

Resumen Semiconductores

Profesores: Patricio Mendonza y Pablo Martín

Auxiliares: Bastián Matteo, Lukas Gleisner

Ayudantes: Manuel Aceituno, Joaquín Ormazábal, Tomás Ruiz, Diego Sanz

1. Resumen

1.1. Clasificación de materiales según conductividad eléctrica

Conductores: Los conductores (principalmente metales) son materiales que permiten fácilmente el paso de la corriente eléctrica. Tienen una alta conductividad eléctrica, son moldeables y poseen una baja resistencia térmica. Los conductores son empleados principalmente en la fabricación de todo tipo de cables eléctricos. Ejemplos de conductores: Cobre (Cu), Plata (Ag).

Aislantes: Al contrario de los conductores, los aislantes (principalmente no metales) son materiales que se oponen al paso de la corriente eléctrica. Poseen una alta rigidez, una baja conductividad eléctrica y elevada resistencia térmica. Los aislantes son utilizados como protección en los circuitos eléctricos. Ejemplos: Vidrio, Plástico.

Semiconductores: Los semiconductores (Incluye metaloides y algunos metales) son materiales cuya conductividad eléctrica está entre la de los conductores y los aislantes. Su conductividad puede ser controlada mediante el dopaje o la variación de temperatura. Una de las principales características de los semiconductores es su capacidad para controlar el flujo de corriente, permitiendo que la corriente eléctrica fluya más fácilmente en una dirección que en la otra. Ejemplos: Silicio, Germanio.

1.2. Semiconductores Intrínsecos y Extrínsecos

Semiconductor Intrínseco: En un semiconductor intrínseco puro, la concentración de electrones (n) en la banda de conducción es igual a la concentración de huecos (p) en la banda de valencia. En cuanto a las concentraciones se cumple que $n = p = n_i$, donde n_i es la concentración de intrínseca del material.

Semiconductor Extrínseco: El semiconductor extrínseco resulta del dopaje de un semiconductor intrínseco con impurezas (elementos Grupo IV). Si se realiza el dopaje con átomos donantes (elementos grupo V), se obtiene un **semiconductor tipo n**; si se dopa con átomos aceptores (elementos grupo III), se obtiene un **semiconductor tipo p**. Con

ello, al plantear un problema, se debe distinguir entre semiconductor extrínseco tipo n y semiconductor extrínseco tipo p.

									VIIIA
									2 He 4.003
			IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA		
			5 B 10.811	6 C 12.011	7 N 14.007	8 O 15.999	9 F 18.998	10 Ne 20.183	
			13 Al 26.982	14 Si 28.086	15 P 30.974	16 S 32.064	17 Cl 35.453	18 Ar 39.948	
IB	IIB								
29 Cu 63.54	30 Zn 65.37	31 Ga 69.72	32 Ge 72.59	33 As 74.922	34 Se 78.96	35 Br 79.909	36 Kr 83.80		
47 Ag 107.870	48 Cd 112.40	49 In 114.82	50 Sn 118.69	51 Sb 121.75	52 Te 127.60	53 I 126.904	54 Xe 131.30		
79 Au 196.967	80 Hg 200.59	81 Tl 204.37	82 Pb 207.19	83 Bi 208.980	84 Po (210)	85 At (210)	86 Rn (222)		

Figura 1: Elementos semiconductores

En la figura 1, se muestra una sección de la tabla periódica que destaca los elementos de los grupos III, IV y V, que son cruciales en la fabricación de semiconductores. Los elementos del grupo IV poseen cuatro electrones de valencia, lo que les permite formar estructuras cristalinas estables con enlaces covalentes.

Cuando estos materiales se dopan con elementos del grupo III (Los que tienen 3 electrones de valencia), se introduce una deficiencia de electrones en la red cristalina, lo que resulta en la aparición de huecos. Estos huecos actúan como portadores de carga positiva, ya que los átomos adyacentes intentan completar la regla del octeto, transfiriendo el hueco de un átomo a otro y generando así una corriente de huecos.

Por otro lado, cuando un material del grupo IV se dopa con elementos del grupo V (Los que tienen 5 electrones de valencia) se introduce un electrón adicional en la red cristalina. Este electrón extra no es necesario para formar enlaces covalentes y, por lo tanto, queda libre para moverse por el material, convirtiéndose en un portador de carga negativa. Dado que los átomos adyacentes quieren completar la regla del octeto, se transfieren el electrón sobrante de un átomo a otro, lo que genera la corriente de electrones.

