

Materiales Eléctricos

Semiconductores

Materiales Eléctricos

Semiconductores Extrínsecos

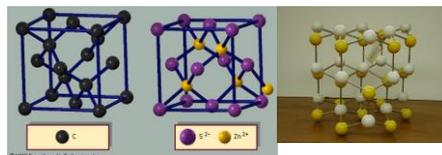
Puesto que los semiconductores intrínsecos presentan el mismo número de e^- de conducción que de h^+ no son lo suficientemente flexibles para la mayor parte de las aplicaciones prácticas de los semiconductores . Para aumentar el número de portadores el procedimiento más común consiste en introducir, de forma controlada, una cierta cantidad de átomos de impurezas obteniéndose lo que se denomina semiconductor extrínseco o dopado. En ellos, la conducción de corriente eléctrica tiene lugar preferentemente por uno de los dos tipos de portadores.

Se puede obtener diferentes semiconductores (diferentes "GAPs") combinando átomos

	III	IV	V	VI
5	B Boron 10.811	C Carbon 12.011	N Nitrogen 14.0067	O Oxygen 15.9994
13	Al Aluminum 26.98154	Si Silicon 28.0855	P Phosphorus 30.97376	S Sulfur 32.066
30	Zn Zinc 65.39	Ga Gallium 69.723	Ge Germanium 72.61	As Arsenic 74.9216
48	Cd Cadmium 112.411	In Indium 114.82	Sn Tin 118.710	Sb Antimony 121.757
80	Hg Mercury 200.59	Tl Thallium 204.3833	Pb Lead 207.2	Bi Bismuth 208.9804
				Po Polonium (209)

Si, Ge, GaAs, InP, ZnO

IV III-V II-VI



IV diamante III-V, II-VI cinc-blenda II-VI wurzita

Banda prohibida (Gap)

Silicio	1.14 eV
Germanio	0.67 eV
GaAs	1.42 eV
InP	1.34 eV
ZnO	3.37 eV
Diamante	5.46 - 6.4 eV

Semiconductores tipo N

Impurezas Donadoras

En un cristal de Si se sustituye uno de sus átomos por otro que posee 5 e- de valencia. Dicho átomo encajará sin mayores dificultades en la red cristalina del Si. Cuatro de sus 5 e- de valencia completarán la estructura de enlaces, quedando el quinto e- débilmente ligado al átomo. A temperatura ambiente, e incluso inferior, este e- se libera con facilidad y puede entonces moverse por la red cristalina, por lo que constituye un portador. Es importante señalar que cuando se libera este e-, en la estructura de enlaces no queda ninguna vacante en la que pueda caer otro e- ligado. A estos elementos que tienen la propiedad de ceder e- libres sin crear h+ al mismo tiempo, se les denomina donantes o impurezas donadoras y hacen al semiconductor de tipo n por que a dicha temperatura tenemos muchos más e- que h+.

En un semiconductor tipo n, los e- de conducción son los portadores mayoritarios (aunque no exclusivos).

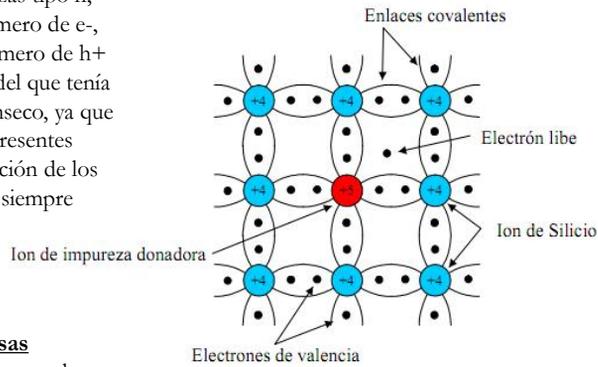
Materiales Eléctricos

Si un semiconductor intrínseco se contamina con impurezas tipo n, no solo aumenta el número de e⁻, sino que además, el número de h⁺ disminuye por debajo del que tenía el semiconductor intrínseco, ya que el gran número de e⁻ presentes aumenta la recombinación de los e⁻ y los h⁺. Se cumple siempre

