

# Índice

---

<b><i>TEMA 3: Desequilibrio. Fenómenos de G-R</i></b>	<b><i>1</i></b>
3.1. INTRODUCCIÓN	1
3.2. AUSENCIA DE EQUILIBRIO. VELOCIDAD DE RECOMBINACIÓN.	3
3.3. RECOMBINACIÓN SUPERFICIAL	6
3.4. ANEXO	8



# Tema 3

## Desequilibrio

### Fenómenos de Generación y Recombinación

---

#### 3.1.- INTRODUCCIÓN

*La generación-recombinación es quizás el más importante de los tres tipos de respuesta de los portadores. Formalmente se puede definir:*

- **La generación**, como el proceso por el cual se crean pares  $e^-h^+$  (portadores).
- **La recombinación**, como el proceso por el cual los  $e^-$  y los  $h^+$  son destruidos o aniquilados.

*En términos de la teoría de bandas de energía, una generación supone la transición de un  $e^-$  desde la B.V. a la B.C. (para lo cual será necesario suministrar una*

energía  $\geq E_G$ ) y una recombinación la transición contraria (proceso por el cual se liberará una energía  $\geq E_G$ ).

Existen diferentes modos de suministrar al material la energía necesaria para los procesos de generación, y de liberar dicha energía en los procesos de recombinación. Por ejemplo, variando la temperatura se producen procesos de generación-recombinación térmica, si iluminamos se produce la fotogeneración, y también podemos bombardear al material con otras partículas. El número de generaciones por unidad de tiempo y de volumen,  $\mathbf{G}$ , depende del semiconductor y de la temperatura, mientras que el n° de recombinaciones por unidad de tiempo y de volumen,  $\mathbf{R}$ , dependen del semiconductor, de la temperatura y de la concentración de portadores existente (ya que  $R$  vendrá también dado por la probabilidad de encuentro de un  $e^-$  con un  $h^+$ ). Ante todo, hay que comprender que la generación y la recombinación térmica de portadores son procesos que nunca finalizan. En equilibrio térmico, el número de generaciones y recombinaciones es el mismo y, por lo tanto, la concentración media de portadores permanece constante, es decir,  $G_{th} = R_{th}$ .

Tanto la generación como la recombinación de portadores pueden producirse en el volumen del semiconductor y en las superficies; en este último caso se habla de generación y recombinación superficiales.

La generación-recombinación afecta directamente al flujo de corriente en los semiconductores, modificando las concentraciones de portadores implicados en los procesos de arrastre y difusión.

### **3.2. AUSENCIA DE EQUILIBRIO. VELOCIDAD DE RECOMBINACIÓN.**

En un semiconductor, el equilibrio se ha caracterizado por el cumplimiento en todo punto del mismo de la **“Ley de Acción de Masas”**. Es decir, si  $n_0$  y  $p_0$  representan las concentraciones de electrones y huecos en situación de equilibrio, resulta que

$$n_0 \cdot p_0 = n_i^2$$

y, por lo tanto, fuera del equilibrio cuando sobre el semiconductor ha actuado una causa externa

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

siendo  $n$  y  $p$  las nuevas concentraciones de  $e^-$  y  $h^+$ .

Más concretamente, si

$n \cdot p > n_i^2 \Rightarrow$  la causa externa ha provocado una **“inyección de portadores”**.

$n_0 \cdot p_0 < n_i^2 \Rightarrow$  la causa externa ha **“extraído portadores”**.

Una vez que la causa externa cesa, nos encontramos ante una situación dinámica en la cual sólo existirá la reacción interna del material que lo haga retornar a la situación de equilibrio. En el primer caso, mediante la recombinación térmica del exceso de portadores; y en el segundo caso, mediante la generación térmica de portadores para suplir el defecto de los mismos. En otras palabras, la G-R térmica es el mecanismo natural para estabilizar la concentración de portadores dentro del material y restablecer de nuevo la situación de equilibrio.

