

Capítulo 1. Principios de la física del sólido

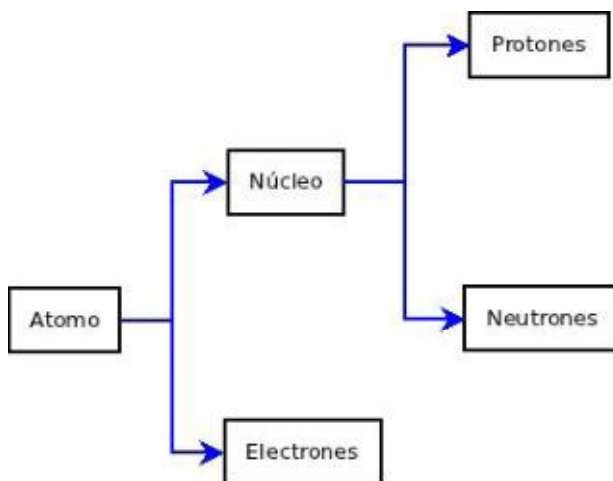
1.1. Estructura de la materia.

Se define como materia a cualquier sustancia que posee masa y ocupa un espacio. Si a una sustancia la subdividimos hasta obtener la menor porción que conserve sus características químicas habremos llegado a la molécula, es decir, la partícula más pequeña en que puede subdividirse la materia conservando su identidad.

En general la molécula puede subdividirse en uno o varios elementos denominándose así a aquellas sustancias que no pueden subdividirse por medios químicos ordinarios. Por ejemplo, el oxígeno (O) y el hidrógeno (H) son elementos, mientras que el agua es un compuesto. Así, una molécula de agua (H_2O) está formada por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno, siendo el átomo la partícula más pequeña de un elemento que puede participar en un cambio químico. Es de hacer notar que todos los átomos de un mismo elemento son idénticos entre sí.

En la física moderna se ha comprobado que un átomo está formado por partículas elementales denominadas partículas subatómicas.

Se han ido proponiendo una serie de modelos del átomo a fin de justificar las experiencias que se realizan en su estudio. Básicamente se acepta que un átomo se encuentra formado por un núcleo y electrones que giran en torno a él (como los planetas giran en torno al sol). Por medio de procedimientos indirectos se ha determinado la masa y la carga eléctrica de estas partículas subatómicas. Así se sabe que un átomo se diferencia de otro por la cantidad de electrones que posee (por ejemplo el hidrógeno posee un solo electrón, mientras que el oxígeno posee ocho electrones). Por lo tanto, la constitución de un átomo es la siguiente:



Las características de las distintas partículas subatómicas es la siguiente:

- **Protón:** Carga eléctrica positiva igual a $1,6021 \times 10^{-19}$ Coulomb. Masa igual a $1,67 \times 10^{-24}$ gramos.
- **Neutrón:** Sin carga eléctrica. Masa igual a la del protón, es decir $1,67 \times 10^{-24}$ gramos.

- **Electrones:** Carga eléctrica negativa (igual pero de signo contrario a la del protón) $-1,6021 \times 10^{-19}$ Coulomb. Masa igual a $9,1 \times 10^{-28}$ gramos.

Un átomo es un conjunto eléctricamente neutro, es decir que el número de cargas eléctricas negativas (electrones), es igual al número de cargas positivas (protones en el núcleo) y como ya hemos mencionado un átomo de un elemento, se diferencia de un átomo de otro elemento solo por el número de electrones (y por lo tanto de protones que posee).

Cuando para un mismo elemento, el núcleo presenta distinta cantidad de neutrones se dice que se tiene un isótopo del elemento. Por ejemplo, el hidrógeno presenta normalmente solo un protón en el núcleo. Sin embargo, existe una pequeña cantidad de hidrógeno en la naturaleza que posee un núcleo con un protón y un neutrón. A los fines químicos sigue siendo hidrógeno (pero más pesado). A este isótopo de hidrógeno se lo llama deuterio. También se presenta en pequeñísimas cantidades hidrógeno que posee un protón y dos neutrones en el núcleo. Este hidrógeno (este isótopo se denomina tritio).

Resumiendo, todos los átomos de un elemento dado poseen el mismo número de electrones (y protones), los cuales giran en torno al núcleo de tal forma que la fuerza de atracción eléctrica (cargas negativas de los electrones y cargas positivas de los protones) se compensan con la fuerza centrífuga que tiende a alejar al electrón (recuérdese la experiencia de hacer girar un balde con agua). Este modelo de átomo parece satisfacer todos los problemas que se presentan, pero adolece de un defecto fundamental.

En efecto, no debemos olvidar que el electrón al girar alrededor del núcleo, no es otra cosa que una carga eléctrica acelerada (gira con velocidad angular constante, pero como permanentemente está cambiando de dirección para seguir describiendo una curva, está variando la dirección del vector velocidad, es decir que está sufriendo una aceleración) equivalente a una corriente eléctrica variable que, como sabemos, origina una onda electromagnética que se propaga. Por lo tanto al emitir una onda electromagnética (energía), disminuye la energía cinética del electrón, $E_c = \frac{1}{2}mv^2$ que, en definitiva, es una disminución de la velocidad del movimiento del mismo. Si disminuye la velocidad disminuye la fuerza centrífuga y por lo tanto el electrón va a girar más cerca del núcleo. Continuando así este proceso vemos que ¡no podría existir ningún átomo!.

