Orbital 3s  $\rightarrow$  2
- Orbital 3p  $\rightarrow$  2

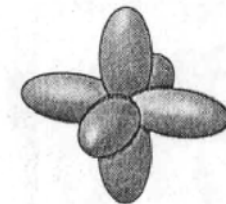
(1s)<sup>2</sup> (filled)



(2s)<sup>2</sup> (filled)



(2p)<sup>6</sup> (filled)



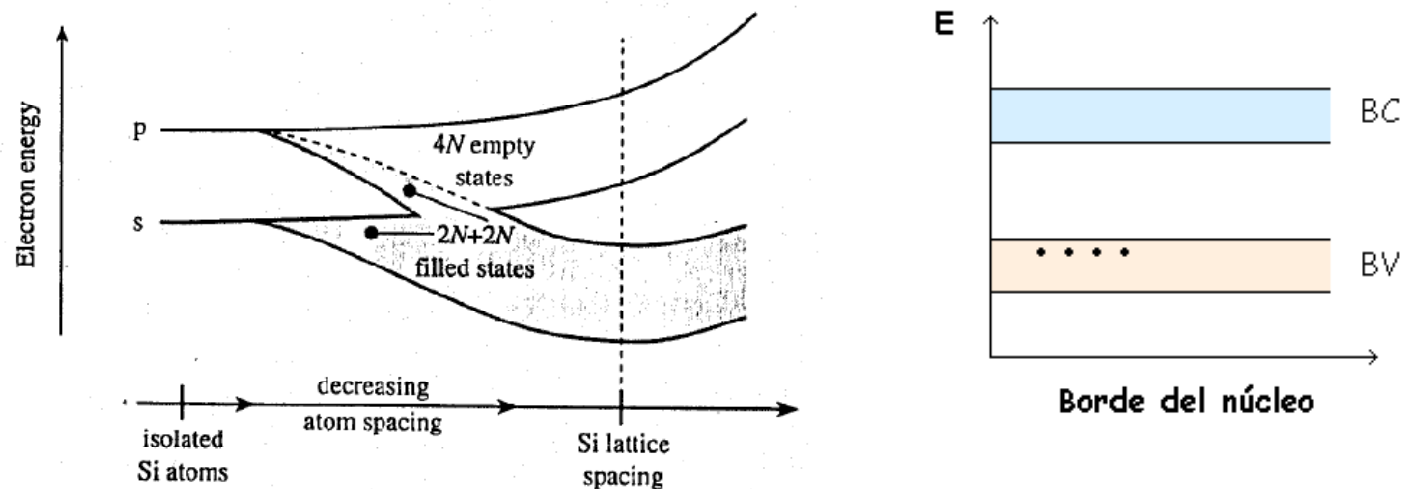
- Electrones de valencia (nivel de energía 3)  $\rightarrow$  4
- Los electrones de valencia son los que con la menor energía posible pueden abandonar el núcleo al que pertenecen, y por ende forman enlaces covalentes o iónicos con los átomos que estén alrededor.

# Estructura atómica del Si

- De acuerdo a las posibles combinaciones de números cuánticos, la cantidad máxima de estados por subnivel es:
  - $s=1 \rightarrow 2$  electrones
  - $p=2 \rightarrow 6$  electrones
  - $d=3 \rightarrow 10$  electrones
- Observando la estructura del átomo de Si, se nota que el último subnivel está incompleto. Esto origina la posibilidad de enlaces covalentes con átomos vecinos.
- Existe la posibilidad que un electrón cambie su nivel energético. Para esto debe “ganar” o “perder” energía, lo cual puede producirse por agitación térmica o impacto de un fotón (dualidad onda-corpúsculo).

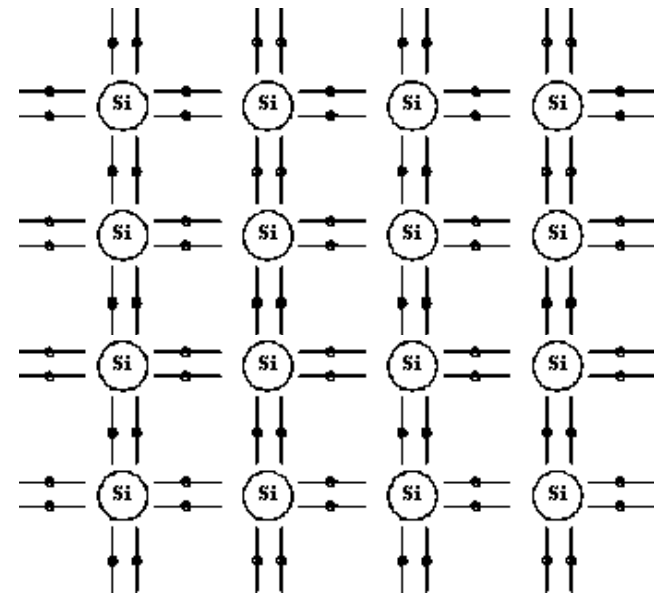
# Bandas de Energía

- El átomo aislado posee niveles de energía discretos donde pueden residir los electrones.
- Al formar estructuras cristalinas, hay interacción entre los campos eléctricos de los átomos vecinos, y debido al principio de Exclusión de Pauli, los niveles de energía cambian ligeramente dentro del cristal, formando entonces bandas de energía :



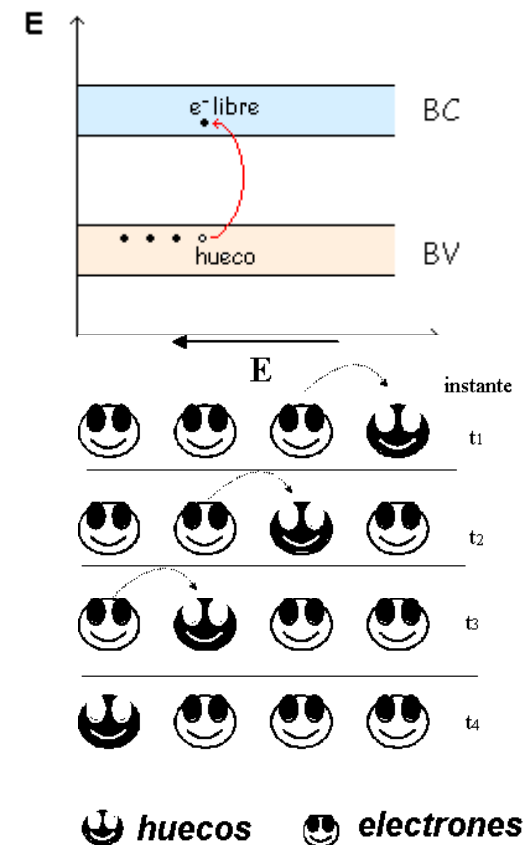
# Modelo de Enlace

- Modelo de enlace del silicio:
  - Representación en 2D
  - Cada par de líneas indica el enlace entre 2 átomos.
  - Modelo simplificado (no cuántico)
  - Ion de Silicio con carga  $+4q$
  - A  $0^\circ\text{K}$  se comporta como aislante pues no hay electrones libres. Todos los enlaces están completos.