Para caracterizar matemáticamente los procesos de G-R, en lugar de trabajar con las concentraciones totales de  $e^-$  y de  $h^+$  se suele trabajar con los excesos definidos como,

$$\begin{aligned}n' &\equiv n - n_0 \\p' &\equiv p - p_0\end{aligned}\tag{3.1}$$

Es decir,  $n'$  y  $p'$  representan los excesos de  $e^-$  y de  $h^+$  sobre sus concentraciones de equilibrio. Indudablemente, si  $n'$  y  $p' < 0$  corresponden a un defecto de portadores debido a la causa externa.

En la mayoría de los casos de interés, el exceso de minoritarios es mucho menor que la concentración de mayoritarios en equilibrio, y diremos entonces que nos encontramos en **Baja Inyección (B.I.)**. En caso contrario, se trata de condiciones de **Alta Inyección (A.I.)**.

Esto es, en B.I. ( $m' \ll M_0$ ):

$$\begin{aligned}\text{Tipo p} &\begin{cases} p = p' + p_0 \cong p_0 \\ n = n' + n_0 \cong n' \end{cases} \\ \text{Tipo n} &\begin{cases} n = n' + n_0 \cong n_0 \\ p = p' + p_0 \cong p' \end{cases}\end{aligned}\tag{3.2}$$

Es decir, en bajo nivel de inyección, la concentración de mayoritarios queda prácticamente invariante, mientras que, la de minoritarios, aún siendo mucho menor que la de mayoritarios, puede incrementarse en varios órdenes de magnitud. Esto hace que para estudiar la situación de B.I. sigamos la pista a los portadores minoritarios, cuya variación relativa es mayor.

En ausencia de equilibrio,  $R \neq R_{th}$ , esto es, la causa externa ha roto la compensación existente entre la generación y la recombinación térmica. El retorno al equilibrio se modela a través de la “**Velocidad Neta de Recombinación**” o simplemente “**Velocidad de Recombinación**”,  $U$ , definida como

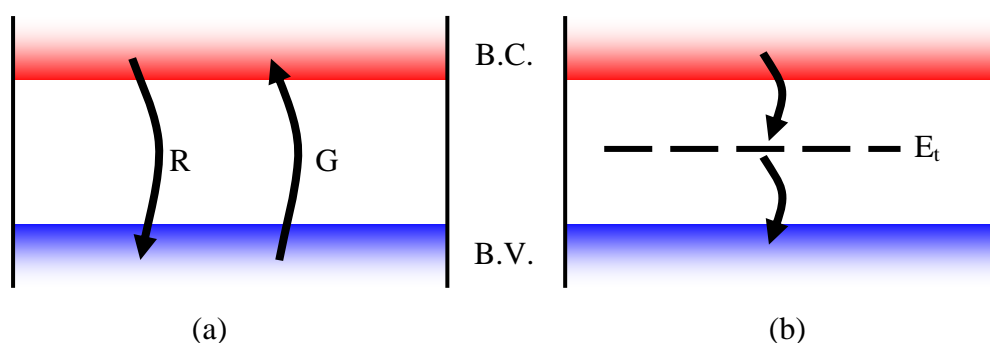
$$U = R - R_{th}\tag{3.3}$$

Si  $U > 0 \Leftrightarrow R > R_{th} \Rightarrow$  la causa externa ha provocado una inyección de portadores y el sistema reacciona aumentando la recombinación térmica sobre la que existía en equilibrio.

Si  $U < 0 \Leftrightarrow R < R_{th} \Rightarrow$  la causa externa ha provocado un defecto de portadores y el sistema reacciona *aumentando la generación térmica* sobre la que existía en equilibrio.

Ya se ha comentado que existen diferentes mecanismos físicos a través de los cuales pueden tener lugar los procesos de generación-recombinación.