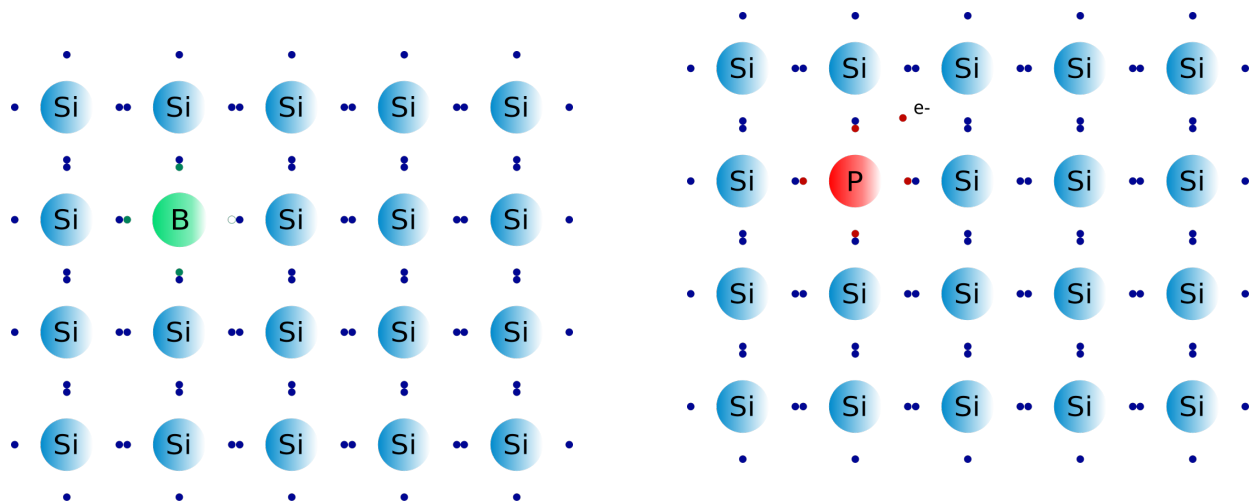


Figura 2: Dopaje tipo P (izquierda) y dopaje tipo N (derecha)

1.3. Ecuaciones Fundamentales Semiconductores

Ley de acción de masas: La ecuación (1) es válida tanto para semiconductores intrínsecos y extrínsecos.

$$n_i^2 = n \cdot p \quad (1)$$

Neutralidad de Carga del Semiconductor: La ecuación (2) indica que la suma de cargas positivas debe ser igual a la suma de las cargas negativas en el semiconductor.

$$n + N_A^- = p + N_D^+ \quad (2)$$

Donde se tiene que:

n : Concentración de electrones libres en la banda de conducción (carga negativa).

p : Concentración de huecos en la banda de valencia (carga positiva).

N_A^- : Concentración de aceptores (dopaje tipo p), que han aceptado electrones y, por lo tanto, están cargados negativamente.

N_D^+ : Concentración de donadores ionizados (dopaje tipo n), que han donado electrones y, por lo tanto, están cargados positivamente.

Ionización Completa en Semiconductores La ionización completa en semiconductores se refiere a la condición en la que todos los átomos dopantes han sido ionizados, es decir, todos los aceptores han aceptado electrones y todos los donadores han donado electrones. Esto significa que la concentración de portadores de carga generada por los dopantes es máxima.

En consecuencia es válido suponer que $N_D^+ = N_D$ y $N_A^- = N_A$, donde N_D es la concentra-

ción total de átomos dopantes donadores (tipo n) y N_A es la concentración total de átomos dopantes aceptores (tipo p).

Debido a la ionización de conductores, es posible realizar aproximaciones en el análisis de semiconductores mediante la ecuación de neutralidad de carga (2):

1. En **semiconductores extrínsecos tipo n**, la concentración de electrones (n) es aproximadamente igual a la concentración de donores (N_D), es decir, $n \approx N_D$.
2. En **semiconductores extrínsecos tipo p**, la concentración de huecos (p) es aproximadamente igual a la concentración de aceptores (N_A), es decir, $p \approx N_A$.