Sin embargo somos conscientes de que los átomos existen, por lo que fue necesario justificar este fenómeno. Así, en 1913 Niels Bohr enunció una serie de postulados que a través de una profunda interpretación física permite justificar la situación. El postulado más importante de todos establece que: **“solo son posibles algunas de las infinitas órbitas”**

Este postulado establece que los electrones no pueden estar rotando a cualquier distancia del núcleo, sino a ciertas distancias perfectamente definidas, cuyos radios se pueden calcular mediante la expresión:

$$r = \frac{h^2 \epsilon_0}{\pi m e^2} n^2$$

Dónde:

n = Número cuántico principal (1, 2, 3,...)

h = constante de Planck $6,625 \times 10^{-34}$ [Joule x seg]

m = masa del electrón $9,1 \times 10^{-31}$ [Kg]
 e = carga del electrón $1,6021 \times 10^{-19}$ [Coulomb]
 ϵ_0 = permitividad del vacío $8,85 \times 10^{-12}$ [Faradio/metro]

Así, resultan los siguientes radios:

n	r (metros)	r (Angstrom)
1	$5,288 \times 10^{-11}$	0,5288
2	$2,115 \times 10^{-10}$	2,115
3	$4,759 \times 10^{-10}$	4,759
4	$8,4608 \times 10^{-10}$	8,4608
5	$1,322 \times 10^{-9}$	13,22
.	.	.
.	.	.
.	.	.

Vemos así que podrá haber un electrón girando a una distancia de 0,5268 Å o a 2,115 Å del núcleo, pero por ejemplo, no a 1 Å. De acuerdo con Bohr, los electrones que giran en las órbitas así calculadas no emiten energía y por lo tanto resulta un átomo estable.

En general se prefiere hablar más de energía del electrón que del radio de giro, pues las órbitas no son circulares sino elípticas. Así, en la teoría atómica se acostumbra a utilizar como unidad de energía el **electronvoltio**, siendo por definición: "un *electronvoltio* es la energía cinética adquirida por un electrón cuando es acelerado por la diferencia potencial de un volt".

De esta definición será:

$$1eV = (1,6021 \times 10^{-19} \text{ coulomb}) \times 1 \text{ volt} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ joule}$$

Es decir que un electronvoltio equivale a $1,6 \times 10^{-19}$ Joule.

Para cada órbita cuyos radios hemos calculado le corresponde una cierta energía cinética y una energía potencial. La energía total correspondiente a cada órbita (suma de la cinética más la potencial) resulta calculable mediante:

$$W_n = \frac{me^4}{8h^2\epsilon_0} \frac{1}{n^2}$$

Dónde:

n = Número cuántico principal (1, 2, 3,...)
 h = constante de Planck $6,625 \times 10^{-34}$ [Joule.seg]
 m = masa del electrón $9,1 \times 10^{-31}$ [Kg]
 e = carga del electrón $1,6021 \times 10^{-19}$ [Coulomb]

ϵ_0 = permitividad del vacío $8,85 \times 10^{-12}$ [Faradio/metro].

n	Wn (eV)
1	-13,6
2	-3,1
3	-1,57
4	-0,87
5	-0,56
.	.
.	.
.	.
∞	0

Se observa que los niveles de mayor órbita tienen más energía (menos negativa). Además, por lo visto anteriormente, resulta evidente que podrán haber electrones con una energía de -13.6 eV o de -3.1 eV pero no por ejemplo con -10eV

Observe que la energía total –potencial más cinética- aparece como negativa. Esto no tiene mayor importancia dado que resultará positiva o negativa, dependiendo del nivel de referencia que se ha fijado para la energía potencial. Por ejemplo la energía potencial de una piedra apoyada en una mesa es positiva con respecto al piso, es cero con respecto a la mesa y negativa con respecto al techo. En nuestro caso, el nivel cero de energía potencial del electrón corresponde al infinito (es decir un electrón infinitamente alejado del núcleo).

En la figura 1.1.1 se ilustra esquemáticamente el modelo atómico resultante tanto en su imagen de órbitas como de niveles energéticos.

Para que un electrón que está en un nivel energético -13.6 eV (primer órbita) pase al nivel energético siguiente (-3.1 eV que corresponde a la segunda órbita) es necesario entregarle una energía igual a

$$-3.1 - (-13.6) \text{ eV} = 10.5 \text{ eV}.$$

Si por ejemplo en vez de entregar 10.5 eV le entregamos menos energía, el electrón no pasará a la segunda órbita ni tampoco absorberá dicha energía.

En consecuencia para que un electrón pase de un nivel energético a otro es necesario entregarle la cantidad justa de energía (un paquete de energía o “cuanto”) e inversamente, cuando el electrón pasa de un nivel energético a otro inferior, entrega un cuanto de energía.

Si a un electrón que está en el nivel más bajo de energía ($n=1$, $E=-13.6$ eV) se le entrega una energía de 13.6 eV pasa a ocupar el nivel energético 0 (referencia) que corresponde a $n = \infty$. Pensando en radio de órbita, esta situación corresponde a un radio infinito, es decir un electrón que se encuentra infinitamente alejado del núcleo, lo que equivale a decir que el átomo ha perdido un electrón (se ha ionizado).

