SEMICONDUCTORES

fuera del EQUILIBRIO

Dr. Andrés Ozols

Facultad de Ingeniería

UBA

2007

FENÓMENOS de TRANSPORTE de CARGA

ARRASTRE de PORTADORES

La densidad de carga moviéndose a una velocidad promedio de deriva o arrastre v_{ar}

$$J_{ar} = \rho v_{ar} \qquad \rho > 0$$

J en unidades de Coul/cm^2 s

La densidad de corriente de huecos es

$$J_{par} = (ep) v_{arp}$$

ARRASTRE de PORTADORES

La velocidad de arrastre es proporcional al campo

$$v_{arp} = \mu_p E$$

μ_p es la movilidad de los huecos

La densidad de corriente de arrastre resulta

$$J_{par} = ep\mu_p E$$

En cambio para los electrones que se desplazan en sentido contrario al campo.

$$v_{arn} = -\mu_n E$$

Con $\mu_n > 0$

$$J_{nar} = (-en)(-\mu_n E) = en\mu_n E$$

ARRASTRE de PORTADORES

Las magnitudes típicas de la movilidad de los electrones y huecos a 300 K

	μ_n (cm^2/Vs)	μ_p (cm^2/Vs)
Silicio	1350	480
Arseniuro de Galio	8500	400
Germanio	3900	1900

La densidad de corriente de arrastre debida a los dos tipos de portadores de carga

$$J_{ar} = J_{par} + J_{nar} = e\left(p\mu_p + n\mu_n\right)E$$

Efectos de la movilidad

La ecuación de movimiento de huecos en un campo eléctrico E es

$$F = m_p^* a = m_p^* \frac{dv}{dt} = eE$$

La velocidad de la partícula, v, en el campo eléctrico E no incluye el efecto la velocidad térmica aleatoria

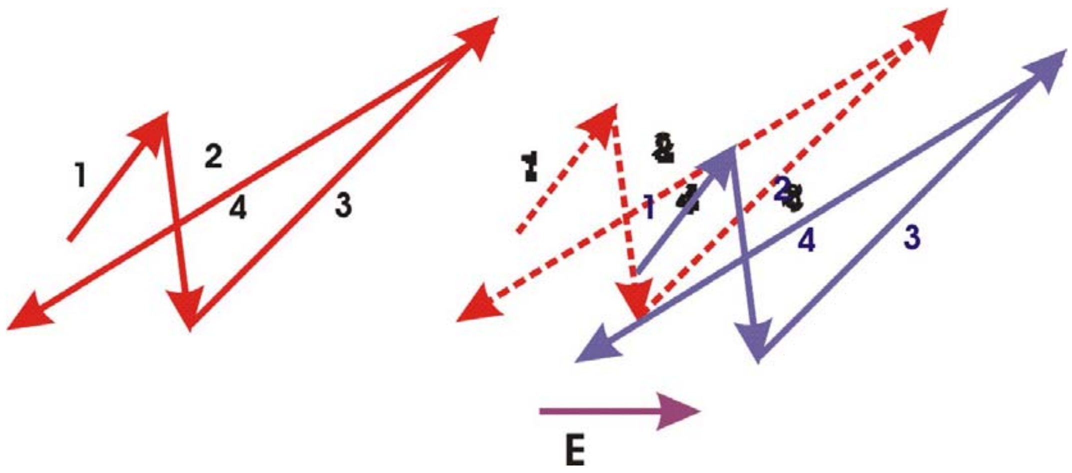
La integración de la ecuación asumiendo una velocidad de arrastre inicial nula

$$v = \frac{eE}{m_p^*} t$$

El movimiento térmico está caracterizado por un tiempo medio entre colisiones τ_{cp}