1.4. Junturas p-n y Polarización

Juntura p-n: Al unir un semiconductor extrínseco tipo p (alta concentración de huecos) con uno extrínseco tipo n (alta concentración de electrones), se forma una región de agotamiento en la juntura donde los portadores de carga se neutralizan. Esto genera una barrera de potencial (V_0) que impide el flujo libre de corriente.

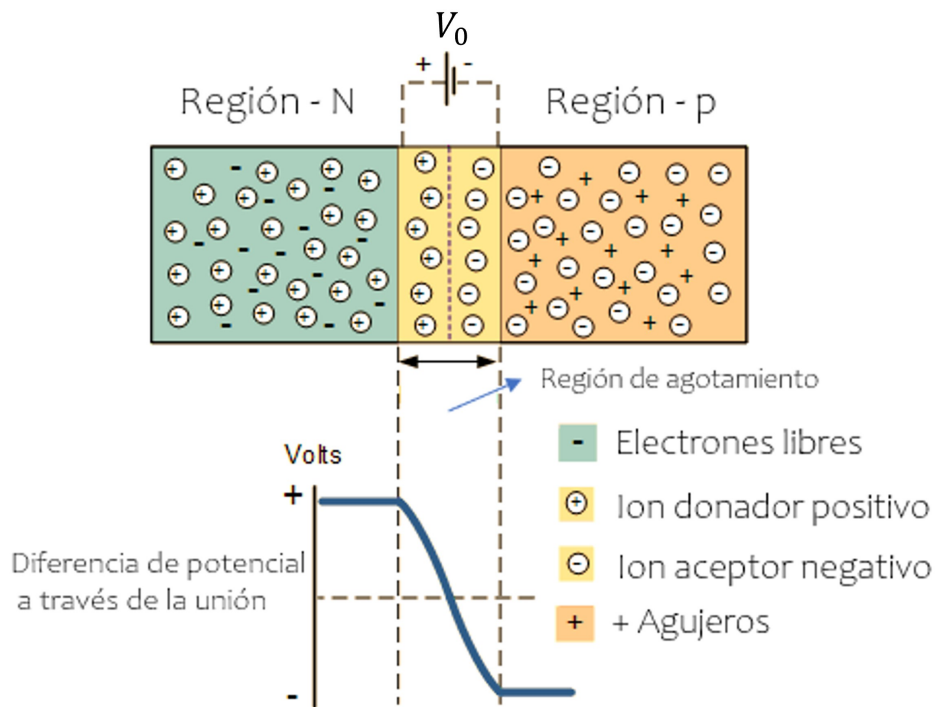


Figura 3: Juntura n-p

Polarización directa: Cuando se aplica una tensión externa que reduce la barrera de potencial (con el terminal positivo en el lado p y el negativo en el lado n), los portadores mayoritarios se mueven hacia la juntura, permitiendo el flujo de corriente a través de ella.

Polarización inversa: Al aplicar una tensión que aumenta la barrera de potencial (con el terminal negativo en el lado p y el positivo en el lado n), la zona de agotamiento se ensancha,

impidiendo el flujo de corriente, excepto por una pequeña corriente de saturación debida a los portadores minoritarios.

1.5. Ecuaciones fundamentales Junturas (Sin polarización)

Las ecuaciones (1) y (2) son válidas para las junturas, pero hay que hacer una distinción con subíndices para la región p y la región n. De manera que al resolver un problema es necesario determinar las concentraciones n_n y p_n para el caso de un semiconductor extrínseco tipo n (3), y para el caso del tipo p (4) se deben determinar las concentraciones n_p y p_p . Explícitamente:

$$n_n + N_{An}^- = p_n + N_{Dn}^+ \quad (3)$$

$$n_p + N_{Ap}^- = p_p + N_{Dp}^+ \quad (4)$$

La ecuación de ley de acción de masa también debe separarse por cada región.

Voltaje Térmico V_T :

$$V_T = \frac{kT}{q} \quad (5)$$

Donde:

$K = 1.380649 \cdot 10^{-23} J/K$: La constante de Boltzmann.

$q = 1.60217 \cdot 10^{-19} C$: Magnitud de carga fundamental del electrón.

T : Temperatura (medida en K).