# Electrones y Huecos

- A mayor temperatura se producen vibraciones en la red cristalina que pueden dar como resultado que algunos electrones de valencia rompan el enlace (generación térmica) y pasen a la banda de conducción, transformándose en “portadores”.
- Esto hace que existan electrones libres que se desplazan dentro del cristal
- Los electrones dejan puestos vacantes que serán cubiertos por otros electrones en movimiento, lo cual se puede pensar como una vacante móvil llamada “hueco”.



# Generación y Recombinación

- Los electrones pueden moverse de la banda de valencia a la de conducción fundamentalmente por agitación térmica e impacto con fotones.
- Tasa de generación total:

$$G = G_{th}(T) + G_{op} \quad [1/\text{cm}^3 \cdot \text{seg}]$$

- Recombinación es el proceso de balance natural por el cual los enlaces incompletos por los electrones que abandonan los átomos son reconstituidos.

$$R = k \cdot (n \cdot p) \quad [1/\text{cm}^3 \cdot \text{seg}]$$

- En condiciones ambientales constantes (temperatura, radiación óptica, campos eléctricos) se cumple:

$$G = R$$

- La recombinación puede ser térmica (calentamiento cristal) u óptica (emisión de fotones en GaAs).



# Silicio intrínseco

- Densidad atómica del Si:  $5 \times 10^{22} / \text{cm}^3$
- Concentración electrones de valencia:  $2 \times 10^{23} / \text{cm}^3$
- En el silicio intrínseco en condición de equilibrio térmico  $n = p$

$$n_0 * p_0 = n_0^2 = p_0^2 = n_i^2(T)$$

$$n_i(T) = \text{concentración intrínseca} = 10^{10} [1/\text{cm}^3] \text{ a } 27^\circ\text{C}$$

$$n_i(T) \text{ se duplica cada } 10^\circ\text{C}$$

$$n_i^2(T) = 10^{20} [1/\text{cm}^3]$$

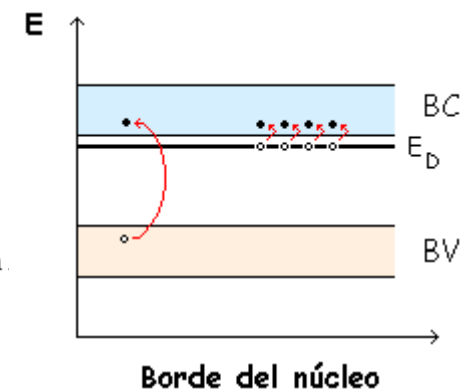
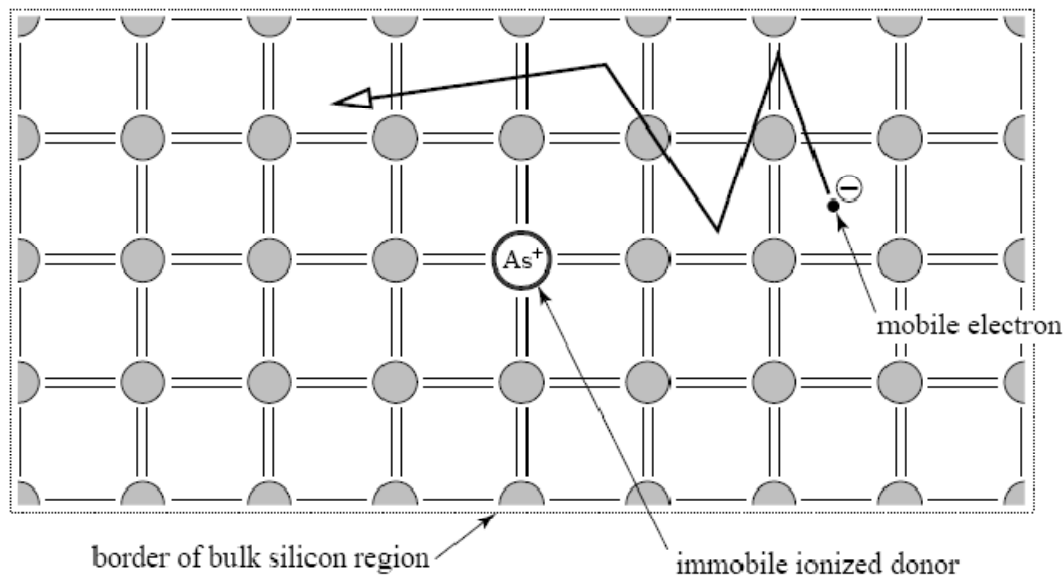
- Relación portadores a  $27^\circ\text{C}$  respecto a densidad atómica =  $2 \times 10^{-13} \rightarrow$  Sin uso práctico

# Dopado

- Dopado
  - Se agregan impurezas ya sea del grupo III o grupo V
  - Se incrementa la cantidad de huecos o electrones disponibles
  - Donantes (V): Fósforo (P), Arsénico (As), Antimonio (Sb)
  - Aceptores (III): Boro (B), Aluminio (Al), Galio (Ga), Indio (In)
  - Dopado bajo: 1 en 5000.000.000 ( $10^{13}$  [1/cm<sup>3</sup>])
  - Dopado alto: 1 en 5.000 ( $10^{19}$  [1/cm<sup>3</sup>])

# Dopado (donantes)

- Al utilizar elementos del grupo V, 4 de los 5 electrones de valencia forman enlaces con los átomos vecinos de silicio. El 5º electrón queda débilmente ligado al átomo donante y puede moverse fácilmente, dejando un ión positivo  $+q$