Efectos de la movilidad

La velocidad de arrastre máxima, previa a la colisión o dispersión



$$v_{armáx} = \frac{eE}{m_p^*}\tau_{Cp}$$

Su valor medio es la mitad del valor máximo

$$v_{ar} \approx \frac{eE}{m_p^*}\tau_p$$

Entonces la movilidad resulta para los huecos

$$\mu_p = \frac{v_{arp}}{E} = \frac{e}{m_p^*}\tau_p$$

Análogamente, para los electrones

$$\mu_n = \frac{v_{arn}}{E} = \frac{e}{m_n^*}\tau_n$$

Efectos de la movilidad

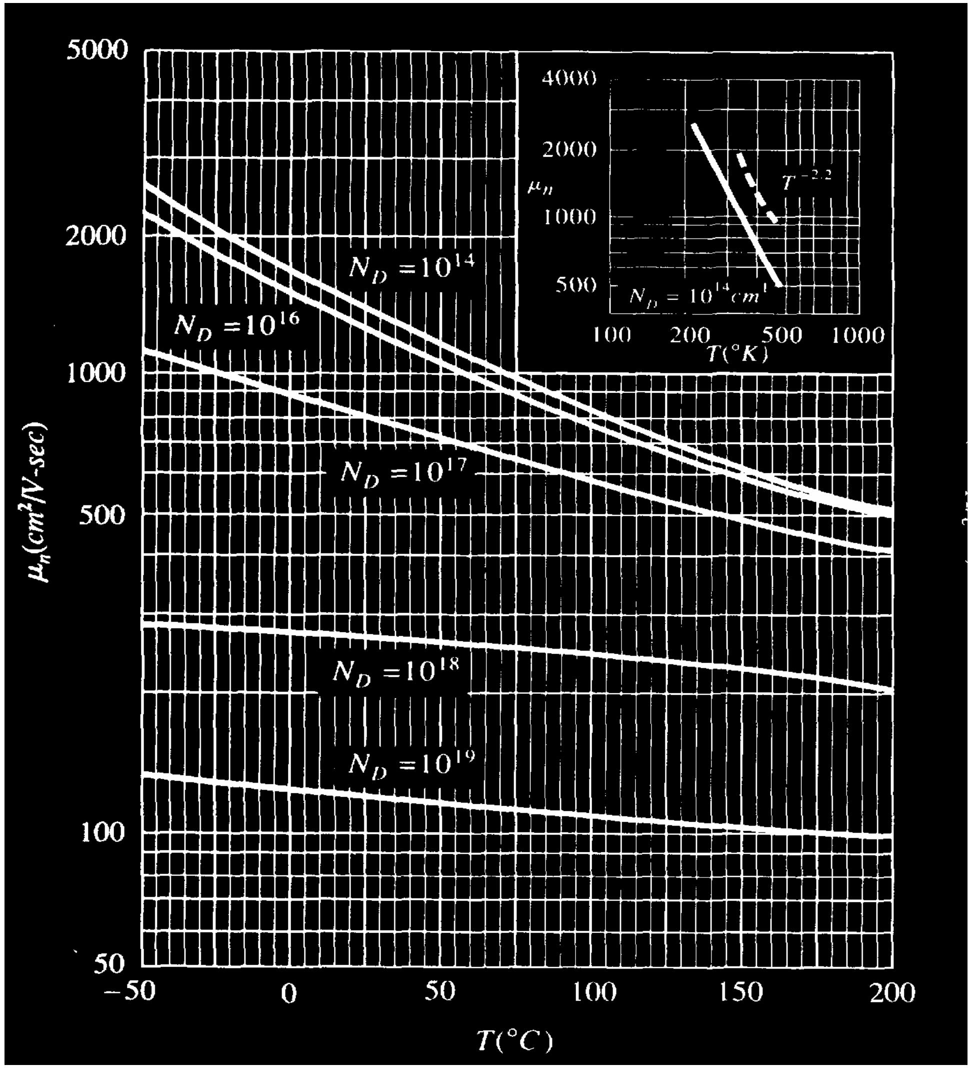
Los mecanismos de interacción o dispersión de las cargas son:

a) Dispersión con la red cristalina

Los fonones (cuantos de vibración que son generados por la vibración térmica de los átomos de la red) interactúan con los portadores de carga

conduce a la dependencia con la T

$$\mu_R \propto T^{-\frac{3}{2}}$$



Efectos de la movilidad

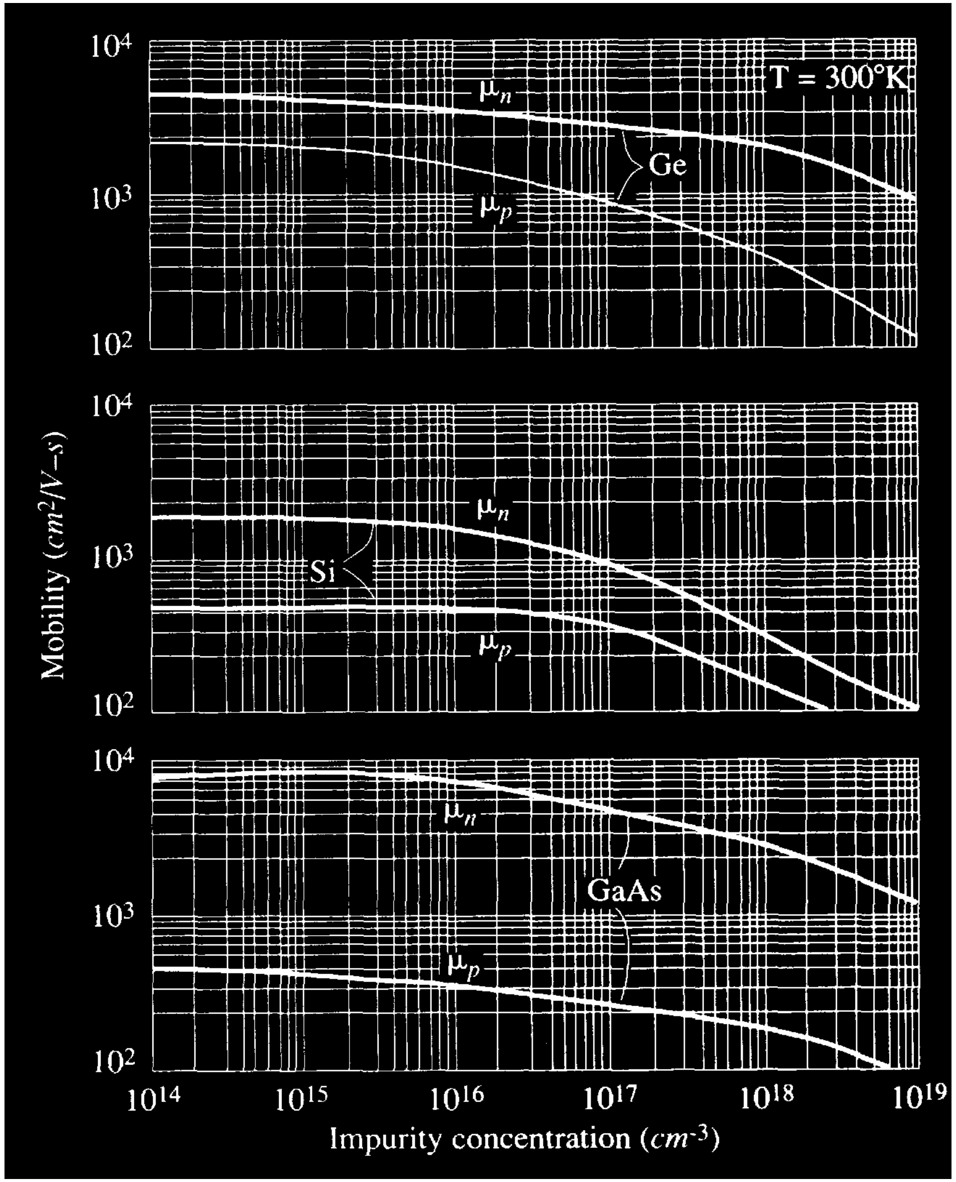
b) Dispersión con las impurezas

Las impurezas son ionizadas a temperatura ambiente de modo existen interacciones coulombianas con huecos y electrones adicionales liberados, que alteran la velocidad de arrastre