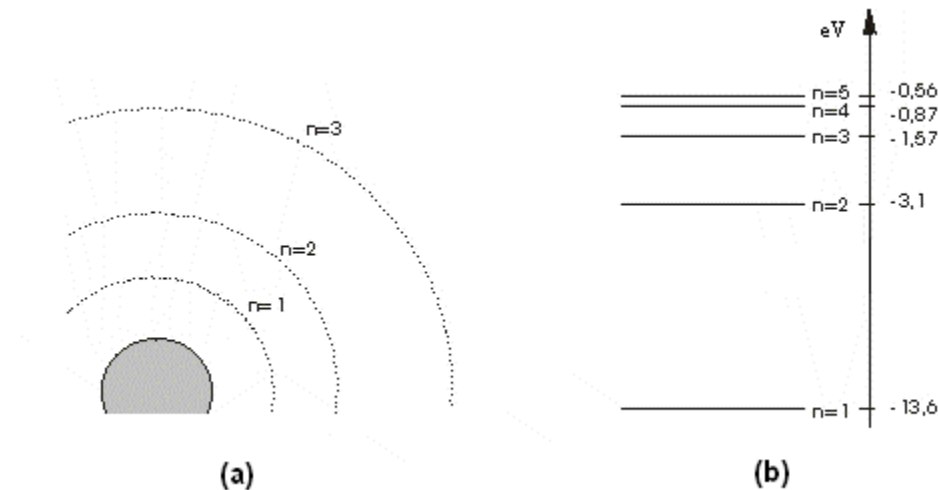


Figura 1.1.1: (a) Modelo atómico

(b) Niveles energéticos

El átomo de un electrón se diferencia de otro solo por la cantidad de electrones (y por lo tanto de protones) que posee.

Surge entonces la pregunta ¿cómo están distribuidos los electrones?

Ya se ha visto que los electrones podrán estar ocupando algunas de las órbitas permitidas (o niveles energéticos). Si se considera un átomo aislado sin que haya entregado ninguna energía, todos los electrones ocuparán los niveles de menor energía (es decir las órbitas más cercanas al núcleo). Se ha demostrado, basado en el denominado **principio de exclusión de Pauli**, que en cada nivel energético (u órbita) solo puede haber un número máximo determinado de electrones. Así se ha llegado a establecer que el número máximo de electrones que puede haber en cada nivel energético es el siguiente:

n	W_n (eV)	Cantidad permitida de electrones
1	-13,6	2
2	-3,1	8
3	-1,53	18
4	-0,87	32
5	-0,56	50

Por ejemplo, un átomo aislado de hidrógeno no excitado, que posee un solo electrón, lo tiene en el nivel energético más bajo, mientras que están vacíos todos los niveles energéticos superiores permitidos.

El carbono posee 6 electrones, y en las condiciones señaladas tendrá dos electrones en el nivel energético más bajo (completamente ocupado el nivel 1) y los otros cuatro en el siguiente nivel (solo 4 electrones de los ocho permitidos).

El silicio posee 14 electrones y los mismos estarán distribuidos: dos en $n = 1$, ocho en $n = 2$ y los cuatro restantes en $n = 3$.

El germanio posee 32 electrones, dos en $n = 1$, ocho en $n = 2$, dieciocho en $n = 3$ y los otros cuatro en $n = 4$.

Si se analiza nuevamente al átomo aislado de carbono pero excitado (por ejemplo a una temperatura mayor que el cero absoluto), podría ocurrir que un electrón que está en el segundo nivel energético haya pasado al tercero. Sin embargo al dejar de excitar al átomo (volver a la temperatura del cero absoluto), el electrón volverá a su órbita original entregando un “**cuanto**” de energía (Se verá más adelante que esta emisión corresponde a un fotón de una frecuencia determinada que explica el “espectro de línea”).

Se observa que los átomos sin excitar presentan la característica de que su nivel energético más alto ocupado (última órbita con electrones, como es la tercera para el silicio), nunca posee más de ocho electrones (aunque tenga posibilidad de tener más). Por otro lado, los átomos tienden a agruparse (formando moléculas) de forma de completar ocho electrones en su última nivel energético ocupado (regla de los octetos). Es importante señalar que las características químicas de un elemento (valencia) están gobernadas por los electrones de su nivel energético exterior, razón por la cual este nivel se denomina de **valencia**.

Como ejemplo de la denominada unión **covalente** en la figura 1.1.2 se ilustra cómo está formada una molécula de agua (un átomo de oxígeno y dos de hidrógeno). Nótese que cada átomo de hidrógeno comparte su electrón con los del átomo de oxígeno (de esta manera, se tendrán los ocho electrones aparentes de la última órbita para el oxígeno, es decir se completa el octeto) y a su vez un electrón del oxígeno se comparte con cada uno de los átomos de hidrógeno (con los cual cada hidrógeno completaría los dos electrones de su órbita, ya que este es el único elemento que en lugar de ocho electrones tiende a completar solo dos).

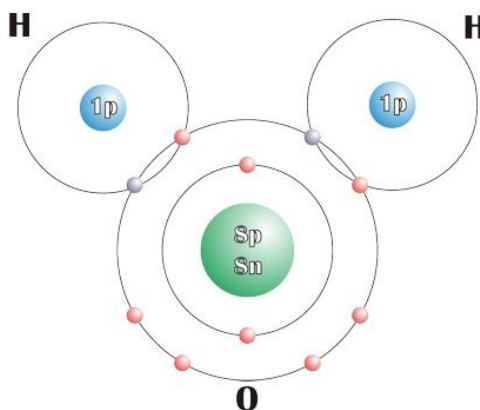


Figura 1.1.2: Molécula de agua

Imaginemos ahora cómo estará formada una estructura cristalina (es una estructura ordenada de átomos en forma de bloque repetido regularmente en tres dimensiones) como es el caso de los metales y algunos no metales.

