

Electrónica Física

Daniel Vázquez Lago

Índice general

1. Física de semiconductores	5
1.1. Ejercicios	5
2. Fenómenos de transporte en semiconductores	9
2.1. Procesos de generación y recombinación	9
2.1.1. Introducción	9
2.1.2. Consideraciones acerca los procesos RG	10
2.2. Recombinación directa en semiconductores de gap directo	11
2.3. Recombinación indirecta en semiconductores de gap indirecto: procesos RG.	11
2.3.1. Definición de términos	11
2.3.2. Obtención de las tasas de producción	12
2.4. Simplificaciones	12
3. La unión PN	13
4. El transistor bipolar de unión	15
5. El transistor MOSFET	17
6. Soluciones	19

Capítulo 1

Física de semiconductores

1.1. Ejercicios

Ejercicio 1.1:

Se dopa silicio con boro en una proporción de 2 ppm (partes por millón)

- Calcula la concentración intrínseca del Si y obtén una expresión de dicha concentración en función de la temperatura.
- Indica el tipo de conducción de este material y calcula la concentración de impurezas y la de electrones y huecos (n y p) a temperatura ambiente si todos los dopantes están ionizados.
- Calcula la posición del nivel de Fermi y dibuja el diagrama de bandas completo correspondiente.
- ¿Qué pasa si la concentración de impurezas igualase el valor de N_V ? Representa gráficamente las bandas de energía frente a la concentración de impurezas usando todas las aproximaciones que conozcas.

(DATO: Constante de red del Si $a_0 = 5.431 \text{ \AA}$).

Solución en la página ??

- La concentración intrínseca del Silicio en un semiconductor es el número de portadores n_i en el semiconductor, si no estuviera dopado. No hay que confundir la concentración intrínseca n_i con la concentración n , en la que si se tendrá en cuenta que el material está dopado. La concentración intrínseca es:

$$n_i = \sqrt{N_c N_v} e^{-E_G/2kT} \quad (1.1.10)$$

donde $E_G = E_c - E - v$, y además

$$N_{C,V} = 2 \left(\frac{m_{e,p}^* k T}{2\pi\hbar^2} \right)^{-3/2} \quad (1.1.11)$$

- b) Están dopando con boro, que es del grupo III, y por tanto es un dador. Esto significa que será un conductor tipo p . Para calcular la concentración de impurezas, primero tenemos que obtener la densidad de Boro en nuestro silicio. La densidad del silicio se calculará a partir de la constante de red y sabiendo que posee una red diamante. Así pues:

$$N_{Si} = \frac{8}{a} = \quad (1.1.12)$$

de lo que se puede deducir entonces que:

$$N_B = 2 \cdot 10^{-6} \cdot N_{Si} \quad (1.1.13)$$

Nos dicen que todos los dopantes están ionizados, es decir, que estamos en el régimen extrínseco. En este régimen todos los átomos de Boro son impurezas, tal que $N_A^- = N_A = N_B$. Suponiendo que $N_A^- \gg N_D^+$, tenemos que la ecuación de neutralidad de carga:

$$n \cdot p = n_i^2 \quad p - n - N_A = 0 \quad (1.1.14)$$

usando estas ecuaciones para despejar el valor de n y p , tenemos que:

$$p = \frac{N_A}{2} + \left[\left(\frac{N_A}{2} \right)^2 + n_i^2 \right]^{1/2} \quad (1.1.15)$$

y luego calculamos

$$n = \frac{n_i^2}{p} \quad (1.1.16)$$

- c) La posición del nivel de Fermi de un semiconductor dopado se calcula a partir del nivel de Fermi intrínseco. Así pues

$$E_{Fi} = E_i = \frac{E_c + E_v}{2} + \frac{3kT}{4} \ln \frac{m_p^*}{m_e^*} \quad (1.1.17)$$

tal que la energía de Fermi Es

$$E_F = E_i + kT \ln \left(\frac{p}{n_i} \right) \quad (1.1.18)$$

- d) Cuando la concentración de impurezas es igual al valor de N_V , dado que $p = N_V e^{(E_v - E_F)/kT}$, esto implicaría que $E_v = E_F$, y que por tanto la condición de *semiconductor no degenerado* $E_F > E_v + 3kT$ no se cumpliría. Consecuentemente, estamos ante un semiconductor degenerado.

Ejercicio 1.2:

Una muestra de Si está dopada con 6×10^{15} átomos de As por cm^3

- a) ¿Cuál es la concentración de portadores en la muestra de Si a 300 K?