$$\mu_I \propto \frac{T^{\frac{3}{2}}}{N_I}$$

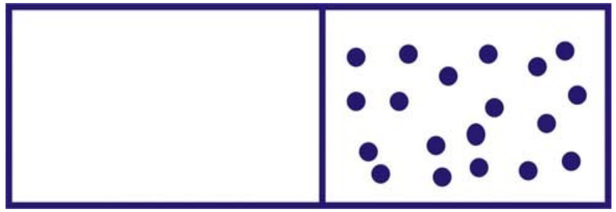
$$N_I = N_d^+ + N_a^-$$

El número total de impurezas



DIFUSIÓN de PORTADORES

Suponiendo que la concentración electrónica varía en una dimensión



El flujo neto de electrones que cruzan el plano x = 0 ,y l es el camino libre medio entre colisiones, λ, que tiene una velocidad térmica V_{Ter}

$$F_n = \frac{1}{2} n(-\lambda) v_{Ter} - \frac{1}{2} n(+\lambda) v_{Ter} = \frac{1}{2} v_{Ter} \left[n(-\lambda) - n(+\lambda) \right]$$

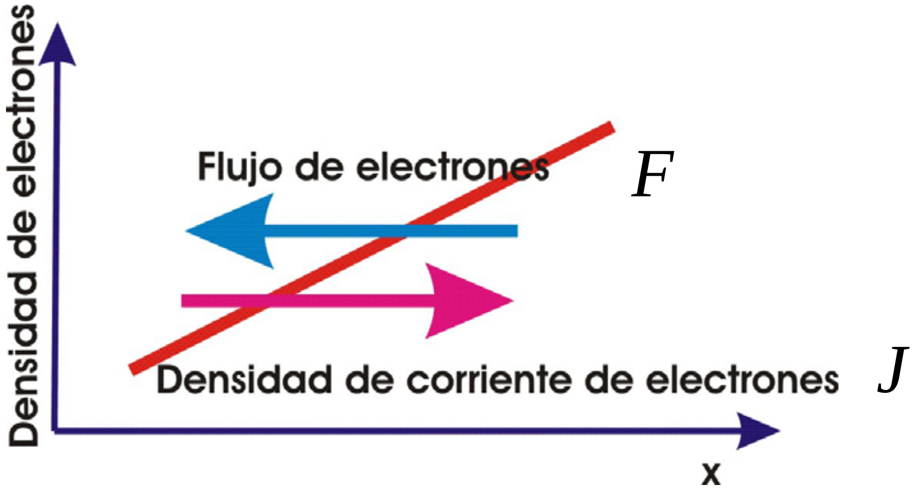
Esto corresponde a un desarrollo en serie en el entorno de x = 0

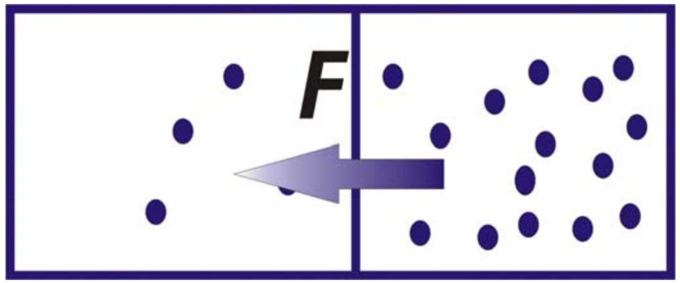
$$F_n = \frac{1}{2} v_{Ter} \left\{ \left[n(0) - \lambda \frac{dn}{dx} \right] - \left[n(0) + \lambda \frac{dn}{dx} \right] \right\} = -v_{Ter} \lambda \frac{dn}{dx}$$

DIFUSIÓN de PORTADORES

La densidad de corriente de difusión electrónica desde la zona de alta a la de baja densidad