A $T = 300K$, se cumple que $V_T \approx 25 [mV]$

Voltaje Inhibición V_0 :

$$V_0 = V_T \ln\left(\frac{n_n}{n_p}\right) = V_T \ln\left(\frac{p_p}{p_n}\right) \quad (6)$$

Realizando un desarrollo algebraico de (6) se obtienen las siguientes expresiones que relacionan las concentraciones en la juntura cuando no hay polarización:

$$p_n = p_p \cdot e^{\frac{-V_0}{V_T}} \quad (7)$$

$$n_p = n_n \cdot e^{\frac{-V_0}{V_T}} \quad (8)$$

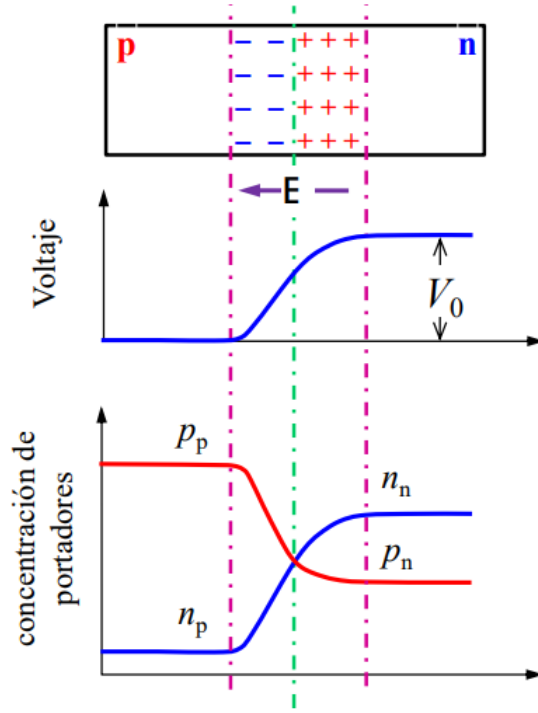


Figura 4: región de agotamiento juntura y concentraciones

1.6. Junturas con polarización

Concentraciones de equilibrio con un voltaje de polarización V

$$P_{n0} = p_n \cdot e^{\frac{V}{V_T}} \quad (9)$$

$$N_{p0} = N_p \cdot e^{\frac{V}{V_T}} \quad (10)$$

Donde se tiene que P_{n0} representa la concentración huecos en exceso de un material n justo a la salida de la juntura p-n. De forma análoga, N_{p0} representa la concentración de electrones en exceso de un material p justo a la salida de la juntura p-n. Esta diferencia de concentración se debe al reordenamiento de los electrones libres y los huecos en la región de agotamiento (reordenamiento de carga), como se puede apreciar en la figura 9 donde aparecen cargas positiva en el lado n de la región de agotamiento y una carga positiva en el lado p de la región de agotamiento. Dicho reordenamiento de cargas se refleja en las concentraciones de equilibrio P_{n0} y N_{p0} que pueden cambiar sus valores de acuerdo al voltaje aplicado a la juntura completa (aplicando polarización directa o inversa).

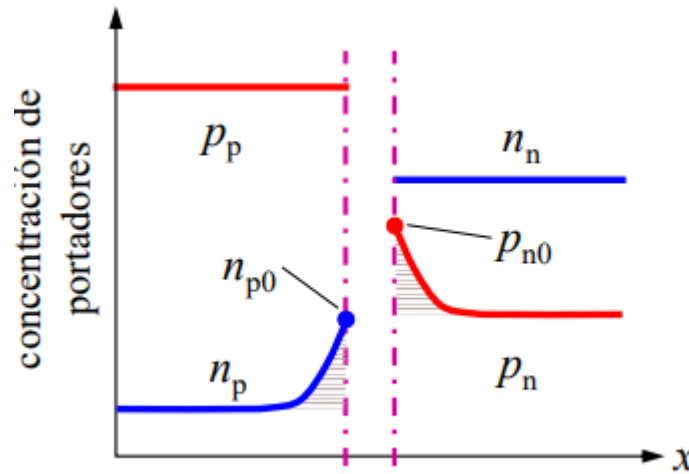


Figura 5: Diagrama de concentraciones del material y concentraciones de equilibrio

1.7. Diagramas de Banda en Semiconductores

Los diagramas de banda son representaciones gráficas que muestran la energía de los electrones en un semiconductor y cómo esta varía en diferentes situaciones. Estos diagramas son esenciales para comprender el comportamiento eléctrico de los semiconductores.