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

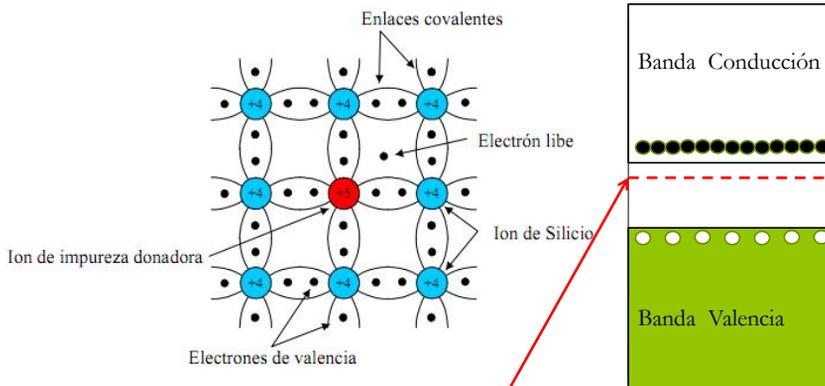
Ley de acción de masas

Esta ley tiene carácter general, cumpliéndose tanto en semiconductores intrínsecos como extrínsecos, ya sean estos últimos de tipo n o de tipo p.



Materiales Eléctricos

Semiconductor Extrínseco tipo N
Con impurezas Donadoras N_D



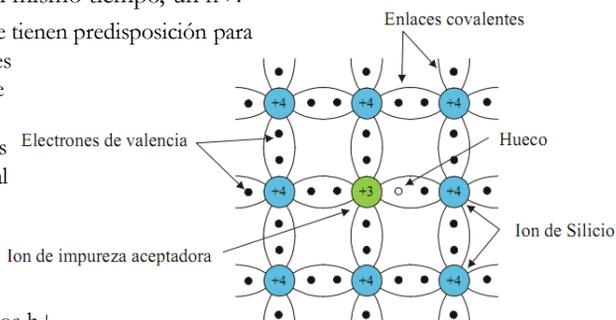
Niveles energéticos puestos por las impurezas Donadoras N_D

Semiconductores tipo p

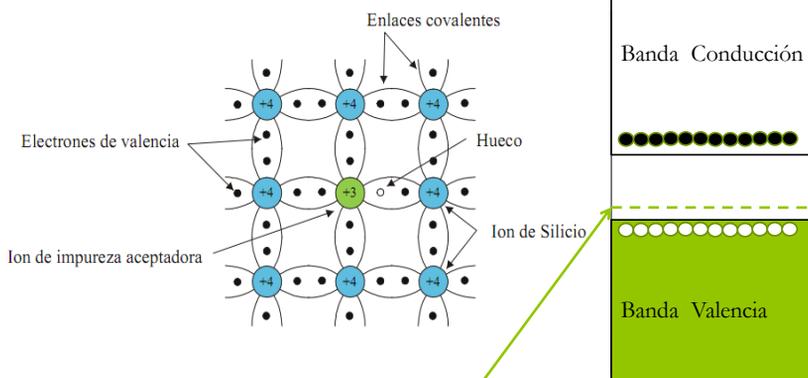
Impurezas Aceptoras

Cuando sustituimos un átomo de Si por otro que tenga 3 e- de valencia. Dicho átomo no completa la estructura de enlaces. De ahí que a temperatura ambiente e incluso inferiores, un e- ligado de un átomo vecino pase a ocupar dicha vacante completando, de esta forma, la estructura de enlaces y creando, al mismo tiempo, un h+.

A estos elementos que tienen predisposición para aceptar e- ligados se les conoce con el nombre de aceptadores o impurezas aceptoras y se dicen que hacen al material de tipo p ya que éste conduce, fundamentalmente (aunque no de forma exclusiva), mediante los h+.



Semiconductor Extrínseco tipo P
Con impurezas Aceptoras N_A



Niveles energéticos puestos por las impurezas Aceptoras N_A

Materiales Eléctricos

DENSIDAD DE CARGAS

Finalmente, es de señalar que cuando el átomo donador o aceptador, cede o admite e- respectivamente queda cargado positiva / negativamente. Sin embargo, el ion correspondiente tiene su estructura de enlaces completa. Es una carga fija que no puede contribuir a la conducción de corriente eléctrica. Por otra parte, el cristal es eléctricamente neutro, es decir, debe haber el mismo número de cargas positivas y negativas.