## Dopado (donantes)

- El semiconductor dopado sigue manteniendo su neutralidad eléctrica:

$$q^*(p_0 - n_0 + N_D^+) = 0$$

$$n_i^2/n_0 - n_0 + N_D = 0$$

$$n_0 = \frac{N_D}{2} + \frac{N_D}{2} \sqrt{1 + \frac{4n_i^2}{N_D^2}}$$

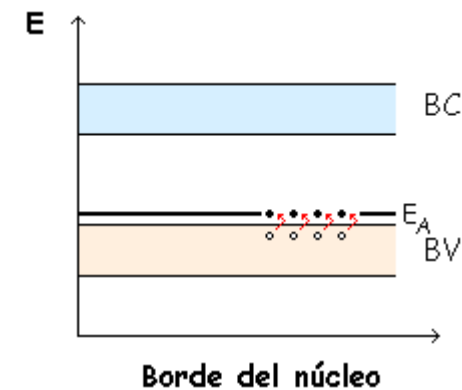
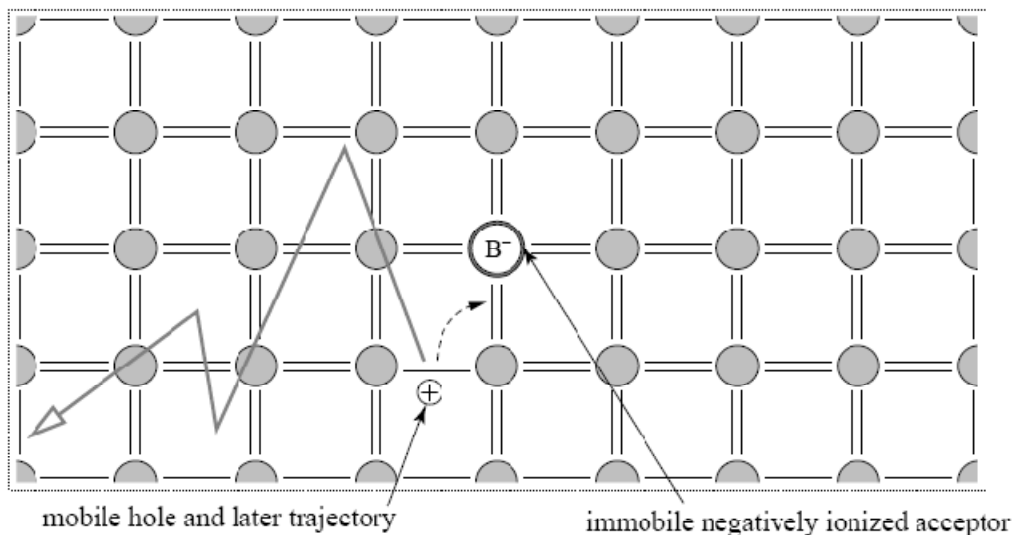
- Como  $N_D \gg n_i \rightarrow n_0 \approx N_D$
- La generación térmica de electrones se puede despreciar.
- La concentración de electrones es igual a la cantidad de átomos donantes.
- La concentración de huecos es:

$$p_0 = 10^{20}/N_D \text{ [1/cm}^3\text{]}$$

- Material tipo N. Los electrones son los portadores mayoritarios y los huecos los minoritarios.

# Dopado (aceptores)

- Al utilizar elementos del grupo III, los 3 electrones de valencia forman enlaces con los átomos vecinos de silicio. Sin embargo queda una vacante que puede ser llenada fácilmente por un electrón. El hueco puede así moverse, dejando un ión negativo  $-q$ .



## Dopado (aceptores)

- El semiconductor dopado sigue manteniendo su neutralidad eléctrica:

$$q^*(p_0 - n_0 - N_A^-) = 0$$

$$n_i^2/n_0 - n_0 - N_A = 0$$

$$p_0 = \frac{N_A}{2} + \frac{N_A}{2} \sqrt{1 + \frac{4n_i^2}{N_A^2}}$$

- Como  $N_A \gg n_i \rightarrow p_0 \approx N_A$
- La generación térmica de electrones se puede despreciar.
- La concentración de huecos es igual a la cantidad de átomos donantes.
- La concentración de electrones es:

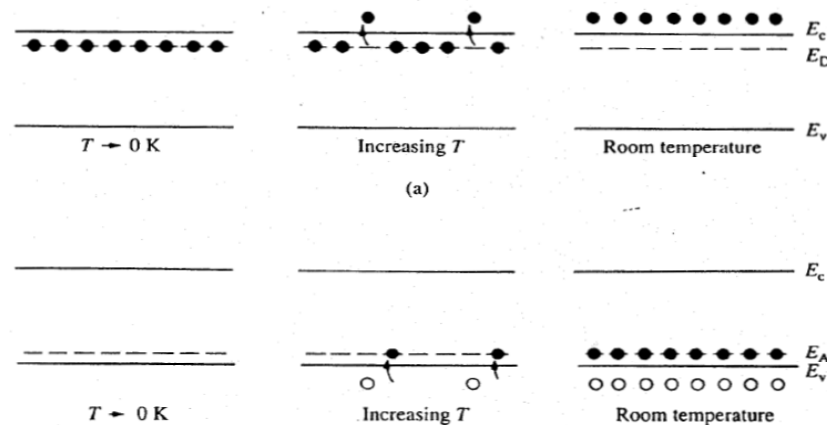
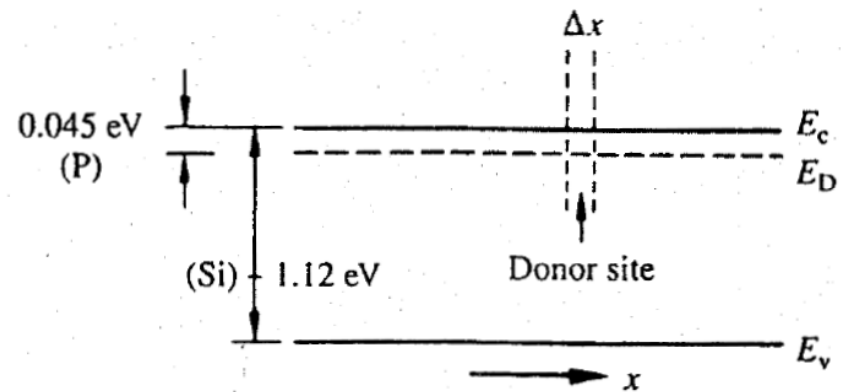
$$n_0 = 10^{20}/N_A \text{ [1/cm}^3\text{]}$$

- Material tipo P. Los huecos son los portadores mayoritarios y los electrones los minoritarios.

