Física de los Semiconductores

29 de mayo de 2017

Sitio web: www3.fi.mdp.edu.ar/fes/semic.html

Exceso de portadores

Generación y Recombinación de portadores

- Creación de portadores en exceso mediante absorción óptica
- Generación y Recombinación de portadores
  - Generación: Proceso de creación de electrones y huecos.
  - Recombinación: Proceso de aniquilación de electrones y huecos.

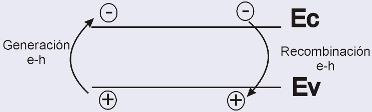
Desequilibrio de portadores

- Cualquier desviación del equilibrio térmico tiende a cambiar las concentraciones de electrones y huecos en un semiconductor.
- Una excitación externa, como la luz (flujo de fotones), también puede generar electrones Y huecos, creando una condición de no equilibrio.

Exceso de portadores

El semiconductor en equilibrio térmico

- En el equilibrio térmico, las concentraciones (n y p) que hemos calculado son independientes del tiempo. Sin embargo:
  - Continuamente electrones son excitados térmicamente desde la BV a la BC
  - Al mismo tiempo electrones de la BC "caen" a la BV.



- G_0 : velocidad de Generación térmica de portadores.$[\#/cm^3-s]$
- R_0 : velocidad de Recombinación térmica de portadores.$[\#/cm^3-s]$
- En equilibrio $G_0=R_0$. (Principio de Balance Detallado)

Exceso de portadores

Generación y recombinación de portadores en exceso

- Llamamos portadores en exceso a aquellos y electrones y huecos que se generan por alguna excitación externa, como por ejemplo fotones, con energía $E_f > E_{GAP}$ son absorbidos por el semiconductor.
- Sea R la velocidad de recombinación.

$$R = r \cdot n \cdot p = -dn/dt = -dp/dt,$$

  donde r es una constante que depende del material
- De la misma forma $R_0 = r \cdot n_0 \cdot p_0$ (n_0 y p_0 son las concentraciones en ausencia de iluminación)

Exceso de portadores

Concentración de portadores bajo iluminación

- Sean $\Delta n = n'$ y $\Delta p = p'$ las concentraciones generadas por iluminación,

$$n = n_0 + n',$$
$$p = p_0 + p'$$

En equilibrio, para cualquier semiconductor se cumple

$$np = n_i^2$$

Pero ¡OJO!!!, con iluminación

$$n \cdot p \approx (n_0 + n')(p_0 + p') > n_i^2$$

Exceso de portadores

Velocidad Generación

Cuando el semiconductor está bajo iluminación <u>constante</u>, los electrones son absorbidos a una velocidad constante; los fotones absorbidos GENERAN pares e-h. Por lo tanto la generación de pares e-h crece linealmente con el tiempo.

$$dn = dp = G \cdot dt$$

- Sea G la velocidad de generación

$$G = G_0 + g,$$

  donde:
  - G_0: Generación por efecto térmico
  - g: Generación por causas externas

Exceso de portadores

Velocidad de Recombinación neta

$$R - G = r(n)(p) - G_0 - g = -\frac{dn}{dt} = -\frac{dp}{dt}, \tag{1}$$

$$r(n_0 + n')(p_0 + p') - G_0 - g = -\frac{dn}{dt} = -\frac{dp}{dt} \tag{2}$$

¿Y en estado estacionario?

$$G = R$$

Veamos a continuación un ejemplo de como plantear la ecuación diferencial para resolver un caso particular. La ecuación diferencial a resolver dependerá si se trata de un material Intrínseco o Extrínseco.

Exceso de portadores

Ejemplo.: Calcular la concentración de portadores minoritarios $p(t)$ en un semiconductor tipo N, que, cuando se apagó la luz que lo iluminaba, tenía $\Delta p = p'_0$ portadores en exceso.