Teniendo en cuenta la regla del octeto, si consideramos el carbono o el silicio, el “armazón” estructural adopta la forma imaginada en la figura 1.1.3 donde se observa como cada átomo comparte un electrón con los cuatro átomos vecinos y a su vez éstos

comparten uno de sus electrones con el átomo considerado de forma tal que prácticamente se completan los octetos.

Con respecto al análisis efectuado precedentemente existe la diferencia fundamental de que ahora no podemos considerar al átomo aislado pues evidentemente los mismos están próximos entre ellos y por lo tanto se hallan interaccionando entre sí. En particular a los elementos tales como el Carbono, Germanio y Silicio que poseen cuatro electrones en su nivel de valencia los denominamos tetravalentes. Elementos tales como el Fósforo, Arsénico y Antimonio que poseen cinco electrones en el nivel de valencia lo denominaremos pentavalentes; al Boro, Indio, Galio que poseen tres electrones en el nivel de valencia los llamaremos trivalentes, etc.

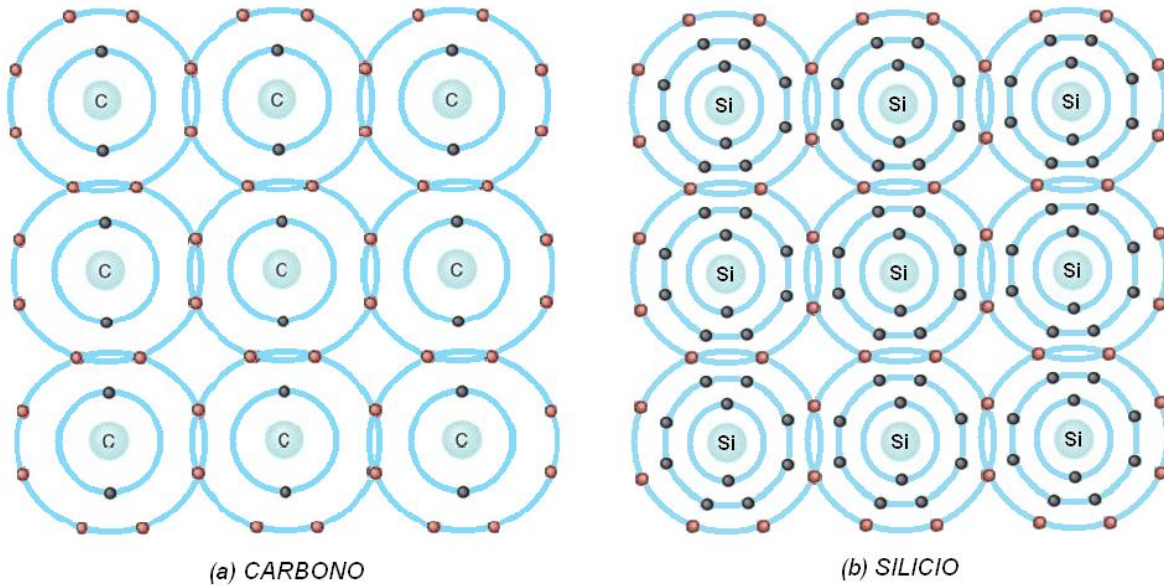


Figura 1.1.3: Uniones covalentes de carbono y silicio

Al tratar el problema de los niveles de energía para los átomos de un cristal es conveniente recordar el problema físico del acoplamiento. Supongamos que tenemos dos péndulos iguales que oscilan cada uno a una frecuencia f_0 . Si se van aproximando entre sí (acoplándose entre ellos) se observa que uno comienza a oscilar a una frecuencia inferior a f_0 y otro a una frecuencia superior a f_0 .

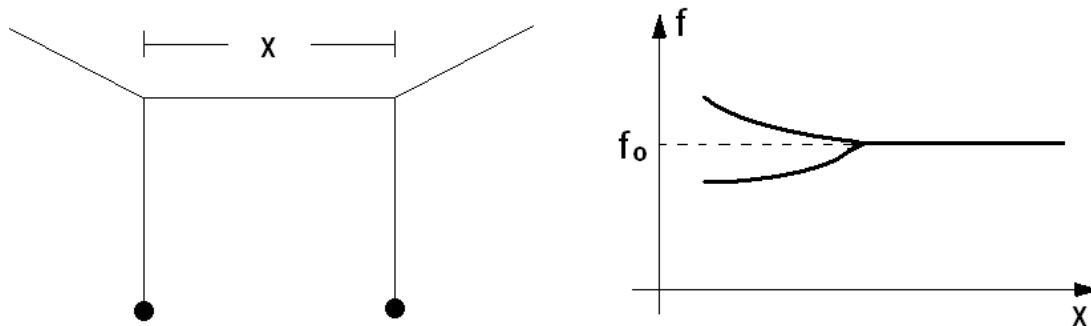


Figura 1.1.4: Acoplamiento entre péndulos

También se observa que cuanto más se acoplan, mayor es el apartamiento de las frecuencias individuales de oscilación. Así en la figura 1.1.4 se muestra un gráfico de la frecuencia de oscilación en función de la distancia entre los dos péndulos.