# Dopado

**Table 2.3** Dopant-Site Binding Energies.

<i>Donors</i>	$ E_B $	<i>Acceptors</i>	$ E_B $
Sb	0.039 eV	B	0.045 eV
P	0.045 eV	Al	0.067 eV
As	0.054 eV	Ga	0.072 eV
		In	0.16 eV

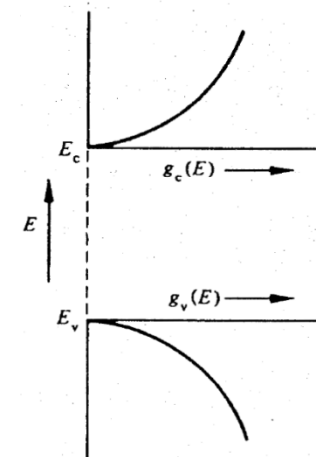


# Densidad de estados

- Existen bandas de energía permitidas (valencia – conducción). Las bandas contienen tantos estados de energía como  $4 \cdot N$  átomos contenga el cristal; pero en realidad existe una distribución de niveles que vienen dadas por:

$$g_c(E) = \frac{m_n^* \sqrt{2m_n^* (E - E_c)}}{\pi^2 \hbar^3}, \quad E \geq E_c$$

$$g_v(E) = \frac{m_p^* \sqrt{2m_p^* (E_v - E)}}{\pi^2 \hbar^3}, \quad E \leq E_v$$



$$h = 6.62 \times 10^{-34} \text{ [J seg]}$$

$g_c$  y  $g_v$  son las densidades de estados para cierto nivel de energía  $E$ .

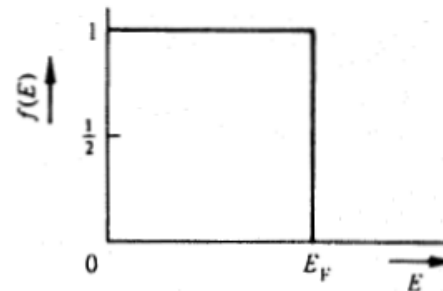
$m_n^*$  y  $m_p^*$  son las masas efectivas de electrones y huecos (equivalente clásico de un fenómeno cuántico).



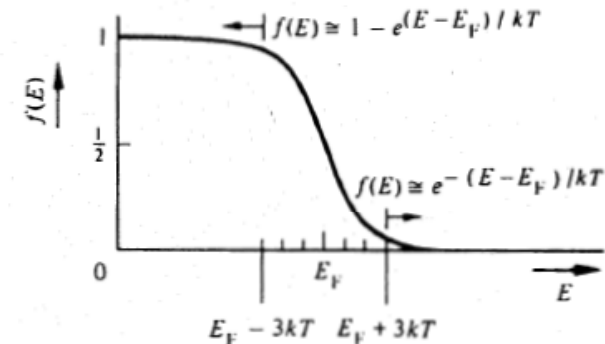
# Distribución de Fermi

- La ocupación de los diferentes estados energéticos obedece una ley probabilística:

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



(a)  $T \rightarrow 0$  K

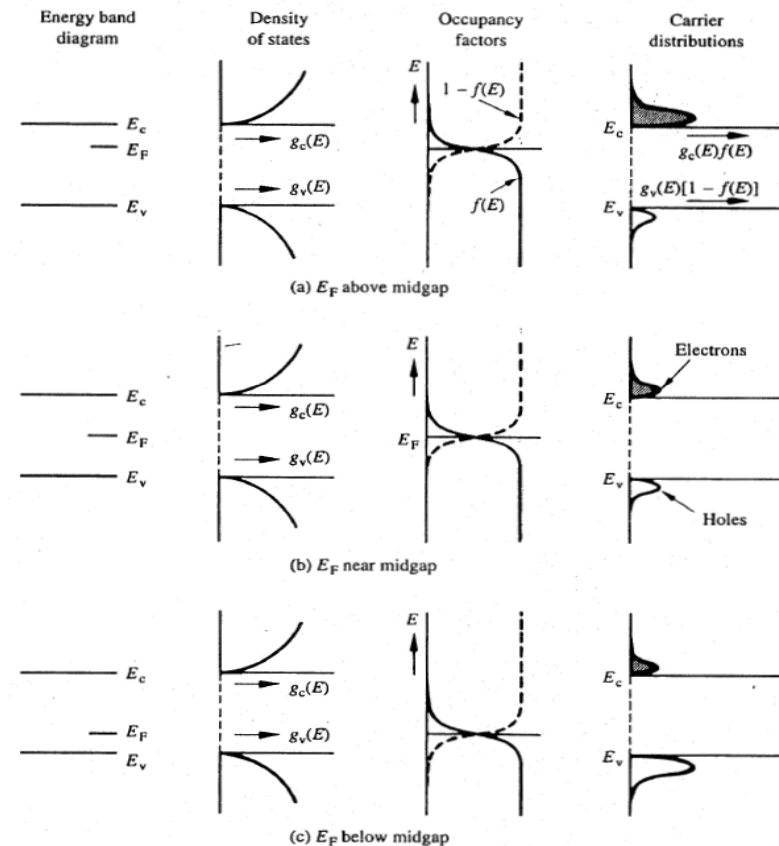


(b)  $T > 0$  K

- $k =$  cte Boltzmann =  $8.62 \times 10^{-5}$  [eV/K]
- $E_F =$  Nivel de Fermi

# Factor de ocupación

- La distribución de portadores o factor de ocupación será:  
 $n \rightarrow g_c(E) * f(E)$   
 $p \rightarrow g_v(E) * (1 - f(E))$
- Dependiendo del dopaje del semiconductor, el nivel de energía de Fermi se ubica cerca de la banda de conducción o cerca de la banda de valencia



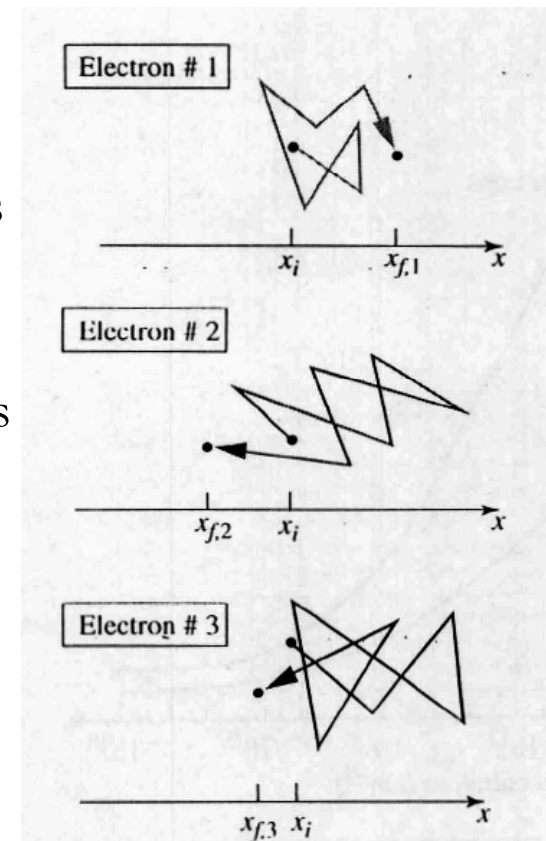
# Velocidad de desplazamiento

- A temperatura ambiente, los electrones y huecos en el silicio se mueven aleatoriamente, a una velocidad llamada “velocidad térmica”.  $V_{te} \approx 10^7$  [cm/seg] (1/3000 de c).
- En su movimiento los electrones y huecos chocan entre sí, o con la superficie del material, o son capturados por átomos ionizados.
- Tiempo de colisión promedio:  $\tau_c = 0.1$  pseg.
- Trayectoria libre promedio:  $\lambda = \tau_c \times V_{te} = 10$  nm