1. Planteo de la ec. diferencial correspondiente
   $r(n_0 + n')(p_0 + p') - G_0 = -\frac{dp}{dt}$
2. Dependiendo el tipo de material, podremos hacer algunas simplificaciones del lado izquierdo de la ecuación:

$$\underbrace{\cancel{r \cdot n_0 p_0} - \cancel{G_0}}_{a} + r \cdot n_0 p' + \underbrace{\cancel{r \cdot p_0 n'}}_{b} + \underbrace{\cancel{r \cdot n' p'}}_{c}$$

- a Equilibrio térmico
- b Material tipo N: $po \ll n_0$
- c Se cumple generalmente que: $n', p' \ll n_0$

Exceso de portadores

Sigue Ejemplo

3. La ecuación diferencial queda:

$$r \cdot p' n_0 = -\frac{dp}{dt} \tag{3}$$

4. Note que el lado izquierdo tiene como variable p', mientras que en el derecho tenemos p.
5. Pero $p = p_0 + p'$, por lo tanto

$$\frac{dp}{dt} = \frac{dp'}{dt}$$

6. La ecuación diferencial a resolver es la ecuación homogénea:

$$r \cdot p' n_0 = -\frac{dp'}{dt}$$

Exceso de portadores

Solución

La solución de la ecuación diferencial en p' es:

$$p'(t) = p'_0 \cdot e^{-t/\tau_h}$$

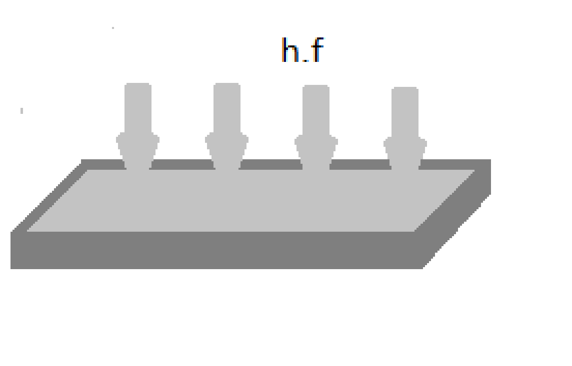
Y, por lo tanto

$$p(t) = p_0 + p'_0 \cdot e^{-t/\tau_h} \approxeq \frac{ni^2}{Nd} + p'_0 \cdot e^{-t/\tau_h},$$

donde τ_h es el tiempo de vida medio de los portadores minoritarios.

Exceso de portadores

Ejemplo: Plantee la ecuación que permite obtener la expresión de $n(t)$ en un material tipo P muy delgado, cuando se lo ilumina desde $t = 0$, de manera uniforme, como se ilustra en la siguiente figura



Exceso de portadores

Difusión de Portadores

- Cuando se crea un exceso de portadores de manera no-uniforme en un semiconductor, las concentraciones de huecos y electrones varían con la posición en la muestra.
- Este gradiente de n y p demanda un movimiento neto de portadores desde las regiones de mayor concentración a las regiones de menor concentración.
- El proceso de difusión es otro método importante de transporte de portadores junto con el proceso de arrastre por campo eléctrico.
- El flujo de partículas por difusión está dado por:

$$\vec{J} = -D\frac{dC(x)}{dx} \tag{4}$$

Exceso de portadores

Difusión

- En la (4):
  - El coeficiente de difusión D es una medida de la "facilidad" de movimiento de las partículas.

$$[D] = \frac{cm^2}{seg}$$

  - $C(x)$ es la concentración.

$$[C(x)] = 1/cm^2$$

- El signo $(-)$ de la expresión implica que el flujo de la corriente es hacia los lugares de menor concentración de partículas.

Exceso de portadores

Difusión y Relación de Einstein

- Si, por ejemplo, iluminamos una región de una muestra de semiconductor, se generarán pares e-h en la región iluminada
- El exceso de portadores disminuirá en la región iluminada:
  - Recombinación
  - Migración de portadores hacia regiones de menor concentración.