Semiconductor Intrínseco: En un semiconductor intrínseco, el nivel de Fermi (E_F) se encuentra aproximadamente en el centro de la banda prohibida entre la banda de conducción y la banda de valencia. Dado que no hay dopaje, la concentración de electrones en la banda de conducción es igual a la concentración de huecos en la banda de valencia.

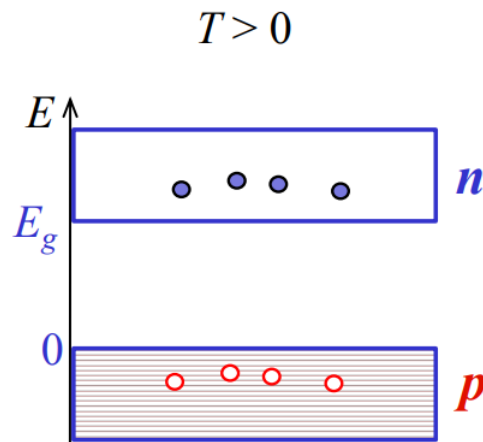


Figura 6: Diagrama de banda caso intrínseco con temperatura mayor a 0

Semiconductor Extrínseco Tipo p: En un semiconductor tipo p, el dopaje con átomos aceptores introduce niveles de energía ligeramente por encima de la banda de valencia,

desplazando el nivel de Fermi hacia esta última. Como resultado, la concentración de huecos en la banda de valencia es mayor que la de electrones en la banda de conducción.

Semiconductor Extrínseco Tipo n: En un semiconductor tipo n, el dopaje con átomos donadores introduce niveles de energía ligeramente por debajo de la banda de conducción, lo que desplaza el nivel de Fermi hacia la banda de conducción. Esto aumenta la concentración de electrones en la banda de conducción en comparación con la de huecos en la banda de valencia.

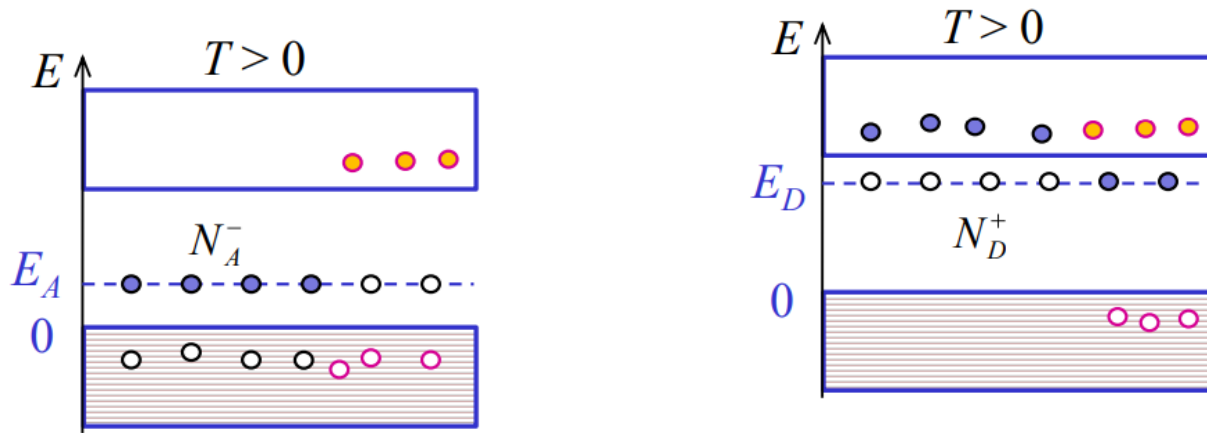


Figura 7: Dopaje tipo P (izquierda) y dopaje tipo N (derecha)

Juntura p-n sin polarización: Cuando se alcanza el equilibrio, la diferencia de concentración de electrones y huecos a ambos lados de la juntura p-n provoca la formación de la zona de agotamiento, que está asociada a la barrera de potencial (V_0). El nivel de Fermi se mantiene constante a lo largo de la juntura, pero las bandas de conducción y de valencia se curvan en la región de la juntura, reflejando la barrera de potencial.