# Velocidad de desplazamiento

- En equilibrio térmico, los huecos y electrones no tienen movimiento neto dentro de la red cristalina; es decir que la “posición” de los mismos no cambia en el tiempo.
- Esto es válido siempre que no haya campos eléctricos aplicados:  $E = 0$
- Se cumple que:

$$\overline{\Delta x} = \frac{(x_{f1} - x_i) + (x_{f2} - x_i) + (x_{f3} - x_i)}{3} \approx 0$$

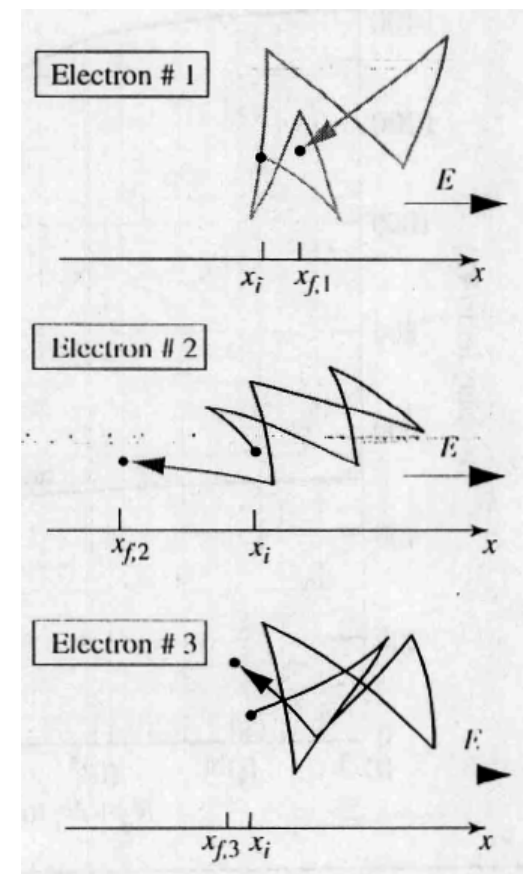


# Velocidad de desplazamiento

- La situación es diferente si hay un campo eléctrico aplicado.
- Notación:  $E > 0$  en sentido de crecimiento del eje  $x$ .
- El movimiento neto ahora no será nulo debido a la presencia de  $E$

$$\overline{\Delta x} = \frac{(x_{f1} - x_i) + (x_{f2} - x_i) + (x_{f3} - x_i)}{3} < 0$$

- Los electrones serán atraídos hacia el potencial (+) del campo eléctrico



# Velocidad de desplazamiento

- Velocidad de desplazamiento de electrones:

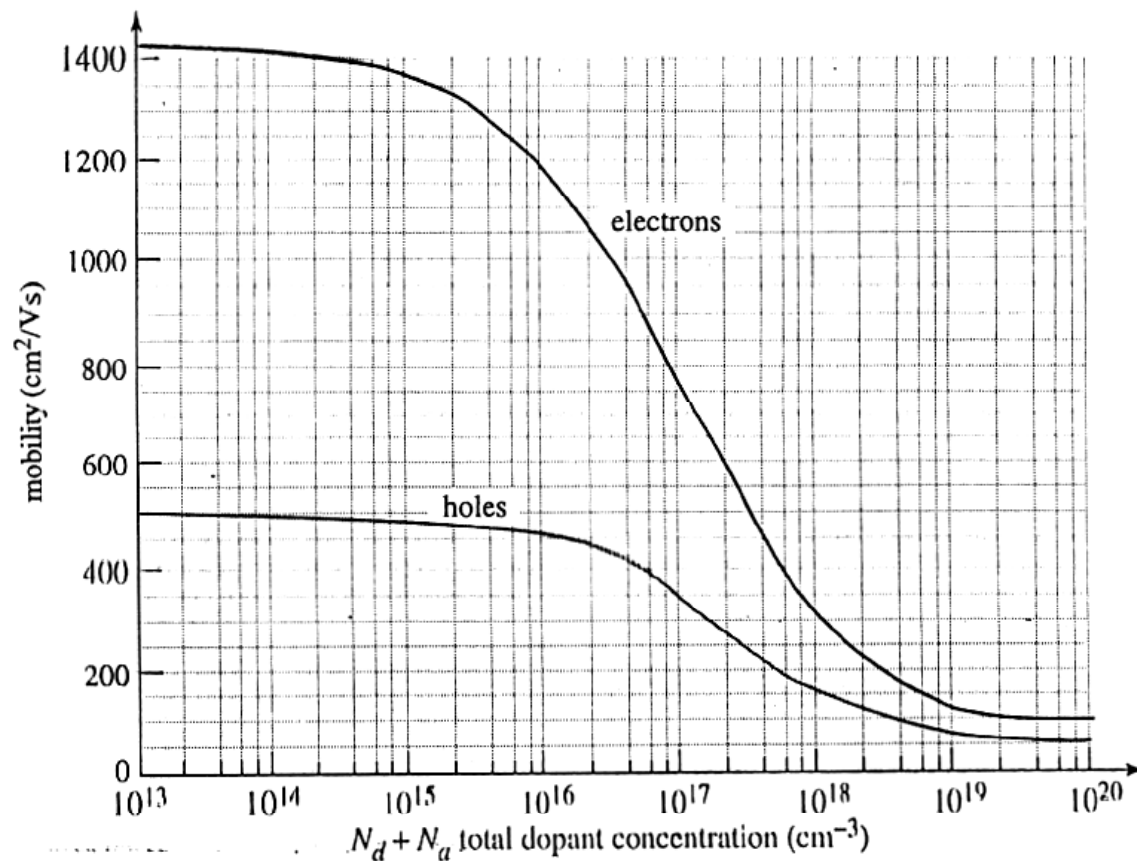
$$v_{dn} = \frac{\Delta_x}{\Delta_t} \quad < 0 \text{ si } E > 0$$