- b) ¿Cuál es la concentración de portadores a 470 K?
- c) Para cada una de las dos temperaturas anteriores determinar la posición de E_i , calcular $E_F - E_i$ y dibujar a escala el diagrama de bandas de energía para la muestra.
- d) Si dopamos el Si con 10^{16} átomos donadores y 5×10^{15} átomos aceptores por cm^3 . ¿Cuál es la concentración de portadores a 300 K?+
- e) Partimos de una muestra de Si puro y lo dopamos exclusivamente con 10^{14} átomos donadores y 10^{14} átomos aceptores por cm^3 . Calcula la concentración de portadores y explica el resultado obtenido.

Tener en cuenta que $E_G = 1.08 \text{ eV}$ a 470 K y suponer que $m_e^*/m_h^* = 0.69$ es independiente de la temperatura.

Solución en la página ??

Ejercicio 1.3:

Cuestiones sobre el nivel de Fermi:

- Calcular la temperatura T para que el nivel de Fermi de un cristal de Silicio tipo N con $N_D = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ quedara a una energía $E_G/3$ por debajo de la banda de conducción. Suponer que N_C y E_G son constantes con la temperatura e iguales a sus valores a temperatura ambiente. Y repetir para el caso de dopar con $N_D = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$.
- En un semiconductor determinado, la probabilidad de que los electrones ocupen un estado de energía kT , por encima del extremo inferior de la banda de conducción es e^{-10} . Determinar la posición del nivel de Fermi en dicho material.
- ¿Cuál es la probabilidad de que un estado de energía kT por debajo del nivel de Fermi esté ocupado por un hueco?

Solución en la página ??

Ejercicio 1.4:

Cuestiones sobre la resistividad y movilidad:

- La resistividad de un material tipo N es por lo regular más pequeña que la resistividad de un material tipo P de dopado comparable, explica por qué suele ocurrir esto. Calcula la resistividad del Si si se dopa con fósforo con una concentración de 10^{17} cm^{-3} . Repite el cálculo para el caso en que dopemos con aluminio con la misma concentración y calcular la corriente de arrastre en ambos casos considerando un campo eléctrico de 10^5 V/cm .
- Calcula la densidad de impurezas necesarias para tener un cristal de Si tipo P con resistividad $0.1 \Omega\cdot\text{cm}$. ¿Qué proporción hay de átomos de impureza sobre

el número de átomos de Si? (DATO: Constante de red del Si $a_0 = 5.431 \text{ \AA}$). Si suponemos que el semiconductor es no degenerado, ¿cuánto vale D_p ?

Solución en la página ??

Capítulo 2

Fenómenos de transporte en semiconductores

2.1. Procesos de generación y recombinación

Cuando un semiconductor es perturbado de su estado de equilibrio, el semiconductor responde modificando el número de portadores que hay en el mismo. La recombinación-generación (denotada por RG o R-G) es el mecanismo con el que describimos el proceso por el cual un exceso o deficiencia de portadores se estabiliza (si la perturbación se mantiene en el tiempo) o es eliminada (si la perturbación es temporal). Dado que durante la perturbación el sistema está bajo condiciones de no equilibrio, muchas de los fenómenos que aparecen en el semiconductor no puedan ser descritos a través de los procesos RG.

2.1.1. Introducción

En un semiconductor definimos como **recombinación** al proceso por el cual electrones y huecos son aniquilados/destruidos, mientras que la **generación** es el proceso por el cual electrones y huecos son creados. Esta descripción así hecha es muy general, y por tanto varios tipos de procesos podrían incluirse en lo que llamamos RG. Generalmente se usan las gráficas de banda energética para describir visualmente cuales son los posibles procesos RG, aunque sea solo para entender su naturaleza. También se suele describir que papel tiene la energía y que tipo de energía se emite/absorbe en estos procesos.