$$J_n = -eF_n = ev_{Ter}\lambda \frac{dn}{dx}$$



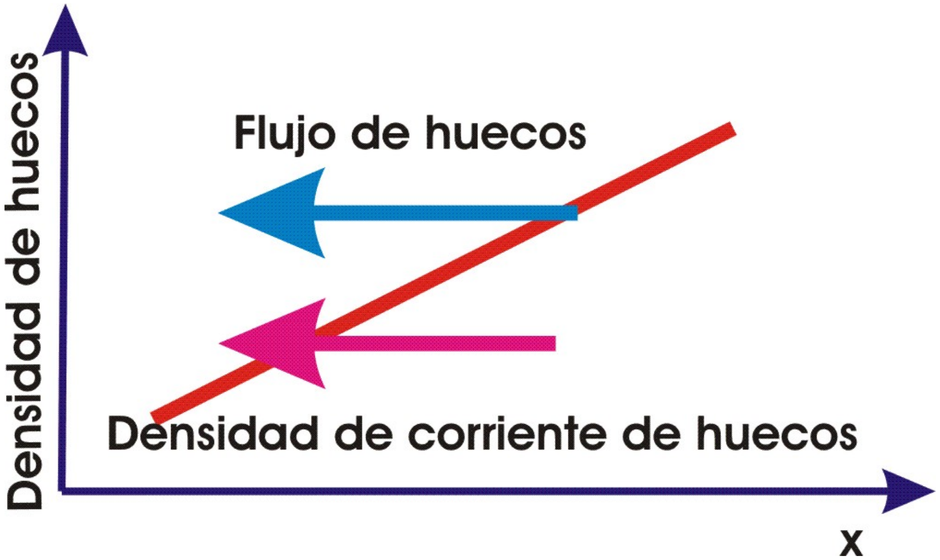


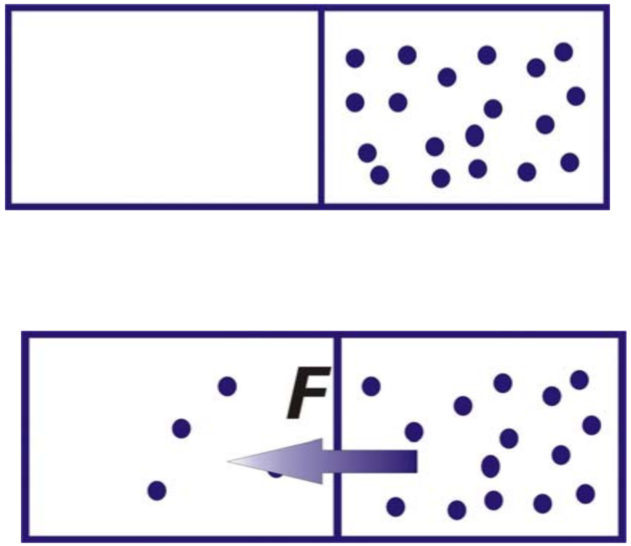
$$J_{Dn} = -eF_n = eD_n \frac{dn}{dx}$$

D_n Coeficiente de Difusión de electrones

DIFUSIÓN de PORTADORES

Análogamente, la densidad de corriente de difusión de huecos desde la zona de alta a la de baja densidad





$$J_{Dp} = -eF_p = -eD_p \frac{dp}{dx}$$

D_p Coeficiente de Difusión de huecos

DIFUSIÓN de PORTADORES

El flujo de difusión, F, tiene la dirección del gradiente de concentración de partículas, pero sentido inverso

$$\vec{F} = -D\vec{\nabla}.n$$ *Ley de Fick*

La densidad de corriente de difusión tendrá sentido definido por la carga, q

$$\vec{J}_D = -e\vec{F} = -qD\vec{\nabla}.n$$

DENSIDAD de CORRIENTE TOTAL

La densidad de corriente de (difusión + arrastre)

$$\vec{J} = \vec{J}_D + \vec{J}_{ar} = \left(\vec{J}_{Dn} + \vec{J}_{Dp}\right) + \left(\vec{J}_{arn} + \vec{J}_{arp}\right)$$

$$\vec{J} = \left(eD_n\vec{\nabla}n - eD_p\vec{\nabla}p\right) + \left(en\mu_n\vec{E} + ep\mu_p\vec{E}\right)$$

Efectos de la movilidad

Si ambos procesos de dispersión son independientes, la probabilidad de que ocurran en un intervalo dt es aditiva:

$$\frac{dt}{\tau} = \frac{dt}{\tau_I} + \frac{dt}{\tau_R}$$

Entonces la movilidad que tiene la forma $\mu = \frac{v_{ar}}{E} = \frac{e}{m^*}\left\langle \tau_{Cp} \right\rangle$

El aporte de todos los mecanismos de dispersión conducirá

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu_I} + \frac{1}{\mu_R}$$

SECONDUCTOR fuera del EQUILIBRIO

Exceso de electrones en la banda de conducción

Exceso de huecos en la banda de valencia

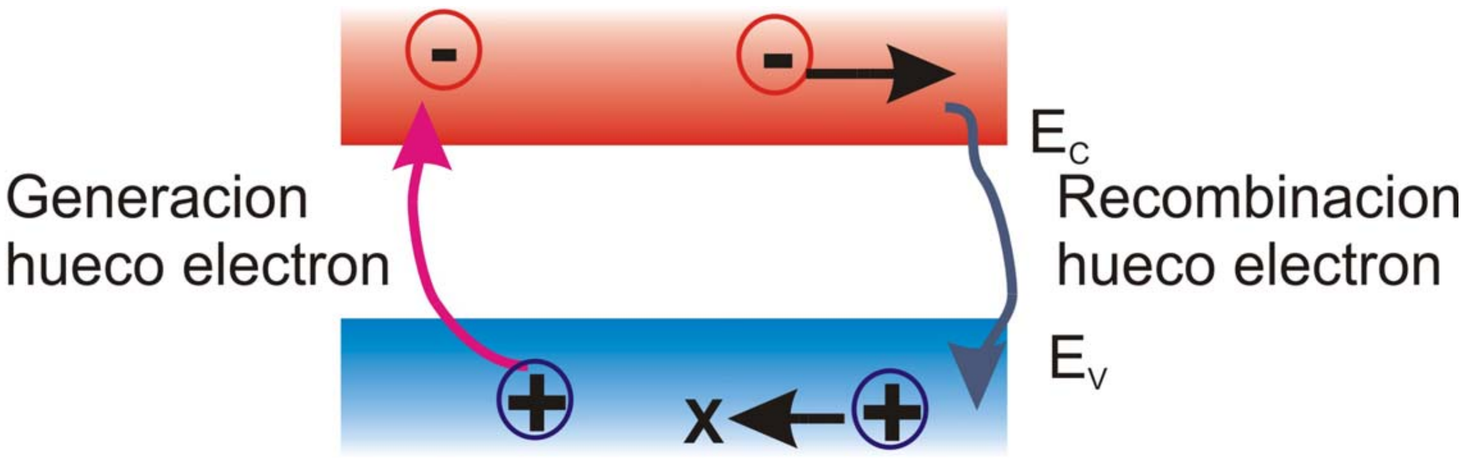
+

Concentración de electrones en el equilibrio

Concentración de huecos en el equilibrio

SEMICONDUCTOR en EQUILIBRIO

GENERACIÓN: proceso de creación de huecos o electrones $\neq$ **RECOMBINACIÓN: proceso de aniquilación de huecos o electrones**



Velocidad de generación térmica de electrones $G_{n0} = G_{p0}$ **Velocidad de generación térmica de huecos**

Partículas/cm³s

SEMICONDUCTOR en EQUILIBRIO

Velocidad de recombinación térmica de electrones $R_{n0} = R_{p0}$ Velocidad de recombinación térmica de huecos