La neutralidad de carga se debe mantener,
Por lo tanto.

$$N_{ACEPTADORES}^- + n = N_{DONADORES}^+ + p$$

Si tenemos un semiconductor tipo n

$$\left. \begin{array}{l} N_D - N_A \approx N_D \gg n_i \\ n \gg p \end{array} \right\} n \approx N_D$$

$$\text{Como } n \cdot p = n_i^2 \Rightarrow p = \frac{n_i^2}{N_D}$$

En un semiconductor tipo p

$$\left. \begin{array}{l} N_A - N_D \approx N_A \gg n_i \\ p \gg n \end{array} \right\} p \approx N_A$$

$$\text{Como } n \cdot p = n_i^2 \Rightarrow n = \frac{n_i^2}{N_A}$$

Materiales Eléctricos

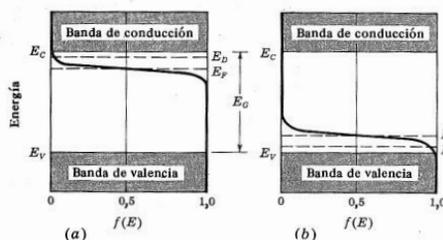


Fig. 19-9. Posiciones del nivel de Fermi en semiconductores (a) de tipo n y (b) de tipo p

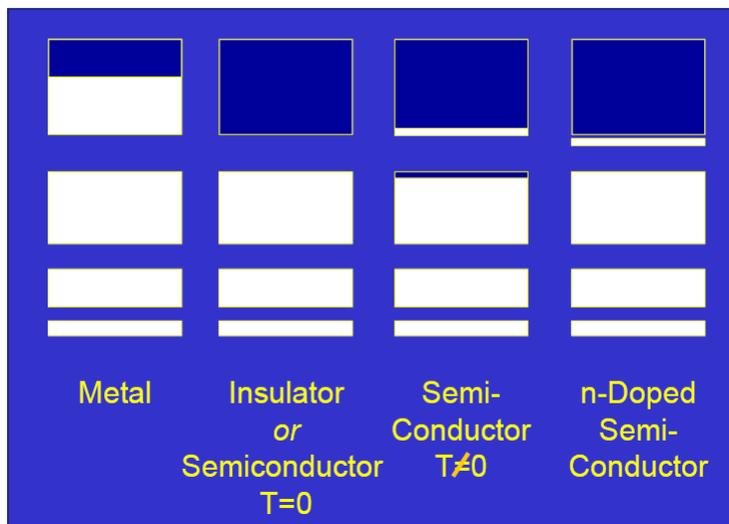
Puede hacerse un cálculo exacto de la posición del Nivel de Fermi en un Material tipo n la posición del Nivel de Fermi

$$E_F = E_C - kT \ln \frac{N_C}{N_D}$$

Igualmente para un material tipo p:

$$E_F = E_V + kT \ln \frac{N_V}{N_A}$$

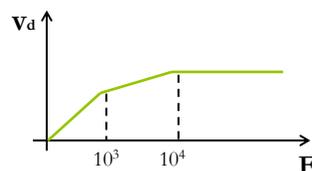
Overview of Electron Distributions



Propiedades Eléctricas del Si

- Densidad de Corriente $J = q(n\mu_n + p\mu_p)E$
- Ley de Ohm Microscópica $J = \sigma E$
- Concentración Intrínseca $n_i^2 = A_0 T^3 e^{\frac{-E_{G0}}{kT}}$
- Banda Prohibida. Variación con la temperatura para Si $E_G(T) = 1,21 - 3,6 * 10^{-4} * T$
- Dependencia de la Movilidad con el Campo Eléctrico

Permanece constante si $E < 10^3$ V/cm en un Si tipo n. Para $10^3 < E < 10^4$ V/cm, μ_n varía aproximadamente como $E^{-1/2}$. Para mayores, μ_n es inversamente proporcional a E y la velocidad del portador se aproxima al valor constante de 10^7 cm/seg