$$v_{dn} = -\mu_n * E$$

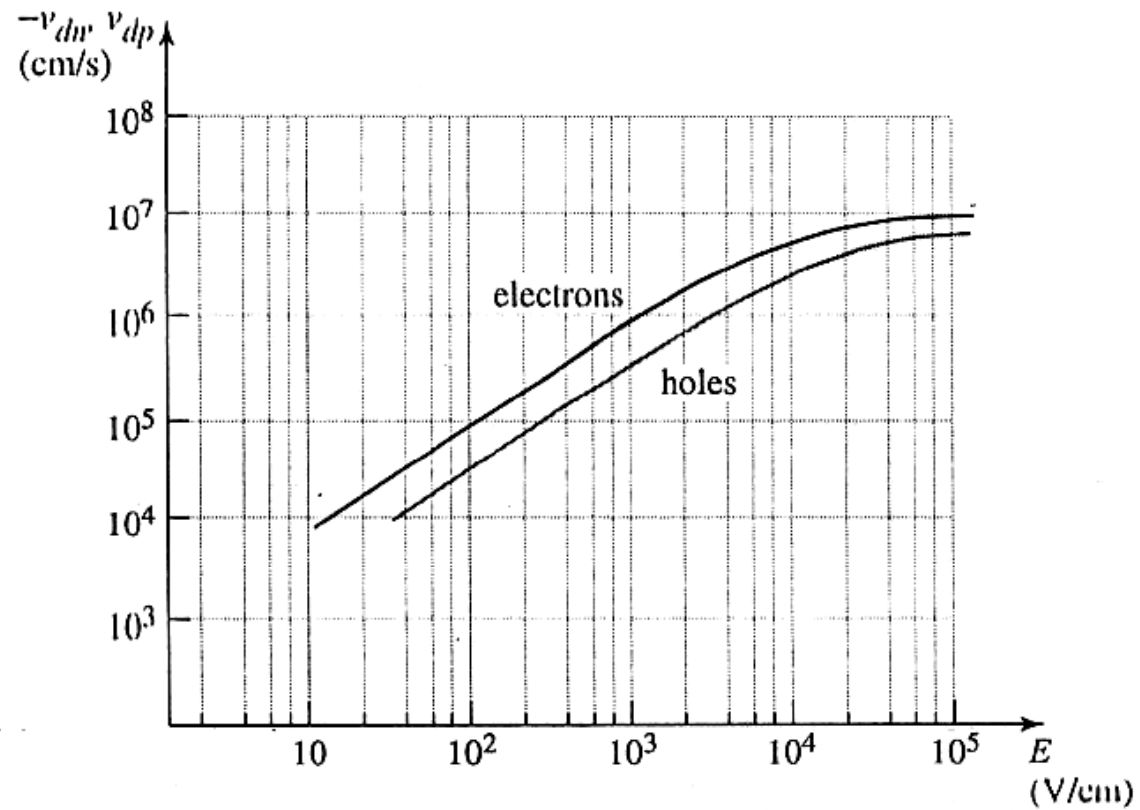
- $\mu_n$  = movilidad del electrón [ $\text{cm}^2/\text{V seg}$ ]
- La movilidad depende de la temperatura y del dopado que tenga el semiconductor.
- La movilidad disminuye con el aumento de la temperatura debido a la agitación térmica que provoca mayores colisiones, disminuyendo  $\tau_c$

$$v_{dp} = \mu_p * E$$

# Movilidad a $T_{amb}$



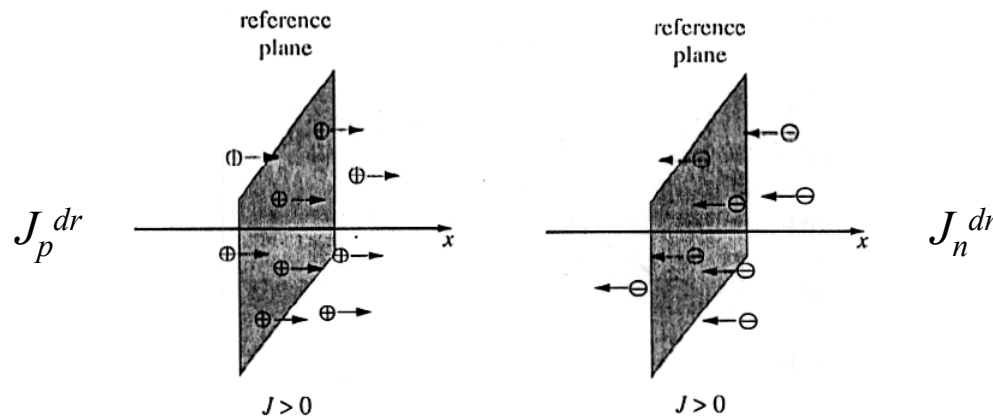
# Velocidad vs E





# Corriente de desplazamiento

- Los portadores se desplazan a lo largo del semiconductor, al aplicar un campo eléctrico externo.
- Los huecos se mueven en dirección al campo y los electrones en sentido inverso.
- Este movimiento o transporte de cargas genera una corriente de desplazamiento a través del semiconductor.
- Se cuantifica con un parámetro llamado **Densidad de Corriente  $J$** .



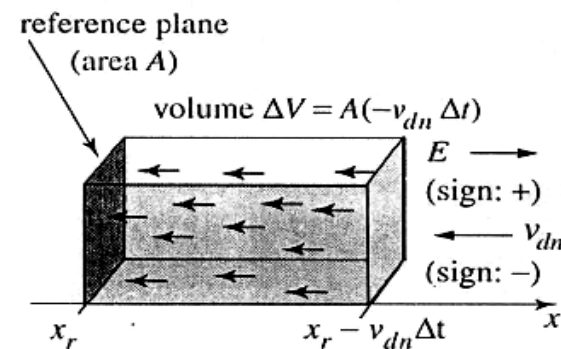
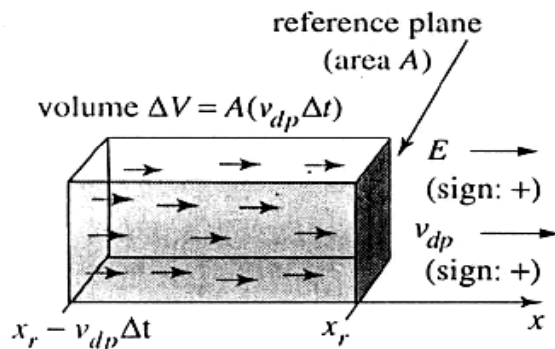
# Densidad de corriente desplazamiento

- Cálculo de  $J$  para huecos:  $J_p^{dr} = \frac{\Delta Q_p}{A\Delta t} = \frac{qp\Delta V}{A\Delta t} = \frac{qpAv_{dp}\Delta t}{A\Delta t} = qp v_{dp}$

$$J_p^{dr} = qp\mu_p E \text{ for } (v_{dp} \ll v_{sat})$$

- Cálculo de  $J$  para electrones:

$$J_n^{dr} = qn\mu_n E, \text{ for } |v_{dn}| \ll v_{sat}$$



## Ejemplo

- Dibujar  $J$  en función del campo eléctrico para un trozo de silicio de tipo N, dopado con  $N_D = 10^{17} [1/\text{cm}^3]$ . Considerar  $T_{\text{amb}} = 27^\circ\text{C}$ .