En los procesos banda a banda, las transiciones electrónicas tienen lugar directamente entre estados de la B.V. y estados en la B.C. (fig. 1a). Sin embargo, los procesos habituales en los semiconductores son los denominados “procesos indirectos” o “procesos a través de centros intermedios” (fig. 1b). Desde el punto de vista físico, estos centros intermedios o centros de G-R son átomos especiales de impureza (tales como el oro, hierro y cobre para el Si), o defectos en la red cristalina (falta de un átomo) cuya propiedad más importante es la de introducir niveles energéticos permitidos en las proximidades de la mitad de la banda prohibida del semiconductor favoreciendo, de esta forma, las transiciones electrónicas tanto con la B.C. como con la B.V.



**Figura 3.1.-** Mecanismos de recombinación; (a) Generación-Recombinación banda a banda; (b) Recombinación a través de niveles intermedios

### 3.3. RECOMBINACIÓN SUPERFICIAL

La recombinación superficial puede entenderse como una recombinación a través de los innumerables niveles intermedios a que da lugar la existencia de la superficie. Esto es, puede considerarse como un caso particular de la recombinación en volumen con gran densidad de centros de recombinación distribuidos en una región muy estrecha en las proximidades de la superficie, de ahí que sea inmediato traducir la expresión de la velocidad de recombinación, ecuación (3.3), a

nº de recombinaciones/tiempo·superficie

sin más que multiplicar dicha ecuación por el espesor,  $x_s$  sumamente estrecho de dicha superficie. Esto es, en condiciones de B.I.,

$$U_s = U \cdot x_s = \frac{m'}{\tau_m} \cdot x_s = S_m \cdot m' \quad (3.4)$$

siendo:

$S_m \equiv$  velocidad de recombinación superficial en el sentido cinemático. Ecuación de dimensiones:  $[L \cdot T^{-1}]$ . Unidades utilizadas:  $cm/s$ .

$U_s \equiv$  velocidad de recombinación superficial (en el sentido de rapidez con que el sistema reacciona para retornar de nuevo a la situación de equilibrio). Significado  $\equiv$  pares  $e^-h^+$  que se recombinan por unidad de tiempo y de superficie.

La condición de contorno que impone una superficie caracterizada por una velocidad de recombinación superficial  $S$  es que, en régimen estacionario, el flujo de portadores minoritarios hacia la superficie es igual al número de portadores que se recombina en ella.

$$F_{\rightarrow s} = U_s = S_m \cdot m' \quad (3.5)$$



### 3.4. ANEXO

- a) La generación banda a banda puede producirse también por efectos relacionados con campos eléctricos muy intensos; bien porque dicho campo eléctrico es lo suficientemente elevado como para romper por sí mismo los enlaces covalentes creando pares  $e^-h^+$  (efecto cuántico conocido como **“Efecto Túnel”**); o bien porque un portador adquiere del  $\bar{\epsilon}$  la energía suficiente para que al liberarlo por choque con la red cristalina sea capaz de romper enlaces covalentes (**“multiplicación por Avalancha”**). Este último proceso es impar puesto que involucra a tres portadores (**Recombinación Auger**) y es importante en situaciones de alto dopaje y/o de Alta inyección.
- b) En lo que se refiere a los límites máximos de generación y recombinación, resulta que la generación no tiene límite ya que las concentraciones pueden ser, teóricamente, todo lo grandes que se quiera. En cuanto a la recombinación, la máxima desviación respecto del equilibrio corresponde al caso de que uno de los portadores sea cero y, por tanto,  $n \cdot p = 0 \Leftrightarrow n \cdot p - n_i^2 = -n_i^2$
- c) En el tema, se ha introducido la expresión reducida de  $U$  para el caso de B.I. Un paso anterior sería:

$$U = R - R_{th} = \propto (n \cdot p - n_0 \cdot p_0) = \propto (n \cdot p - n_i^2)$$

ya que,

$$R \propto n \cdot p \text{ y } R_{th} = \propto n_0 \cdot p_0$$

$\propto$  = constante de proporcionalidad