El mismo fenómeno se presenta cuando se acoplan circuitos sintonizados. Es de hacer notar que, por ejemplo, si acopláramos en lugar de dos péndulos a diez, cada uno de ellos oscilará a una frecuencia distinta, pero todas estas frecuencias estarán comprendidas entre las dos del primer ejemplo.

En el caso de los átomos aparece un fenómeno similar con los niveles energéticos. Como por otra parte en un cristal existen millones de átomos próximos, este desdoblamiento de los niveles energéticos da prácticamente un continuo, es decir que cada uno de los niveles energéticos se convierte en una BANDA DE ENERGÍA. Es importante notar que este concepto implica que para un átomo de un cristal, los electrones pertenecientes a una órbita determinada, ahora podrán tener cualquier energía dentro de su correspondiente banda y no una única como en el caso del átomo aislado.

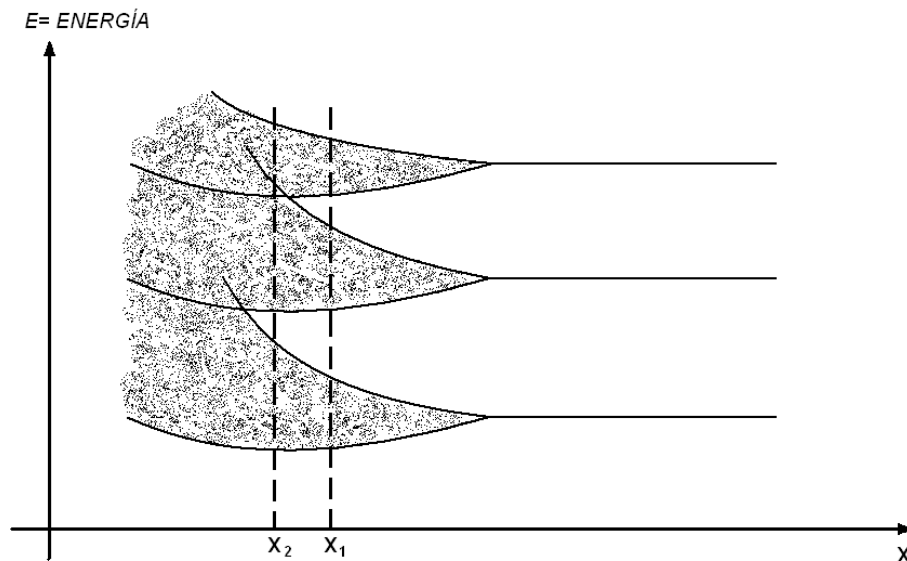


Figura 1.1.5: Bandas de energía de un cristal

Es obvio que, de acuerdo con la figura 1.1.5, al variar la distancia interatómica cambia el “ancho” de las bandas energéticas. Sin embargo para cada tipo de cristal la distancia interatómica es fija y por lo tanto sus bandas de energía serán fijas.

Si consideramos un cristal cuya distancia interatómica es la señalada con X_1 , su esquema de banda de energía (similar al caso b de la figura 1.1.1) podría esquematizarse como se muestra en la figura 1.1.6, donde el eje horizontal no representa nada y sólo sirve para graficar los niveles o bandas energéticas.

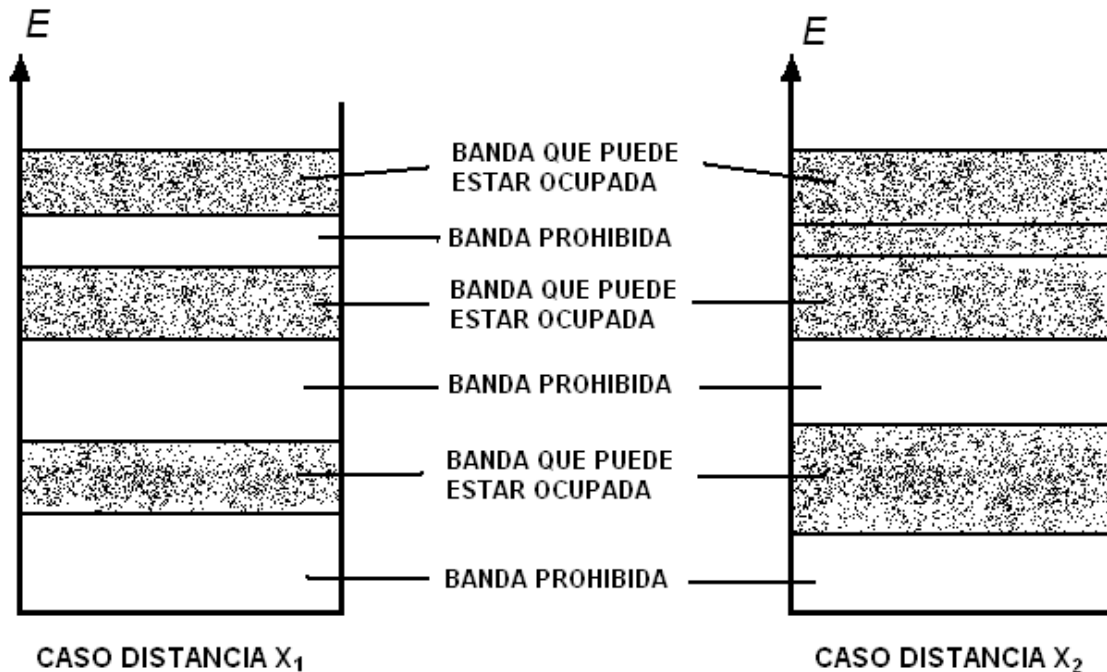


Figura 1.1.6: Esquema de bandas de energía para un cristal

En consecuencia al analizar el cristal, para cada átomo no tendrá más sentido hablar de niveles de energía (correspondientes a cada órbita) sino de bandas de energía correspondientes cada una a su respectiva órbita. Es evidente que, entre bandas de energía (u órbitas) que pueden estar o no ocupadas con electrones, existen bandas de energía (que corresponden a los espacios entre orbitas) donde no pueden haber electrones. Estas últimas bandas se denominan bandas prohibidas.