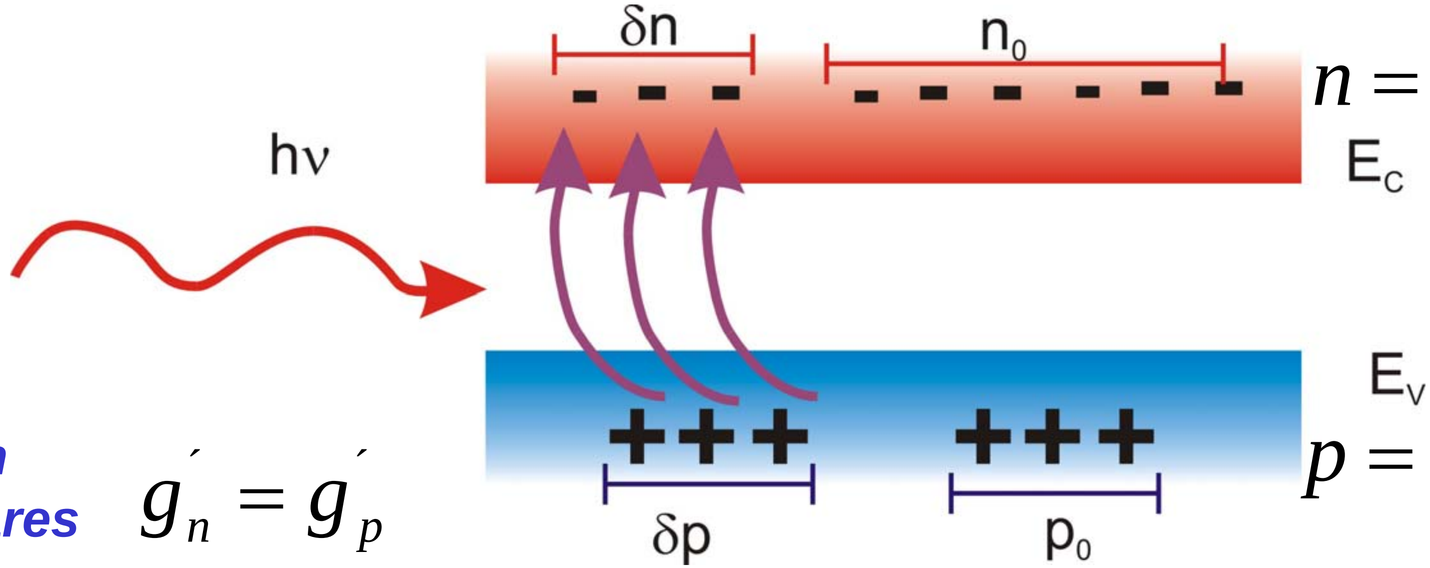
Velocidad de generación térmica **=** Velocidad de recombinación térmica

$$R_{n0} = R_{p0} = G_{n0} = G_{p0}$$

GENERACIÓN y RECOMBINACIÓN de PORTADORES en EXCESO

Símbolo	**Definición**
n_0, p_0	*Concentración de electrones y huecos en equilibrio térmico (independiente del tiempo y la posición)*
n, p	*Concentración total de electrones y huecos (pueden ser dependiente del tiempo y la posición)*
$\delta n = n - n_0$ $\delta p = p - p_0$	*Concentración en exceso de electrones y huecos (pueden ser dependiente del tiempo y la posición)*
g'_n, g'_p	*Velocidades de generación de electrones y huecos en exceso*
R'_n, R'_p	*Velocidades de recombinación de electrones y huecos en exceso*
τ_{n0}, τ_{p0}	*Tiempos de vida de electrones y huecos en exceso*

GENERACIÓN de PORTADORES en EXCESO



$$n = n_0 + \delta n$$

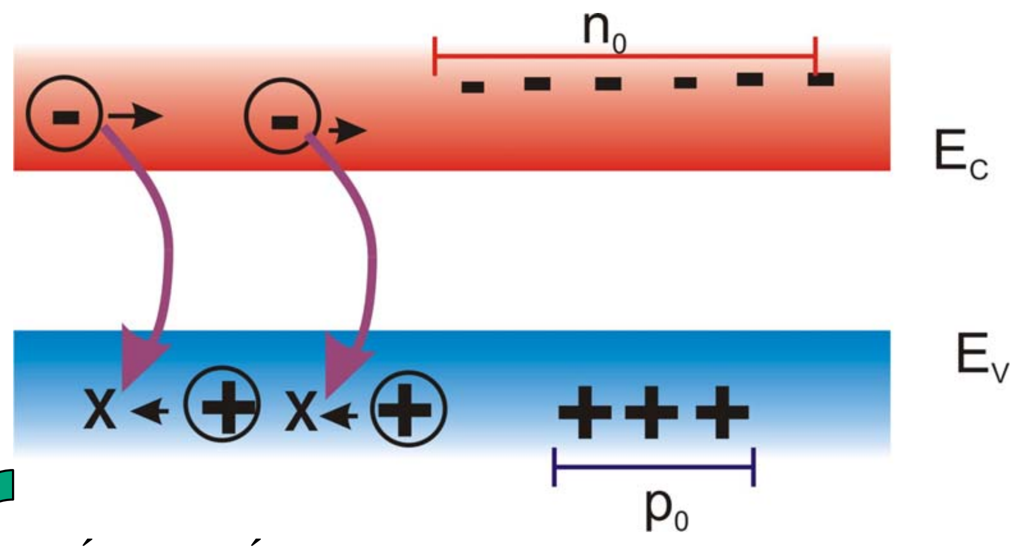
$$p = p_0 + \delta p$$

Los excesos son generados en pares hueco-electrón

$$g_n^{'} = g_p^{'}$$

$$np \neq n_0 p_0 = n_i^2$$

RECOMBINACIÓN de PORTADORES en EXCESO



En estado estacionario no hay un crecimiento continuo de las concentraciones debido a la recombinación de los portadores

$$R_n' = R_p'$$

El cambio neto de la concentración electrónica

$$\frac{dn(t)}{dt} = \alpha_r \left[n_i^2 - n(t)\,p(t) \right]$$

$$n(t) = n_0 + \delta n(t)$$
$$p(t) = p_0 + \delta p(t)$$

GENERACIÓN y RECOMBINACIÓN de PORTADORES en EXCESO

El cambio neto de la concentración electrónica

$$\frac{dn(t)}{dt} = \underline{\alpha_r}\left[n_i^2 - n(t)\,p(t)\right]$$

Velocidad de recombinación en equilibrio térmico

$$\begin{cases} n(t) = n_0 + \delta n(t) \\ p(t) = p_0 + \delta p(t) \end{cases}$$