Procesos de recombinación

Existen varios tipos de procesos de recombinación:

- **Recombinación directa.** Es el tipo más simple de recombinación. En este hay una aniquilación directa entre un hueco en la banda de valencia y un electrón en la banda de conducción, en el que el electrón «cae» a la banda de valencia. Es un proceso típicamente radiativo, en el que el exceso de energía se convierte en un fotón de luz.
- **Recombinación de centro RG.** Recordemos que las impurezas generan niveles energéticos en la región del gap de energía. Los defectos cristalinos, particularmente las impurezas atómicas, pueden generar niveles energéticos en medio del gap. En

este proceso de recombinación, los llamados centros RG con energía E_T actúan como intermediarios. Existen varios tipos de recombinaciones de centro RG. En la primera de ellas tanto el electrón en la BC y el hueco en la BV se ven atraídos al mismo centro RG, aníquilándose. Otra posibilidad es que un portador salte a la banda contrario usando el centro RG como mediador. A este proceso se le llama *recombinación termal*, ya que no es un proceso radiativo (no emite fotones), emitiendo calor, o, en su defecto, fonones. También existen recombinaciones de centro RG usando como centros RG los niveles energéticos de los dadores y aceptores (que recordemos están muy cerca de los niveles energéticos de las bandas), aunque no son tan comunes. Estos procesos son radiativos, pero poco probables, y se denominan *recombinación a través de niveles profundos*.

- **Recombinación Auger** En el proceso Auger lo que ocurre es que una recombinación directa/de centro RG ocurre simultáneamente con la colisión de dos portadores. Consecuentemente, estos portadores altamente energéticos se «termalizan» (pierden energía en pasos pequeños mediante pequeñas colisiones con la red cristalina). La dispersión posterior del electrón que se lleva toda la energía sucede a través de diferentes pasos, como una «escalera», lo cual sucede porque la relajación del portador energético no es un proceso instantáneo, sino que sucede en varias etapas debido a la dispersión con fonones. Los fonones (vibraciones cuánticas de la red cristalina) tienen energías discretas, lo que significa que el portador pierde energía en múltiplos de estas energías fonónicas. En semiconductores típicos, los fonones ópticos tienen energías del orden de decenas de meV, por lo que un electrón altamente excitado no puede perder toda su energía de golpe, sino que la va cediendo en "saltos" discretos al emitir fonones ópticos uno tras otro
- **Recombinación superficial:**

Procesos de generación

Existen varios tipos de generación, uno por cada uno de los procesos de recombinación. Así pues, existe generación directa, la cual necesita energía térmica o electromagnética (a través de fotones); generación por centros RG (energía térmica), y en último lugar la generación a través de impactos ionizantes (proceso inverso a la recombinación Auger). En estos últimos, el par de portadores se genera como consecuencia del impacto de un portador con un átomo cristalino. La generación de portadores a través de impacto ionizante ocurre recurrentemente cuando hay regiones con un campo eléctrico \mathcal{E} muy alto, y es el responsable de los fenómenos de avalancha de las uniones pn .

2.1.2. Consideraciones acerca los procesos RG

Los procesos de recombinación y generación ocurren permanentemente, incluso en el equilibrio termodinámico, siendo el principal problema de los procesos RG el cálculo del ratio de producción de los diferentes procesos. Típicamente, uno solo necesita centrarse en el proceso principal (el que mayor ratio de producción tiene). En los semiconductores dopados no degenerados a una temperatura ambiente, uno espera que los procesos dominantes sean procesos directos o de centro RG.

Conociendo la forma de las bandas de energía (más concretamente, cual es el valor de k para el cual la energía de la banda de conducción es mínima) podremos dilucidar cual de los

procesos es dominante: o de tipo directo o de centro RG. ¿Cómo? Pues es bien sencillo: los fotones, al ser partículas sin masa, son capaces de llevar muy poco momento, y por tanto las transiciones son casi verticales, es decir, solo son capaces de describir los semiconductores de tipo directo (mínimo BC y máximo de BV en $k = 0$). Por otro lado, los fonones pueden transmitir momentos y energía mucho más grandes, por lo que son capaces de describir tanto los procesos en los semiconductores directos e indirectos, aunque en el caso de los directos no es un proceso dominante. Los procesos térmicos están relacionados con la recombinación de centro RG y los procesos fotónicos con la recombinación directa, y por tanto podemos diferenciar cuando uno y otro son dominantes.