Estamos ahora en condiciones de analizar las distintas estructuras de los niveles energéticos para los distintos materiales. Para ello supondremos que el cristal analizado está a 0°K (es decir el cero absoluto de temperatura) y que no se ha excitado de ninguna manera (por ejemplo iluminándolo) al mismo.

Como ya hemos visto, por ejemplo en el silicio, al analizar el átomo aislado en el nivel $n=3$ hay solo cuatro electrones, pero teóricamente podrían haber 8. Esto equivale a decir que en el cristal de silicio sin excitar existirá (la tercer banda energética) una banda parcialmente ocupada que es la que se denomina BANDA DE VALENCIA, luego de la cual existe una BANDA PROHIBIDA y a continuación una banda de energía que podría tener electrones pero que está totalmente vacía y se denomina BANDA DE CONDUCCION. En todos los cristales se presenta una situación similar (es decir bandas energéticas interiores totalmente ocupadas, una parcialmente ocupada y luego de una banda prohibida una banda vacía llamada banda de conducción) y en función del salto energético de la banda prohibida que existe entre la banda de valencia y la de conducción se los clasifica en aisladores, semiconductores y conductores.

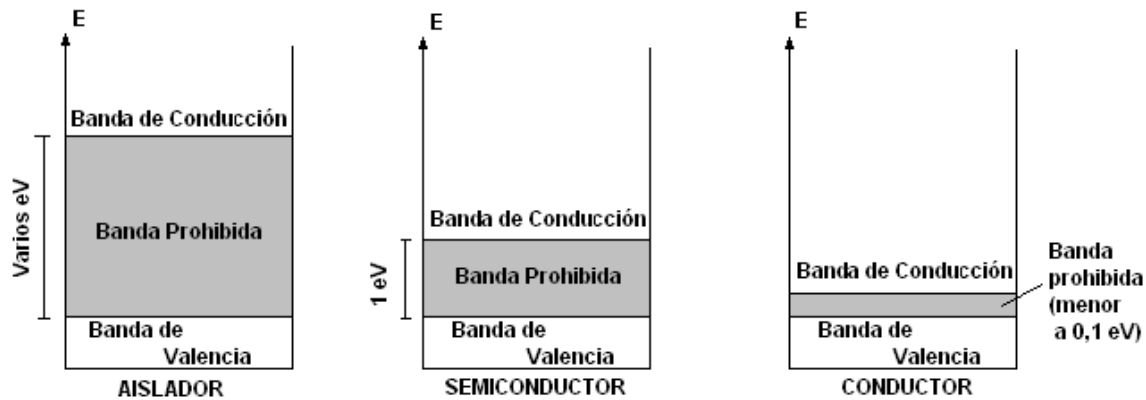


Figura 1.1.7: Bandas energéticas a 0°K

Por ejemplo, en un aislador el "salto" de la banda prohibida es de varios electrón-volts, por lo cual, para que algún electrón de la banda de valencia pueda "saltar" a la banda de conducción es necesario entregar mucha energía al cristal (por ejemplo, calentarlo a altas temperaturas). En el caso del germanio (Ge, semiconductor) el ancho de banda prohibida es de 0,7 eV y en el silicio (Si, semiconductor) es de 1,3 eV. En cambio en el caso del cobre (Cu, conductor) el ancho de la banda prohibida es cero.

2. Semiconductores intrínsecos y extrínsecos

Para que se produzca la conducción eléctrica en un cristal, deben existir **PORTADORES** libres de desplazarse dentro del mismo, entendiéndose por portador a una carga eléctrica (positiva o negativa) que se mueve por efecto de un campo eléctrico o por un movimiento desordenado (tipo Browniano).

Por lo tanto, si consideramos nuestro semiconductor a 0°K, el mismo se comportará como un aislador perfecto, ya que no existirán portadores libres.

Si, en cambio, excitamos de alguna manera el cristal, por ejemplo aumentando la temperatura, algunos electrones de la banda de valencia adquirirán energía suficiente como para pasar a la banda de conducción dejando en su lugar un **hueco** (es el mismo proceso por el cual, en el átomo aislado un electrón saltaba de una órbita interna a otra más externa). Por supuesto esos electrones o **PORTADORES NEGATIVOS**, (electrones que han pasado a la banda de conducción), están lo suficientemente alejados del núcleo como para moverse aleatoriamente dentro de estructura cristalina (como las moléculas de un gas) y por lo tanto, si ahora se aplica un campo eléctrico al cristal, por tener portadores libres, se origina una corriente eléctrica.

En esto vemos que dicha corriente eléctrica se debe al movimiento de portadores negativos (electrones en la banda de conducción), pero para dicha corriente intervienen también otros portadores como veremos a continuación.