La recombinación ocurre en pares ⇨ $\delta p(t) = \delta n(t)$

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{d\left(\delta n(t)\right)}{dt} = \alpha_r\left[n_i^2 - \left(n_0 + \delta n(t)\right)\left(p_0 + \delta p(t)\right)\right]$$

$$\frac{d\left(\delta n(t)\right)}{dt} = -\alpha_r \delta n(t)\left[\left(n_0 + p_0\right) + \delta n(t)\right]$$

GENERACIÓN y RECOMBINACIÓN de PORTADORES en EXCESO

CONDICIÓN de BAJA INYECCIÓN de carga

SC TIPO N	$n_0 \gg p_0$	***baja inyección***	$n_0 \gg \delta p$
SC TIPO P	$p_0 \gg n_0$	***baja inyección***	$p_0 \gg \delta n$

GENERACIÓN y RECOMBINACIÓN de PORTADORES en EXCESO

Caso SC TIPO P

$$p_0 \gg n_0 \qquad \frac{d\left(\delta n(t)\right)}{dt} \approx -\alpha_r \delta n(t)\, p_0$$

Baja inyección de carga $\quad p_0 \gg \delta n$

La solución

$$\delta n(t) \approx \delta n(0) e^{-\alpha_r p_0 t} = \delta n(0) e^{-t/\tau_{n0}}$$

Tiempo de vida de portadores minoritarios en exceso

$$\tau_{n0} = \frac{1}{\alpha_r p_0}$$

La velocidad de recombinación

$$R_n' = \frac{-d\left(\delta n(t)\right)}{dt} = \alpha_r p_0 \delta n(t) = \frac{\delta n(t)}{\tau_{n0}}$$

La recombinación de huecos y electrones

$$R_n' = R_p' = \frac{\delta n(t)}{\tau_{n0}}$$

GENERACIÓN y RECOMBINACIÓN de PORTADORES en EXCESO

Caso SC TIPO N $p_0 \ll n_0$

con baja inyección $\delta p(t) \ll p_0$

La recombinación de huecos y electrones

$$R_n' = R_p' = \frac{\delta p(t)}{\tau_{p0}}$$

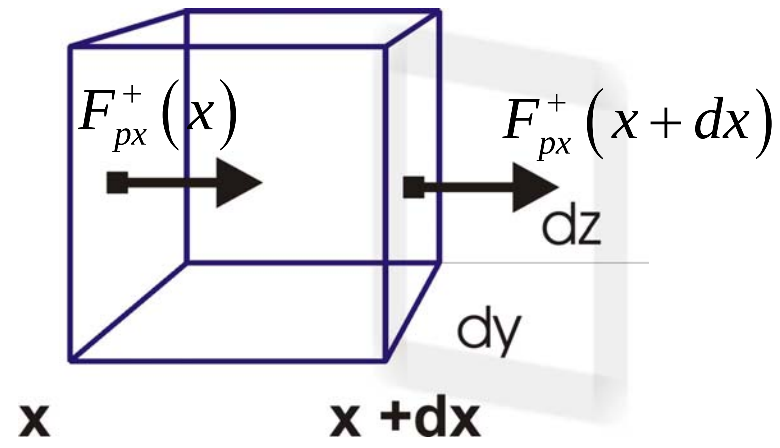
ANÁLISIS MATEMÁTICO del EXCESO de PORTADORES

ECUACIÓN de CONTINUIDAD

Flujo de huecos (número de huecos/cm² s)

$$F_{px}^{+}(x+dx) = F_{px}^{+}(x) + \frac{\partial F_{px}^{+}(x)}{\partial x} dx$$

Elemento de volumen



El incremento del número de huecos

$$\frac{\partial p}{\partial t} dxdydz = \left[F_{px}^{+}(x+dx) - F_{px}^{+}(x) \right] dydz = -\frac{\partial F_{px}^{+}(x)}{\partial x} dxdydz$$

Considerando la generación y recombinación

$$\frac{\partial p}{\partial t} dxdydz = \left[-\frac{\partial F_{px}^{+}(x)}{\partial x} + g_p - \frac{p}{\tau_{pt}} \right] dxdydz$$

τ_{pt} *Tiempo de vida de portadores en equilibrio térmico*

ECUACIÓN de CONTINUIDAD

La ecuación de continuidad

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{\partial F_{px}^{+}(x)}{\partial x} + g_p - \frac{p}{\tau_{pt}}$$

Similarmente para electrones

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\frac{\partial F_{nx}^{-}(x)}{\partial x} + g_n - \frac{n}{\tau_{nt}}$$

F_{nx}^{-} ***Flujo de electrones (número de electrones/cm^{2}s)***

ECUACIÓN de DIFUSIÓN DEPENDIENTE del TIEMPO

Las densidades de corrientes de huecos y electrones

$$J_p = e\mu_p pE - eD_p \frac{\partial p}{\partial x}$$

$$J_n = e\mu_n nE + eD_n \frac{\partial n}{\partial x}$$

$\Rightarrow$ ***El flujo de partículas***

$$F_p^+ = \frac{J_p}{e} = \mu_p pE - D_p \frac{\partial p}{\partial x}$$

$$F_n^- = \frac{J_n}{-e} = -\mu_n nE - D_n \frac{\partial n}{\partial x}$$

La divergencia del flujo de huecos

$$\frac{\partial F_p^+}{\partial x} = \mu_p \frac{\partial}{\partial x}(pE) - D_p \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial p}{\partial x}\right)$$