Para campos eléctricos chicos, es válido:

$$J_n^{dr} = qn\mu_n E \quad (|v_{dn}| \ll v_{sat})$$

$$n = N_d$$

La saturación ocurre para  $E \approx 10^4 [\text{V}/\text{cm}]$

$$\mu_n \approx 800 [\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{seg}]$$

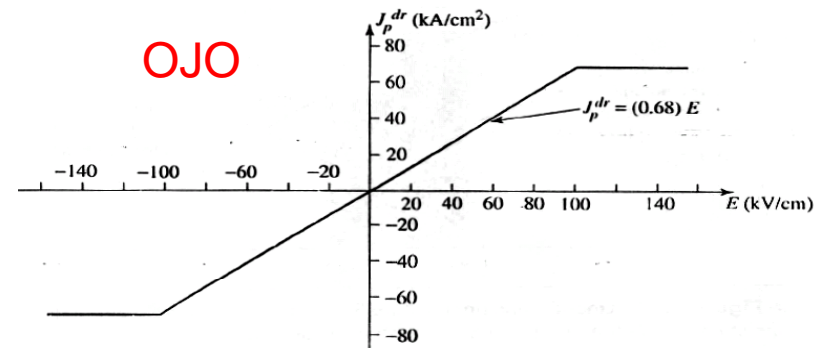
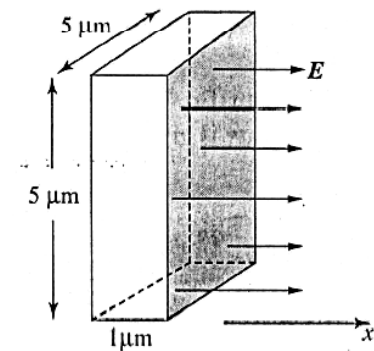
$$J = 12,8 E [\text{A}/\text{cm}^2]$$

$$J_{\text{max}} \approx 128 [\text{kA}/\text{cm}^2]$$

$$I_{\text{max}} = 32 [\text{mA}]$$

$$V_{\text{max}} = 10^4 [\text{V}/\text{cm}] * 1 [\mu\text{m}] = 1 [\text{V}]$$

$$I_{\text{max}} (\text{huecos}) = 480 [\text{pA}]$$



# Resistencias integradas

- Trozo de silicio dopado N o P con contactos metálicos y potencial eléctrico aplicado.
- Campo eléctrico (en la dirección de  $x$ ) dentro del silicio:

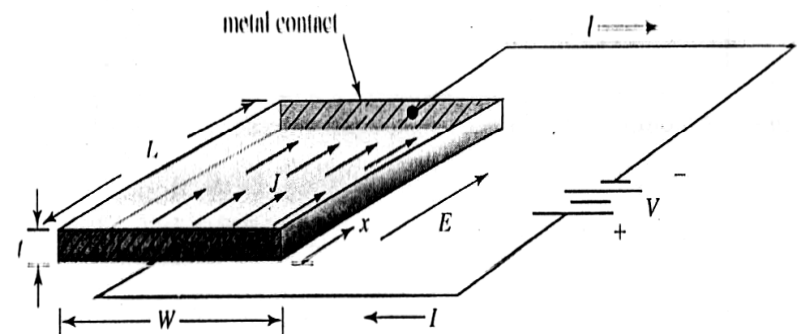
$$E = V/L \text{ [V/cm]}$$

- Densidad de corriente de desplazamiento originada por este campo eléctrico:

$$J = J_n^{dr} + J_p^{dr} = qn\mu_n E + qp\mu_p E = (qn\mu_n + qp\mu_p) \left( \frac{V}{L} \right)$$

- La corriente circulante vendrá dada por el producto de  $J$  y el área transversal:

$$I = J \cdot A = (qn\mu_n + qp\mu_p) \left( \frac{V}{L} \right) (Wt) = \left[ (qn\mu_n + qp\mu_p) \left( \frac{Wt}{L} \right) \right] \cdot V$$



# Resistencias integradas

- Por ende la resistencia del material semiconductor es:

$$R = \frac{1}{(qn\mu_n + qp\mu_p) \left(\frac{Wt}{L}\right)} = \left(\frac{1}{(qn\mu_n + qp\mu_p)}\right) \left(\frac{L}{Wt}\right)$$

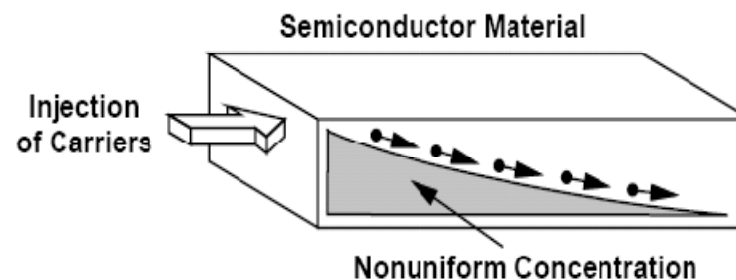
- Al primer término se lo conoce como “resistividad” ( $\rho$ ) [ $\Omega\text{cm}$ ]

$$\rho = \frac{1}{(qn\mu_n + qp\mu_p)} \quad R = \rho \left(\frac{L}{Wt}\right)$$

- Para dopajes N entre  $10^{13}$  y  $10^{19}$  [ $1/\text{cm}^3$ ] se logran resistividades entre 500 [ $\Omega\text{cm}$ ] y 5 [ $\text{m}\Omega\text{cm}$ ] (cobre = 1,7 [ $\mu\Omega\text{cm}$ ])

# Difusión

- Es el proceso natural en el cual la existencia de un gradiente provoca una acción tendiente a anularlo.
- Aún en ausencia de un campo eléctrico, los portadores se mueven hacia regiones de menor concentración.
- Este movimiento establece una circulación de corriente adicional al proceso de desplazamiento.
- Esta corriente existirá hasta tanto no se logre la uniformidad.