2.2. Recombinación directa en semiconductores de gap directo

Definimos como G (R) el número de pares electrones (huecos) generados /cm³s. Estas tasas de recombinación y generación dependen en general del número de huecos y electrones que haya en el medio, por lo que en general:

$$R = \beta np \quad G = \alpha np \quad (2.2.1)$$

Para un conductor en equilibrio termodinámico $G_{th} = R_{th}$ (siendo estas las tasas de generación/combinación en el equilibrio), manteniéndose n y p constantes. En el equilibrio $R = G = \beta n_{n0} p_{n0}$. Ahora bien, cuando iluminamos uno de estos semiconductores aumenta su generación en un término G_L , tal que ahora $G = G_L + G_{th}$. Consecuentemente tenemos que se incrementa en un número determinado el número de portadores en el semiconductor Δn y Δp ($\Delta n = \Delta p$, neutralidad de carga). Así pues tenemos que la tasa:

$$\frac{dp_n}{dt} = G - R = G_L + G_{th} - R \quad R = \beta n_n p_n = \beta(n_{n0} + \Delta n)(p_{n0} + \Delta p) \quad (2.2.2)$$

Una vez llegamos al estado estacionario, podemos obtener entonces lo que llamamos el *ratio de recombinación* $U = R - G_{th}$, esto es:

$$U = R - G_{th} = \beta(n_{n0} + p_{n0} + \Delta p)\Delta p \quad (2.2.3)$$

Cuando tenemos $p_{n0} \ll n_{n0}$ (bajo nivel de inyección tipo N), tenemos que:

$$U = \beta n_{n0} \Delta p = \frac{p_n - p_{n0}}{\frac{1}{\beta n_{n0}}} = \frac{p_n - p_{n0}}{\tau_p} \quad (2.2.4)$$

2.3. Recombinación indirecta en semiconductores de gap indirecto: procesos RG.

2.3.1. Definición de términos

La estadística RG es el nombre que se le da a la caracterización matemática de los procesos de recombinación y generación. Dado que los procesos RG cambian las concentraciones de los portadores con el tiempo, la «caracterización matemática» de estos procesos no es más que la definición de las relaciones entre $\partial n/\partial t$ y $\partial p/\partial t$. Recordemos que los procesos RG lo que hacen es insertar una banda energética E_T en la posición central del gap de bandas. Así pues definimos:

- Variación de n debida a procesos RG: $\frac{\partial n}{\partial t} \Big|_{RG}$.
- Variación de p debida a procesos RG: $\frac{\partial p}{\partial t} \Big|_{RG}$.
- Número de centros RG llenos de electrones por cm^3 : n_T .
- Número de centros RG llenos de huecos por cm^3 p_T
- Número total de centros RG por cm^3 : N_T

Es importante que quede muy claro que $\partial n/\partial t|_{RG}$ y $\partial p/\partial t|_{RG}$ son tasas netas, teniendo en cuenta tanto los procesos de recombinación como los procesos de generación. Cuando $\partial n/\partial t|_{RG}$ es negativo, la tasa de neta de electrones es negativa $R > G$; y si es positiva, la tasa de electrones es positiva $G > R$. La desigualdad de $|_{RG}$ no denota otra cosa que «tasa de cambio producida por los procesos RG». Esto es importante, ya que pueden ocurrir otros procesos además de estos.

2.3.2. Obtención de las tasas de producción

Existiendo 4 tipos de transiciones RG, que son:

- **Captura de un electrón en un centro RG.** Se define c_n como el *coeficiente de captura de electrones* (cm^3/s) con signo positivo.
- **Emisión de un electrón por un centro RG.** Se define e_n como el *coeficiente de emisión de electrones* (cm^3/s) con signo positivo.
- **Captura de un hueco en un centro de RG** (o un electrón de un RG cae a BV). Se define c_p como el *coeficiente de captura de huecos* (cm^3/s) con signo positivo.
- **Emisión de un hueco por un centro de RG** (o un electrón de BV cae a RG). Se define e_p como el *coeficiente de emisión de electrones* (cm^3/s) con signo positivo.

Una vez entendemos esto, es claro que las ecuaciones que rigen los procesos RG son (no pueden ser de otra forma)

$$r_N = \frac{\partial n}{\partial t} \Big|_{RG} = e_n n_T - c_n n p_T \quad r_P = \frac{\partial p}{\partial t} \Big|_{RG} = e_p p_T - c_p p n_T \quad (2.3.1)$$

2.4. Simplificaciones

Existen varias simplificaciones. La más típica de todas es aquella en la que se aplica el **principio de balance detallado**. Este nos dice que bajo condiciones de equilibrio cada proceso fundamental y su inverso se autobalancean independientemente de cualquier otro proceso que pueda ocurrir en el interior del semiconductor. Así pues, en el equilibrio se cumple que $r_N = r_P = 0$. En este caso podemos deducir las expresiones

Capítulo 3

La unión PN

Capítulo 4

El transistor bipolar de unión

Capítulo 5

El transistor MOSFET

Capítulo 6

Soluciones