Al pasar un electrón (portador negativo) a la banda de conducción y moverse libremente dentro del cristal, nos ha quedado un átomo sin carga negativa, es decir que ha quedado una carga positiva sin neutralizar. Podemos imaginar entonces la presencia de una carga positiva en la banda de valencia (falta una carga negativa) que llamamos **hueco**. Es evidente que por cada electrón en la banda de conducción (portador negativo)

existe un hueco en la banda de valencia (portador positivo). Por lo tanto, al aplicar un campo eléctrico al cristal, se produce una deformación de las órbitas de los átomos y un hueco (falta de un electrón en la banda de valencia) “captura” a un electrón en la banda de valencia del átomo vecino. Es decir que al aplicar un campo eléctrico, por un lado se desplazan los electrones que están en la banda de conducción (portadores negativos libres) y por otra parte “se desplazan los huecos de la banda valencia”.

En conclusión, la corriente eléctrica que podemos medir mediante un multímetro (donde sólo circulan electrones) se debe a dos corrientes dentro del semiconductor que son:

- a) Movimiento de portadores negativos (electrones libres) de la banda de conducción.
- b) Movimiento de portadores positivos (huecos) de la banda de valencia.

Resumiendo la situación, al aumentar la temperatura a partir del cero absoluto, se generan pares electrón-hueco o PORTADORES INTRÍNSECOS ya que son propios del material. En el caso de un semiconductor, a la temperatura ambiente (27 °C es decir 300 K) algunos de los electrones de la banda de valencia han pasado a la banda de conducción dando origen a portadores negativos libres y huecos en la banda de valencia (portadores positivos libres). Si la temperatura aumenta, aumentará la cantidad de pares electrón-hueco, es decir que para un mismo campo eléctrico tendremos mayor corriente (menor resistencia eléctrica).

En cambio, en un conductor, a la temperatura ambiente, todos los electrones de la banda de valencia han pasado a la banda de conducción (pues es muy pequeño el salto de la banda prohibida) y por lo tanto, un ulterior aumento de la temperatura no producirá más pares electrón-hueco con lo que no podrá disminuir la resistencia eléctrica con la temperatura.

Para el aislador, dado el “ancho” de la banda prohibida, deberá calentarse (entregarle mucha energía) excesivamente al cristal para poder generar pares electrón-hueco.

Es de hacer notar que el proceso completo es más complicado. En primer lugar, el número de pares electrón-hueco del semiconductor depende de la temperatura, pero el proceso es un efecto dinámico ya que permanentemente hay electrones libres que son capturados por huecos de la banda de valencia (se recombinan y desaparece un par electrón-hueco) y automáticamente se genera otro par electrón-hueco (téngase presente que cuando un electrón de la banda de conducción ocupa “una vacante o hueco” de la banda de valencia, entrega energía, la cual, al ser absorbida por otro electrón de la banda de valencia, lo lleva a la banda de conducción). Desde el punto de vista global, lo importante es que en un semiconductor, al aumentar la temperatura aumenta el número de portadores intrínsecos.

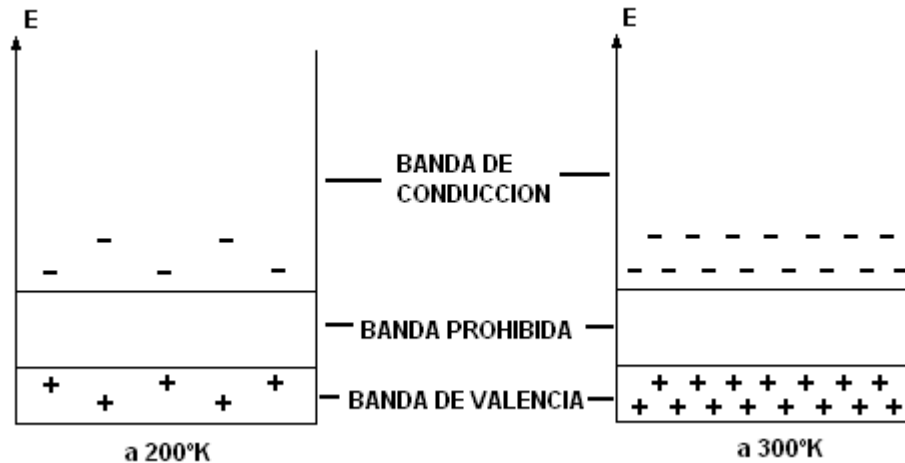


Figura 2.0.1: Semiconductor a distintas temperatura.

La corriente eléctrica debido a la aplicación de un campo eléctrico es el resultado del movimiento de portadores negativos (hacia el terminal positivo de la fuente externa) y de portadores positivos (hacia el terminal negativo de la fuente externa). Es decir, la corriente eléctrica en una estructura cristalina es la suma de dos corrientes, una de electrones J_n y la otra de huecos o lagunas) J_p .