Dependencia de la Movilidad con el Campo Eléctrico

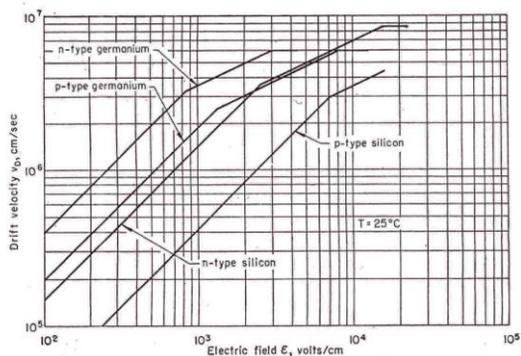
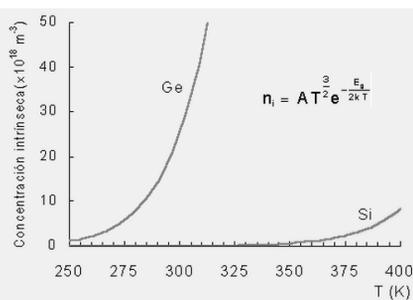
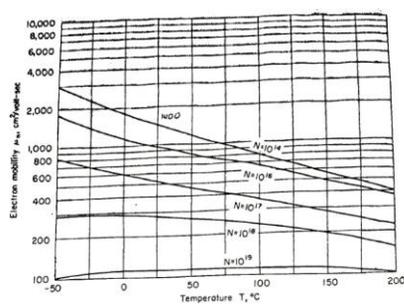


Fig. 4-2. Drift velocity as a function of electric field. (After E. J. Ryder.)

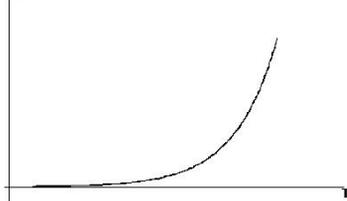
Dependencia de la resistividad con la Temperatura para un Semiconductor Intrínseco



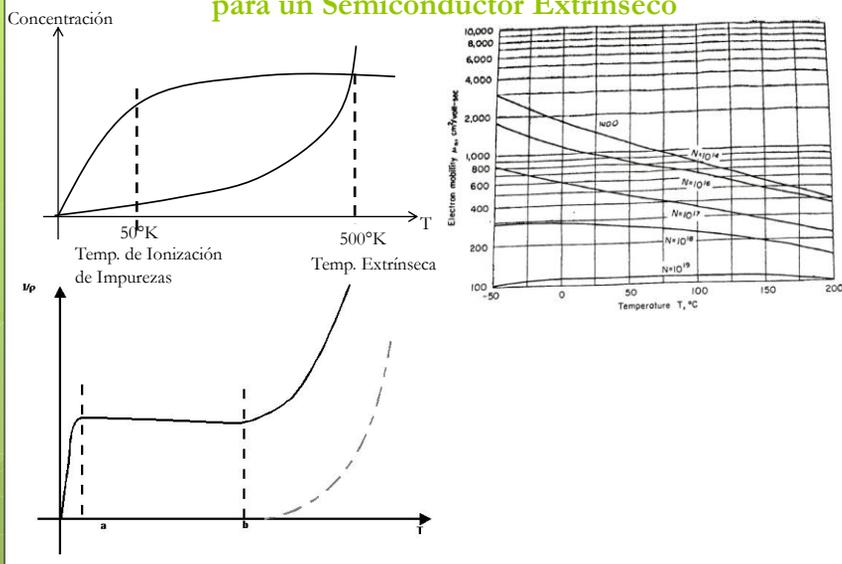
$$n_i = AT^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{E_g}{2kT}}$$



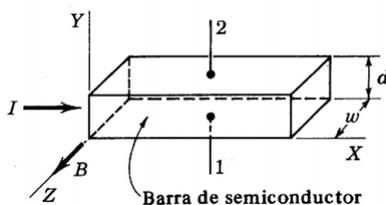
$1/\rho$



Dependencia de la resistividad con la Temperatura para un Semiconductor Extrínseco



Efecto Hall



Método de medición: Sea el bloque conductor de la figura, por el cual circula una corriente en x positiva. Esto significa que, si el material es de tipo n , la velocidad de e^- tiene dirección x negativa; y si el material es de tipo p , los huecos tienen una velocidad en x positiva.