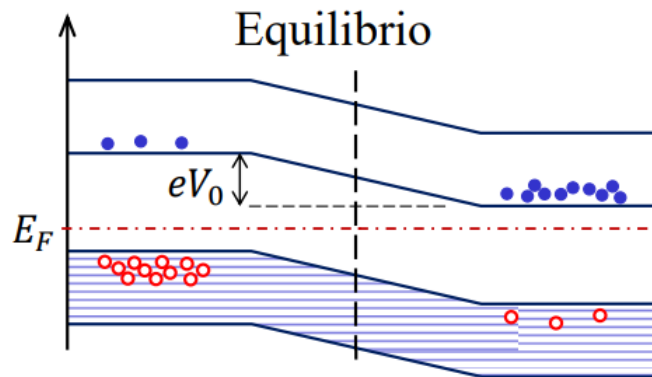


Figura 8: Diagrama en una juntura sin polarización en equilibrio. Lado izquierdo región P y lado derecho región N

Juntura p-n con polarización directa: Al aplicar un voltaje externo que hace que

la región p sea más positiva en relación con la región n, se reduce la barrera de potencial (V_0). Esto disminuye la anchura de la zona de agotamiento, permitiendo que más portadores mayoritarios (electrones en la región n y huecos en la región p) crucen la juntura. Como resultado, la corriente fluye a través de la juntura. El nivel de Fermi ya no es constante a lo largo de la juntura, y las bandas de conducción y de valencia se curvan menos, lo que refleja la reducción de la barrera de potencial.

Juntura p-n con polarización inversa: Si se aplica un voltaje externo que hace que la región p sea más negativa en relación con la región n, la barrera de potencial (V_0) se incrementa. Esto provoca un aumento en la anchura de la zona de agotamiento, lo que dificulta aún más el cruce de los portadores mayoritarios y reduce la corriente a un valor insignificante (corriente de saturación inversa). El nivel de Fermi tampoco es constante a lo largo de la juntura en este caso, y las bandas de conducción y de valencia se curvan más, lo que refleja el aumento de la barrera de potencial.

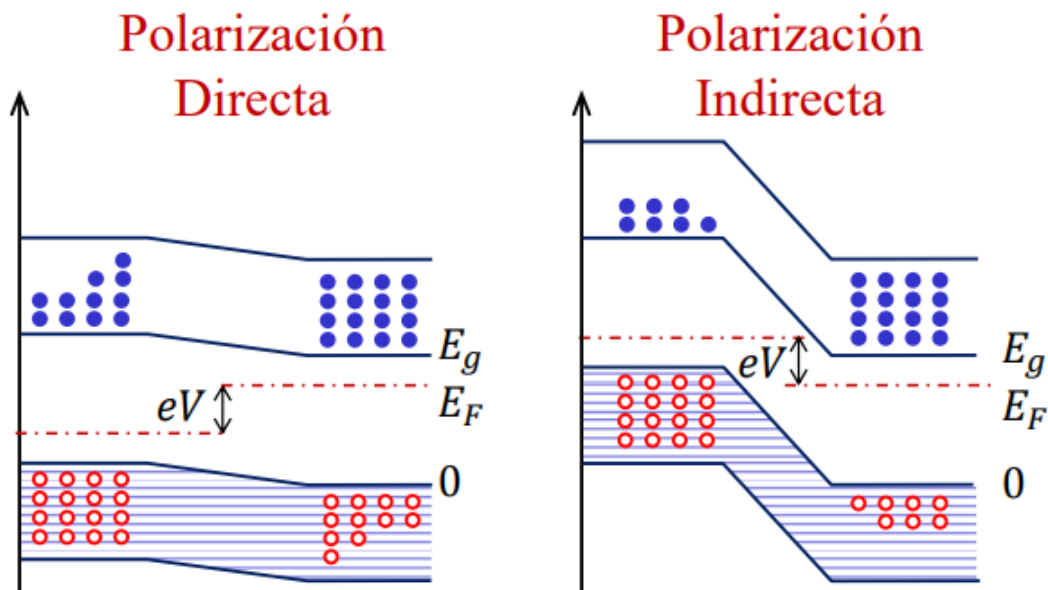


Figura 9: Diagrama de bandas casos polarizado en directa e inversa