## Densidad de corriente de difusión

- Cuanto mayor sea la no uniformidad en la concentración de portadores, mayor será la corriente resultante:

$$I \propto \frac{dn}{dx}$$

- Si cada portador tiene una carga  $q$  y el semiconductor tiene una sección transversal  $A$ , tendremos:

$$I \propto Aq \frac{dn}{dx} \qquad I = AqD_n \frac{dn}{dx}$$

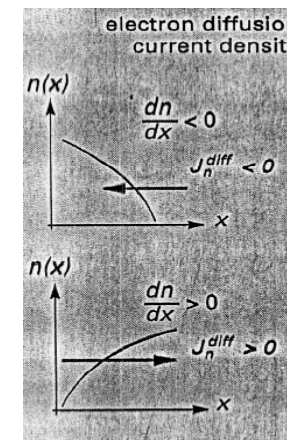
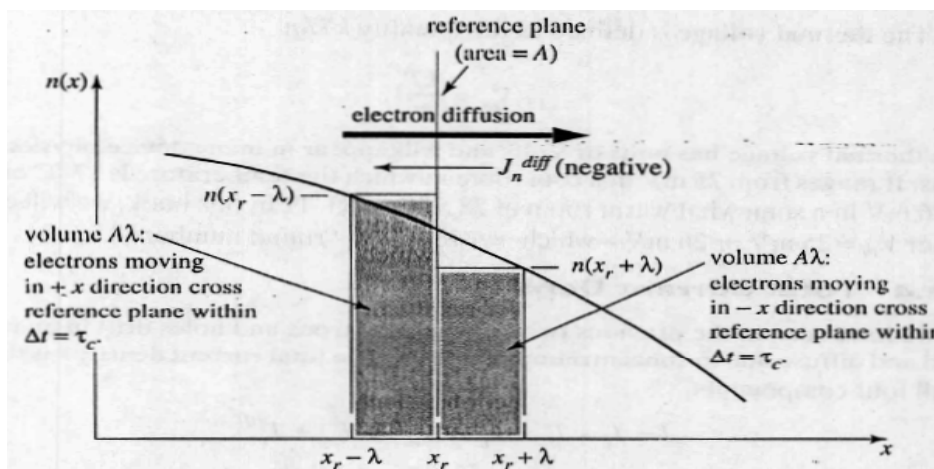
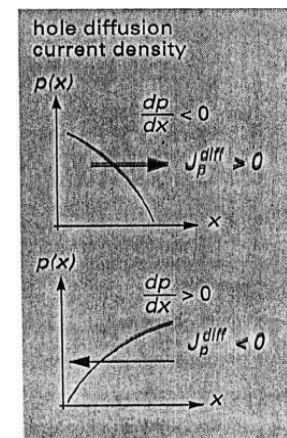
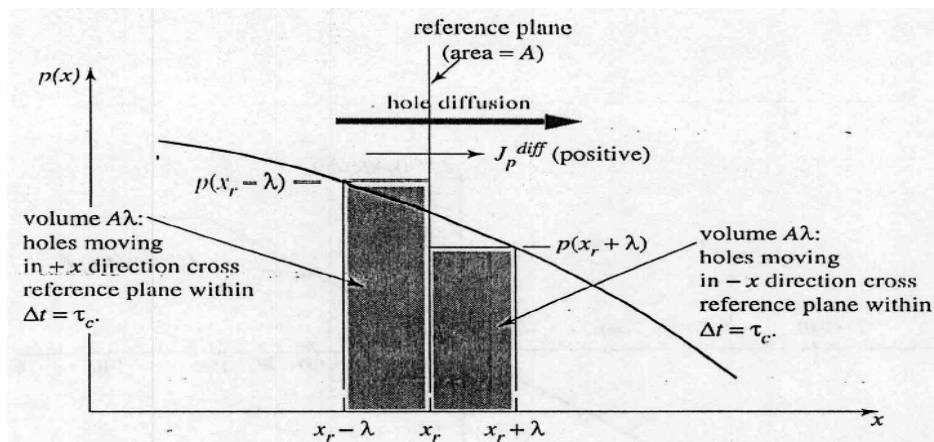
$D_n$  = cte de Difusión [ $\text{cm}^2/\text{Seg}$ ] para electrones.  $D_p$  para huecos.

$D_n = 34$  [ $\text{cm}^2/\text{Seg}$ ] y  $D_p = 12$  [ $\text{cm}^2/\text{Seg}$ ] para silicio intrínseco.

- Normalizando respecto al área transversal:

$$J_n = qD_n \frac{dn}{dx} \qquad J_p = -qD_p \frac{dp}{dx}$$

# Convención de signos





## Relación de Einstein

- Los coeficientes de difusión dependen del dopaje del semiconductor y temperatura, pues son función del tiempo de colisión ( $\tau_c$ ) y de la trayectoria libre promedio ( $\lambda$ ).
- Existe una relación que los une con los coeficientes de movilidad, llamada Relación de Einstein:

$$\frac{D}{\mu} = \frac{kT}{q}$$

$$\boxed{\frac{D_p}{\mu_p} = \frac{kT}{q} \quad \text{and} \quad \frac{D_n}{\mu_n} = \frac{kT}{q}}$$

$k = \text{Cte Boltzmann} = 1.38 \times 10^{-23} \text{ [J/K]}$

- El coeficiente de difusión puede obtenerse a través de la movilidad.
- La relación  $kT/q$  se la conoce por definición como “Tensión térmica equivalente” ( $V_{th}$ ) y su valor es de 26mV a temperatura ambiente.

## Densidad de corriente total

- Los huecos y electrones se desplazan debido a la presencia de un campo eléctrico y se difunden por gradientes en la concentración.
- La densidad de corriente total en un semiconductor será la suma de las 4 componentes:

$$J = J_n + J_p = J_n^{dr} + J_n^{diff} + J_p^{dr} + J_p^{diff}$$

$$J = qn\mu_n E + qD_n \frac{dn}{dx} + qp\mu_p E - qD_p \frac{dp}{dx}$$

$$J_n = J_n^{dr} + J_n^{diff} = qn\mu_n E + qD_n \frac{dn}{dx}$$

$$J_p = J_p^{dr} + J_p^{diff} = qp\mu_p E - qD_p \frac{dp}{dx}$$