Si se aplica un campo magnético B uniforme en z positiva, las cargas en movimiento experimentan una fuerza perpendicular a su

velocidad y al campo B , entonces $F = qv \times B$, en dirección y sentido que depende de q .

Como los portadores n tendrían velocidad opuesta a los de p , entonces, tanto si los portadores son n o p , F_{res} sería en la dirección y positiva.

Esto significa que los portadores, se acumularían en la cara superior del bloque, lo que sería una tensión entre la cara 1 y 2.

Si se mide esta tensión negativa, es un semiconductor tipo n , de lo contrario es tipo p .

Materiales Eléctricos

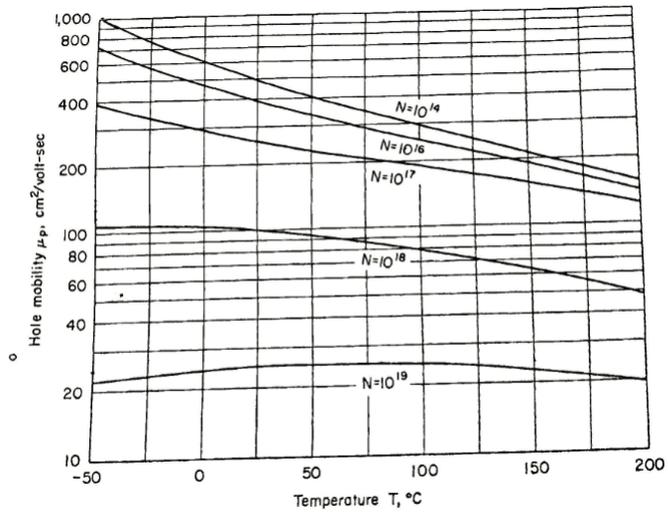


Fig. 4-7. Temperature dependence of mobility in silicon. (After W. W. Gärtner.)

Materiales Eléctricos

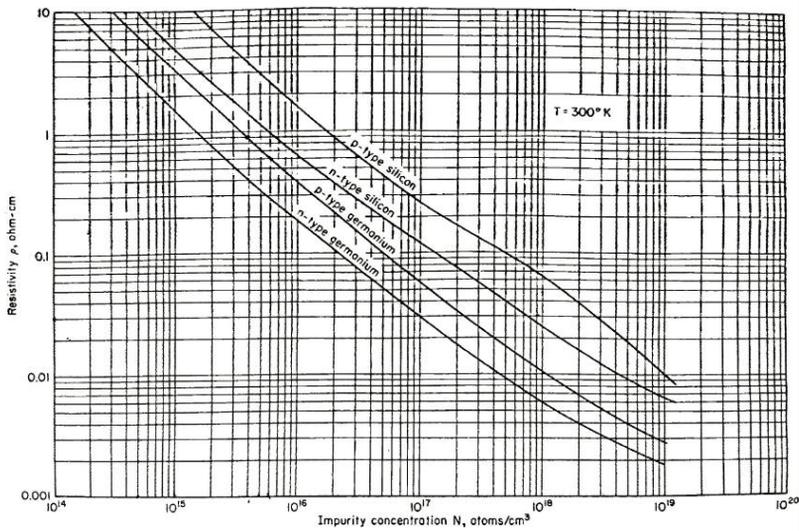


Fig. 4-10. Resistivity as a function of impurity concentration.