Pero

$$\frac{\partial F_{px}^+(x)}{\partial x} = -\frac{\partial p}{\partial t} + g_p - \frac{p}{\tau_{pt}}$$

$$-\frac{\partial p}{\partial t} + g_p - \frac{p}{\tau_{pt}} = \mu_p \frac{\partial}{\partial x}(pE) - D_p \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial p}{\partial x}\right)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\mu_p \frac{\partial}{\partial x}(pE) + D_p \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + g_p - \frac{p}{\tau_{pt}}$$

ECUACIÓN de DIFUSIÓN DEPENDIENTE del TIEMPO

La divergencia del flujo de electrones

$$\frac{\partial F_n^-}{\partial x} = -\mu_n \frac{\partial}{\partial x}(nE) - D_n \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial n}{\partial x}\right)$$

Pero

$$\frac{\partial F_{nx}^-(x)}{\partial x} = -\frac{\partial n}{\partial t} + g_n - \frac{n}{\tau_{nt}}$$

$$-\frac{\partial n}{\partial t} + g_n - \frac{n}{\tau_{nt}} = -\mu_n \frac{\partial}{\partial x}(nE) - D_n \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial n}{\partial x}\right)$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \mu_n \frac{\partial}{\partial x}(nE) + D_n \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} + g_n - \frac{n}{\tau_{nt}}$$

Además

$$\frac{\partial}{\partial x}(pE) = E\frac{\partial p}{\partial x} + p\frac{\partial E}{\partial x}$$

ECUACIÓN de DIFUSIÓN DEPENDIENTE del TIEMPO

Las ecuaciones de difusión resultan entonces

$$D_p \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \mu_p \left(E \frac{\partial p}{\partial x} + p \frac{\partial E}{\partial x} \right) + g_p - \frac{p}{\tau_{pt}} = \frac{\partial p}{\partial t}$$

$$D_n \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} + \mu_n \left(E \frac{\partial n}{\partial x} + n \frac{\partial E}{\partial x} \right) + g_n - \frac{n}{\tau_{nt}} = \frac{\partial n}{\partial t}$$

pero

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial (\delta p)}{\partial x}$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\partial (\delta p)}{\partial t}$$

En función de los excesos

$$\Rightarrow \quad D_p \frac{\partial^2 (\delta p)}{\partial x^2} + \mu_p \left(E \frac{\partial (\delta p)}{\partial x} + p \frac{\partial E}{\partial x} \right) + g_p - \frac{p}{\tau_{pt}} = \frac{\partial (\delta p)}{\partial t}$$

$$D_n \frac{\partial^2 (\delta n)}{\partial x^2} + \mu_n \left(E \frac{\partial (\delta n)}{\partial x} + n \frac{\partial E}{\partial x} \right) + g_n - \frac{n}{\tau_{nt}} = \frac{\partial (\delta n)}{\partial t}$$

TRANSPORTE AMBIPOLAR

El campo eléctrico total $E = E_{ap} + E_{\text{int}}$

El campo interno es generado por los excesos de carga

$$\nabla . E_{\text{int}} = \frac{e\left(\delta p - \delta n\right)}{\varepsilon_s} = \frac{\partial E_{\text{int}}}{\partial x}$$

Esto complica la determinación de las concentraciones de los excesos!!

Podría aproximarse

$$\left|E_{\text{int}}\right| \ll \left|E_{ap}\right|$$

Esto es aceptable en la situación de neutralidad de carga

$$\delta p \approx \delta n \quad \Rightarrow \quad \nabla . E_{\text{int}} \approx 0$$

TRANSPORTE AMBIPOLAR

Son definidas la generación y recombinación de los excesos

$$g_p = g_n = g$$

$$R_p = \frac{p}{\tau_{pt}} = \frac{n}{\tau_{nt}} = R_n = R$$

$$D_p \frac{\partial^2 (\delta p)}{\partial x^2} + \mu_p \left(E \frac{\partial(\delta p)}{\partial x} + p \frac{\partial E}{\partial x} \right) + g - R = \frac{\partial(\delta p)}{\partial t} \qquad \textit{ec. 1}$$

$$D_n \frac{\partial^2 (\delta n)}{\partial x^2} + \mu_n \left(E \frac{\partial(\delta n)}{\partial x} + n \frac{\partial E}{\partial x} \right) + g - R = \frac{\partial(\delta n)}{\partial t} \qquad \textit{ec. 2}$$

Realizando la combinación $\mu_n n$ *ec. 1 +* $\mu_p p$ *ec. 2*

TRANSPORTE AMBIPOLAR

$$\left(\mu_n n D_p + \mu_p p D_n\right)\frac{\partial^2(\delta p)}{\partial x^2} + \mu_p \mu_n (p-n) E \frac{\partial(\delta p)}{\partial x}$$

$$+\mu_p \mu_n (np - pn)\frac{\partial E}{\partial x} + \left(\mu_n n + \mu_p p\right)(g-R) = \left(\mu_n n + \mu_p p\right)\frac{\partial(\delta p)}{\partial t}$$

Dividiendo por $\left(\mu_n n + \mu_p p\right)$

$$\frac{\left(\mu_n n D_p + \mu_p p D_n\right)}{\left(\mu_n n + \mu_p p\right)}\frac{\partial^2(\delta p)}{\partial x^2} + \frac{\mu_p \mu_n}{\left(\mu_n n + \mu_p p\right)}(p-n) E \frac{\partial(\delta p)}{\partial x} + (g-R) = \frac{\partial(\delta p)}{\partial t}$$