Corrientes de difusión

$$\vec{J}_e = eD_e\vec{\nabla}_n \tag{5}$$

$$\vec{J}_h = -eD_h\vec{\nabla}_p \tag{6}$$

Exceso de portadores

Corriente Total: $\vec{J_T} = \vec{J_e} + \vec{J_h}$

$$\vec{J_e} = e\mu_e n\vec{E} + eD_e\vec{\nabla}_n \tag{7}$$

$$\vec{J_h} = e\mu_h p\vec{E} - eD_h\vec{\nabla}_p \tag{8}$$

Exceso de portadores

Relación entre μ y D

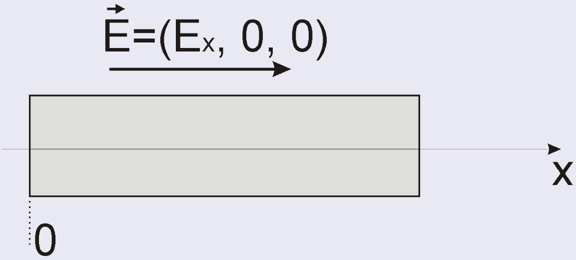


Figura: Campo eléctrico aplicado a una muestra de semiconductor

Si tomamos $V(x=0)=0$ la diferencia de potencial en función de x es:

$$V(x) = -\int_0^x \vec{E}\vec{dx} = -E_x \cdot x \tag{9}$$

Exceso de portadores

Relación entre μ y D

- Sea $E_c(0)$ la energía en el fondo de la banda de conducción en $x = 0$.
- Al aplicar $\vec{E}$

$$E_c(x) = E_c(0) - eV(x) = E_c(0) + eE_x x \tag{10}$$

Entonces:

$$n(x) = \underbrace{2(\frac{2\pi m_e kT}{h^2})^{3/2}}_{K} \cdot e^{(E_f - E(x))/kT} \tag{11}$$

- La concentración queda en función de $\vec{E}$

$$n(x) = K \cdot e^{(E_f - E_c(0) - eE_x x)/kT},$$

o bien

$$n(x) = n(0) \cdot e^{(-eE_x x)/kT} \tag{12}$$

Exceso de portadores

Relación entre μ y D

- Utilizando el mismo razonamiento para los huecos:

$$p(x) = p(0) \cdot e^{(eE_x x)/kT} \tag{13}$$

Relación entre μ y D

- Debido a que el material está aislado $\vec{J}_e = 0$ y $\vec{J}_h = 0$

$$\vec{J}_e = e\mu_e n E_x + eD_e \frac{\partial n}{\partial x}$$

$$n(x) = n(0) \cdot e^{-(\mu_e E_x x)/D_e} \tag{14}$$

- Comparando (12) con (14) se obtiene $D_e = \frac{\mu_e kT}{e}$

Exceso de portadores

Relación entre μ y D

- Haciendo el mismo razonamiento para los huecos

$$\vec{J}_h = e\mu_h p E_x - eD_h \frac{\partial p}{\partial x}$$

$$p(x) = p(0) \cdot e^{(\mu_h E_x x)/D_h} \tag{15}$$

- Comparando (13) con (15) se obtiene $D_h = \frac{\mu_h kT}{e}$

Relación de Einstein

- Es la relación entre la movilidad y el coeficiente de difusión en un semiconductor no degenerado (E_f en la región prohibida).

$$D_e = \frac{\mu_e kT}{e} \quad y \quad D_h = \frac{\mu_h kT}{e} \tag{16}$$

Exceso de portadores

Relaciones macroscópicas de conducción

En 3D

$$-\frac{\partial n}{\partial t} + \frac{1}{e}\vec{\nabla}\vec{J_e} = R - G_0 - g \tag{17}$$

$$-\frac{\partial p}{\partial t} - \frac{1}{e}\vec{\nabla}\vec{J_h} = R - G_0 - g \tag{18}$$

En 1D

$$-\frac{\partial n}{\partial t} + \frac{1}{e}\frac{\partial \vec{J_e}}{\partial x} = R - G_0 - g; \quad \vec{J_e} = e\mu_e n\vec{E} + eD_e\frac{\partial n}{\partial x} \tag{19}$$

$$-\frac{\partial p}{\partial t} - \frac{1}{e}\frac{\partial \vec{J_h}}{\partial x} = R - G_0 - g; \quad \vec{J_h} = e\mu_h p\vec{E} - eD_h\frac{\partial p}{\partial x} \tag{20}$$

Teorema de Gauss:

$$\nabla\vec{E} = \frac{e}{\epsilon}(p + N_d^+ - n - N_a^-) \tag{21}$$