Materiales Eléctricos

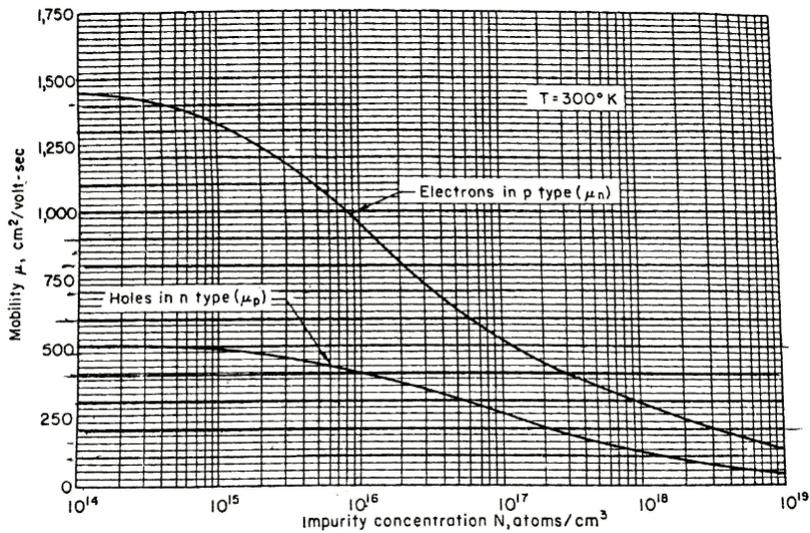


FIG. 4-4. Minority carrier drift mobilities in silicon.

Materiales Eléctricos

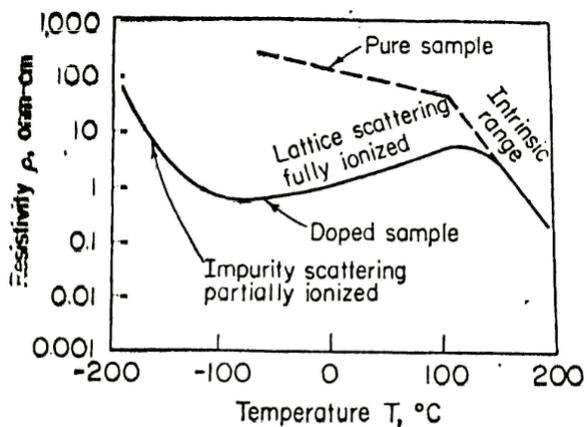
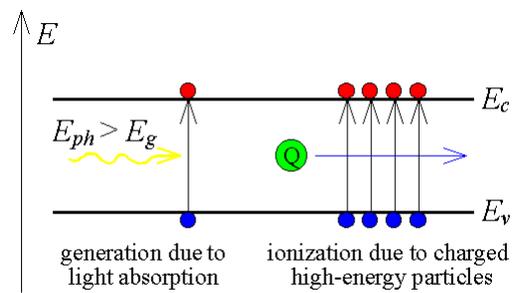


FIG. 4-9. Example of typical temperature dependence of resistivity in semiconductors.

Modulación de la Conductividad LDR

Generación y Recombinación



VARIACION TEMPORAL DE LA CARGA EN UN SEMICONDUCTOR

$\frac{p}{\tau_p}$ Decrecimiento de la concentración de huecos por segundo debida a la recombinación

g = Incremento de la concentración de huecos por segundo debida a la generación térmica

$\frac{dp}{dt} = g - \frac{p}{\tau_p}$ Como ninguna carga puede ser creada ni destruida, deberá haber un incremento por segundo dp/dt de la concentración

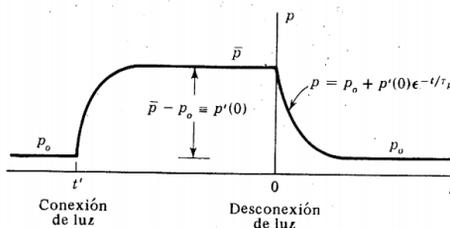


Fig. 2-13. Concentración de huecos (minoritarios) en una barra de semiconductor de tipo n , como función del tiempo, debida a la generación y a la recombinación.

$\frac{dp}{dt} = \frac{p_o - p}{\tau_p}$ En condiciones de equilibrio, la concentración de huecos p alcanzará su equilibrio térmico para un valor p_o

$p' = p_o - p = p'(t)$ La densidad de portadores inyectados o excedentes p' se define como el incremento de la concentración de minoritarios sobre el valor de equilibrio.