TRANSPORTE AMBIPOLAR

Definiendo el coeficiente de difusión y la movilidad ambipolares

$$D^* = \frac{\left(\mu_n n D_p + \mu_p p D_n\right)}{\left(\mu_n n + \mu_p p\right)} \qquad \mu^* = \frac{\mu_p \mu_n \left(p - n\right)}{\left(\mu_n n + \mu_p p\right)}$$

La ecuación de difusión ambipolar

$$D^* \frac{\partial^2 \left(\delta p\right)}{\partial x^2} + \mu^* E \frac{\partial\left(\delta p\right)}{\partial x} + \left(g - R\right) = \frac{\partial\left(\delta p\right)}{\partial t}$$

LÍMITE de DOPAJE EXTRÍNSECO y de BAJA INYECCIÓN de CARGA

Las relaciones de Einstein relacionan la movilidad con los coeficientes de difusión

$$\frac{\mu_n}{D_n} = \frac{\mu_p}{D_p} = \frac{e}{kT}$$

El coeficiente de difusión resulta

$$D^* = \frac{\mu_n n D_p + \mu_p p D_n}{\mu_n n + \mu_p p} = \frac{D_n \frac{e}{kT} n D_p + D_p \frac{e}{kT} p D_n}{D_n \frac{e}{kT} n + D_p \frac{e}{kT} p} = \frac{D_n D_p (n + p)}{D_n n + D_p p}$$

$$D^* = \frac{D_n D_p (n_0 + \delta n + p_0 + \delta n)}{D_n (n_0 + \delta n) + D_p (p_0 + \delta n)}$$

LÍMITE de DOPAJE EXTRÍNSECO y de BAJA INYECCIÓN de CARGA

a) semiconductor es de tipo P $p_0 \gg n_0$ *Baja inyección de carga* $p_0 \gg \delta n$

$$D^* = \frac{D_n D_p \left(n_0 + \delta n + p_0 + \delta n\right)}{D_n \left(n_0 + \delta n\right) + D_p \left(p_0 + \delta n\right)} \simeq \frac{D_n D_p p_0}{D_p p_0} = D_n$$

$$\mu^* = \frac{\mu_p \mu_n \left(p - n\right)}{\mu_n n + \mu_p p} = \frac{\mu_p \mu_n \left(p_0 - n_0\right)}{\mu_n \left(n_0 + \delta n\right) + \mu_p \left(p_0 + \delta n\right)} \simeq \frac{\mu_p \mu_n p_0}{\mu_p p_0} = \mu_n$$

$\delta p \approx \delta n$ *Hipótesis de neutralidad de carga*

La ecuación ambipolar se reduce a la correspondiente al exceso del portador minoritario

$$D_n \frac{\partial^2 \left(\delta n\right)}{\partial x^2} + \mu_n E \frac{\partial \left(\delta n\right)}{\partial x} + \left(g - R\right) = \frac{\partial \left(\delta n\right)}{\partial t}$$

LÍMITE de DOPAJE EXTRÍNSECO y de BAJA INYECCIÓN de CARGA

La generación y recombinación del exceso minoritario

$$g - R = g_n - R_n = \left(G_{no} + g_n^{'}\right) - \left(R_{n0} + R_n^{'}\right)$$

generación del equilibrio y del exceso

recombinación del equilibrio y del exceso

En equilibrio térmico $\quad G_{p0} = G_{n0}$

$$g - R = g_n^{'} - R_n^{'} = g_n^{'} - \frac{\delta n}{\tau_n}$$

LÍMITE de DOPAJE EXTRÍNSECO y de BAJA INYECCIÓN de CARGA

Ecuación ambipolar para SC fuertemente extrínseco tipo P

$$D_n \frac{\partial^2 (\delta n)}{\partial x^2} + \mu_n E \frac{\partial (\delta n)}{\partial x} + g' - \frac{\delta n}{\tau_n} = \frac{\partial (\delta n)}{\partial t}$$

Análogamente, la ecuación ambipolar para SC fuertemente extrínseco tipo N

$$D_p \frac{\partial^2 (\delta p)}{\partial x^2} + \mu_p E \frac{\partial (\delta p)}{\partial x} + g' - \frac{\delta p}{\tau_p} = \frac{\partial (\delta p)}{\partial t}$$

APLICACIONES de la ECUACIÓN de TRANSPORTE AMBIPOLAR

Estado estacionario

$$\frac{\partial(\delta n)}{\partial t} = 0 = \frac{\partial(\delta p)}{\partial t}$$

Distribución uniforme de portadores en exceso

$$D_p \frac{\partial^2(\delta p)}{\partial x^2} = 0, D_n \frac{\partial^2(\delta n)}{\partial x^2} = 0$$

Campo eléctrico nulo

$$\mu_p E \frac{\partial(\delta p)}{\partial x} = 0, \mu_n E \frac{\partial(\delta n)}{\partial x} = 0$$

No hay generación en volumen de pares hueco-electrón

$$g' = 0$$

APLICACIONES de la ECUACIÓN de TRANSPORTE AMBIPOLAR

Situaciones frecuentes

a) *Distribución uniforme de portadores en exceso*

No hay generación en volumen de pares hueco-electrón

$$-\frac{\delta p}{\tau_p} = \frac{\partial(\delta p)}{\partial t} \Rightarrow \delta p(t) = \delta p(0) e^{-\frac{t}{\tau_p}}$$

b) *Estado estacionario*

Campo eléctrico nulo

No hay generación en volumen de pares hueco-electrón

$$D_p \frac{\partial^2(\delta p)}{\partial x^2} - \frac{\delta p}{\tau_p} = 0 \Rightarrow \delta p(x) = A e^{-\frac{x}{L_p}} + B e^{\frac{x}{L_p}}$$

$$L_P = \sqrt{D_p \tau_p}$$ *Longitud de Difusión*