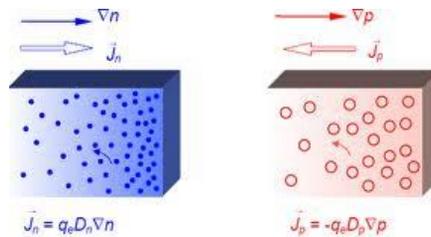
$\frac{dp'}{dt} = -\frac{p'}{\tau_p}$ La velocidad de cambio del exceso de concentración es proporcional a su concentración. El signo menos indica que el cambio es una disminución en el caso de recombinación, y es un aumento cuando la concentración se resarce de una disminución temporal.

Debido a la radiación es un instante inicial (a $t \leq 0$), hay un exceso de concentración $p(0) = p - p_o$, y cuando la radiación se elimine, la solución para $t \geq 0$ será:

$$p'(t) = p'(0)e^{-\frac{t}{\tau_p}} = (p - p_o)e^{-\frac{t}{\tau_p}} = p - p_o$$

Materiales Eléctricos

Difusión



Corrientes de difusión de electrones y de huecos

Como consecuencia del gradiente de concentración aparece un movimiento de partículas en el sentido contrario al crecimiento del gradiente. Pero estas partículas son cargas por lo tanto es una corriente eléctrica. La constante de proporcionalidad entre el gradiente y la corriente es la **constante de Difusión D_n y D_p**

$$J_n = qD_n \frac{dn}{dx} \quad J_p = -D_p \frac{dp}{dx}$$

Materiales Eléctricos

La constante de Difusión se relaciona con la movilidad por

$$\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{D_p}{\mu_p} = V_T = \frac{kT}{q} \quad V_T = \frac{kT}{q} = 26mV$$

Relación de Einstein

A 300°K = 27°C

Ejemplo de una corriente de Difusión

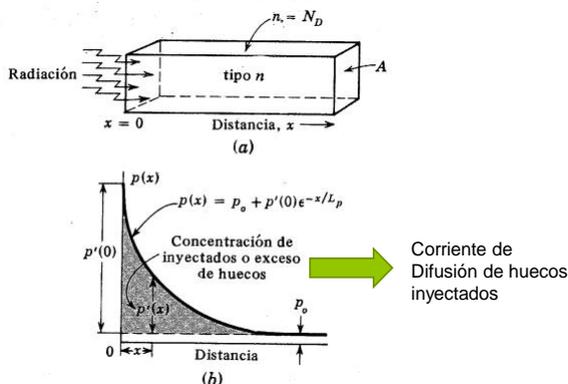
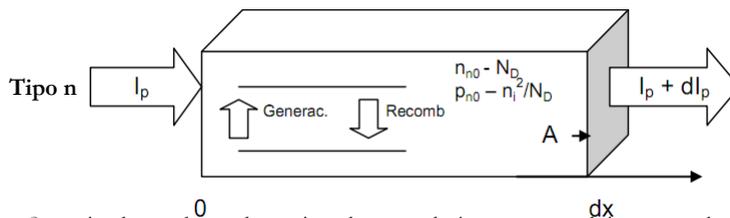


Fig. 2-16. (a) La luz incide sobre el extremo de una barra larga de semiconductor. Esta excitación origina pares de electrón-huecos que se inyectan en $x = 0$. (b) La concentración de huecos (minoritarios) $p(x)$ en la barra en función de la distancia x contada a partir del extremo de la barra. La concentración inyectada es $p'(x) = p(x) - p_0$. La radiación inyecta $p'(0)$ portadores/ m^3 en la barra a $x = 0$. (No se dibuja a escala, puesto que $p'(0) \gg p_0$.)

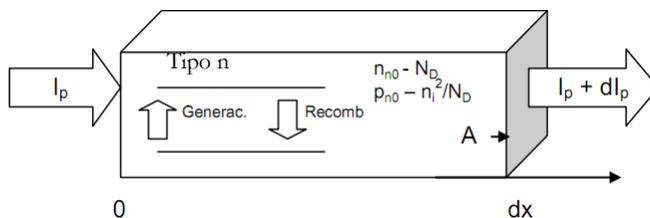
Ecuación de Continuidad

Se refiere a todos los efectos que sufren las cargas en un semiconductor. Puede aparecer variación temporal y espacial de las cargas. Se basa en que ninguna carga puede ser creada o destruida.



Suponiendo una barra de semiconductor de área transversal A y un ancho dx . Por un extremo entra una corriente I_p y por el extremo opuesto sale $I_p + dI_p$. dI_p puede ser positivo o negativo. Internamente se tiene **generación** y **recombinación**.

Ecuación de Continuidad

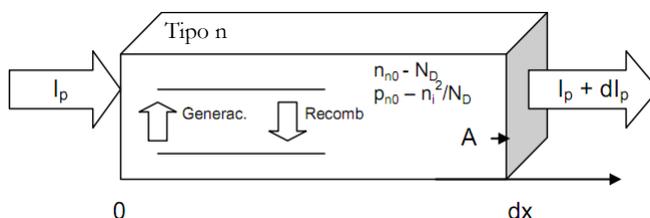


$\frac{dI_p}{q}$ Es el numero de portadores que desaparecen por unidad de tiempo en el volumen $A dx$

$\frac{1}{qA} \frac{dI_p}{dx} = \frac{1}{q} \frac{dJ_p}{dx}$ Disminución de la concentración de huecos por unidad de tiempo en el volumen $A dx$ debida a la corriente I_p

Ecuación de Continuidad

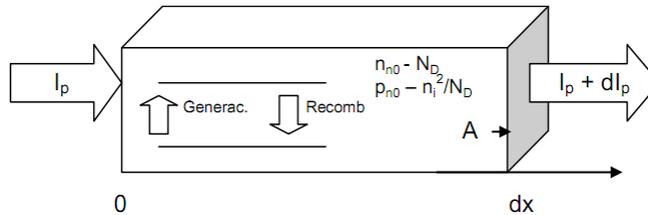
Ecuación de Continuidad que contempla la variación Temporal y Espacial de la carga en el volumen $A dx$



$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{p_0 - p}{\tau_p} - \frac{1}{q} \frac{dJ_p}{dx}$$

Ecuación de Continuidad

Ecuación de Continuidad que contempla la variación Temporal y Espacial de la carga en el volumen $A dx$ mas la corriente por campo Eléctrico E



$$\text{Para un SEM Tipo N} \quad \frac{dp_n}{dt} = \frac{p_{n0}}{\tau_p} - \frac{p_n}{\tau_p} - \mu_p \frac{d(p_n E)}{dx} + D_p \frac{d^2 p_n(x)}{dx^2}$$

$$\text{Para un SEM Tipo P} \quad \frac{dn_p}{dt} = \frac{n_{p0}}{\tau_n} - \frac{n_p}{\tau_n} - \mu_n \frac{d(n_p E)}{dx} - D_n \frac{d^2 n_p(x)}{dx^2}$$

Ecu. de Cont. aplicada sin variación temporal

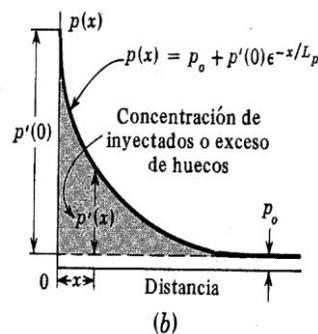
$$\frac{d^2 p}{dx^2} = \frac{p - p_0}{D_p \tau_p}$$

$$L_p = (D_p \tau_p)^{\frac{1}{2}}$$

$$\frac{d^2 p'}{dx^2} = \frac{p'}{L_p^2}$$

$$p'(x) = k_1 \frac{-x}{L_p} + k_2 \frac{x}{L_p}$$

$$p'(x) = p'(0) e^{\frac{-x}{L_p}} = p(x) - p_0$$



Materiales Eléctricos

$$I_p(x) = \frac{AqD_p p'(0)}{L_p} e^{\frac{-x}{L_p}} = \frac{AqD_p}{L_p} [p(0) - p_o] e^{\frac{-x}{L_p}}$$

$$\frac{dn}{dx} = \frac{dp}{dx}$$

$$AqD_n \frac{dn}{dx} = AqD_n \frac{dp}{dx} = \frac{D_n}{D_p} I_p$$