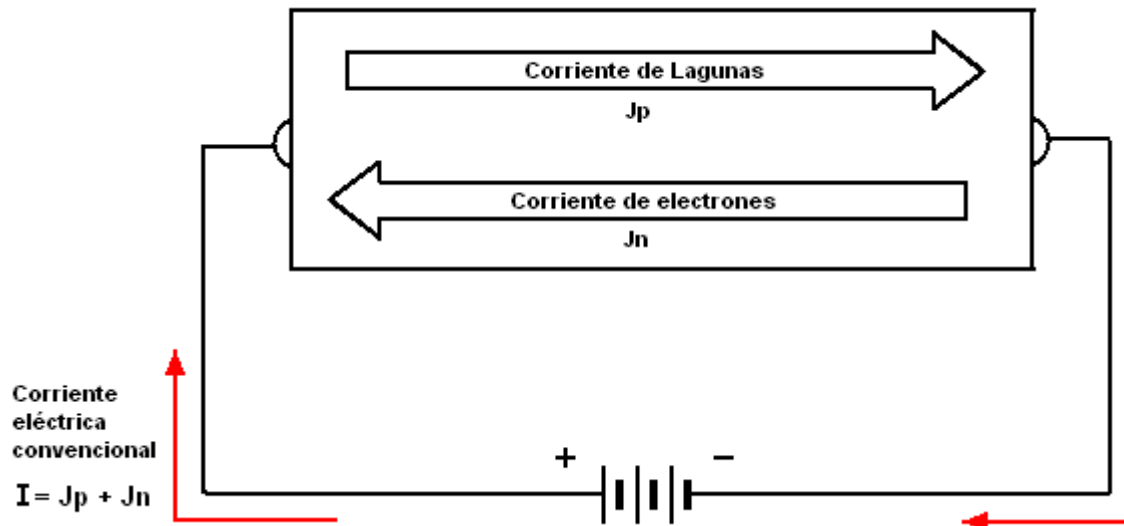


Figura 2.0.2: Corriente eléctrica de un cristal.

Cuando se analizaba el movimiento de cargas eléctricas en el vacío bajo la acción de un campo eléctrico se veía que las mismas se aceleraban. En el cristal, debido a las fuerzas de atracción de los iones de la estructura cristalina, a la repulsión entre cargas de igual signo y al "choque" con los átomos de la estructura, la velocidad de los portadores no crece indefinidamente y se ha comprobado que la velocidad que adquieren los portadores es proporcional al campo eléctrico aplicado. Como además el mecanismo de movimiento de los electrones y de los huecos es distinto, la velocidad que adquieren los electrones y la que adquieren los huecos es diferente.

La velocidad que adquieren los portadores se expresa por la relación:

$$v = \mu E$$

Dónde:

v : Velocidad de los portadores en el cristal [cm/seg.]

μ : factor de proporcionalidad denominado **movilidad** [cm²/Volt×seg.]

E : Intensidad del campo eléctrico [Volt/cm]

Según se trate de electrones o huecos la movilidad se indica con el subíndice **n** o **p** respectivamente. A temperatura ambiente la movilidad es:

Movilidad (cm ² /volt×seg)	Germanio	Silicio
μ_n (electrones)	3600	1200
μ_p (huecos)	1700	250

Por ejemplo, si aplicamos 100 V entre los extremos de una barra de silicio de 10cm de longitud, la velocidad que alcanzarán los electrones y los huecos será:

$$v_n = \mu_n E = 1200 \left(\frac{\text{cm}^2}{\text{volt} \times \text{seg}} \right) \times \frac{100(\text{volt})}{10(\text{cm})} = 12000 \left(\frac{\text{cm}}{\text{seg}} \right)$$

$$v_p = \mu_p E = 250 \left(\frac{\text{cm}^2}{\text{volt} \times \text{seg}} \right) \times \frac{100(\text{volt})}{10(\text{cm})} = 2500 \left(\frac{\text{cm}}{\text{seg}} \right)$$

La movilidad de los portadores disminuye levemente con el aumento de la temperatura (pues al aumentar la temperatura aumentan las vibraciones de la malla cristalina aumentando la probabilidad de “choque”). Es por esta causa, que al aumentar la temperatura aumenta la resistencia de un conductor (ya que a la temperatura ambiente, todos los electrones de la banda de valencia han pasado a la banda de conducción y por lo tanto, el aumento de la temperatura solo puede ocasionar una disminución de la movilidad).

Para un semiconductor, a temperaturas superiores a los 100°K (-173°C) no es importante la disminución de la movilidad pues prevalece el aumento de portadores intrínsecos (generación de pares de electrón-hueco por efecto térmico). En consecuencia, en un semiconductor, al aumentar la temperatura disminuye su resistencia eléctrica (aumenta la conductibilidad).

Existe otra forma de generar portadores en el caso de un semiconductor. La misma consiste en agregar una pequeña cantidad de otro elemento a un cristal puro de germanio o silicio produciendo una modificación fundamental de su característica eléctrica. El número de átomos de impureza es muy pequeño (del orden de 10 átomos cada 1.000.000.000 de átomos del cristal puro) y las que se utilizan son del tipo **pentavalentes** (cinco electrones por átomo en su banda de valencia) llamadas **donoras** que son el fósforo, arsénico y antimonio o del tipo **trivalentes** (tres electrones por átomo en su banda de valencia) llamadas **aceptoras** que son el boro, el indio y el galio.

Veamos primeramente que ocurre cuando se agregan impurezas donoras (pentavalentes) en un cristal semiconductor. En este caso, algunos átomos del material

puro (Ge o Si) de la estructura cristalina resultan reemplazados por átomos de la impureza (como son pocos átomos de impureza, prácticamente cada átomo de ella está totalmente rodeado por átomos del material puro). En la figura 2.0.3 se han representado las uniones (electrones compartidos como ya hemos visto) entre átomos para el caso del material puro y para el caso de impurezas donoras.

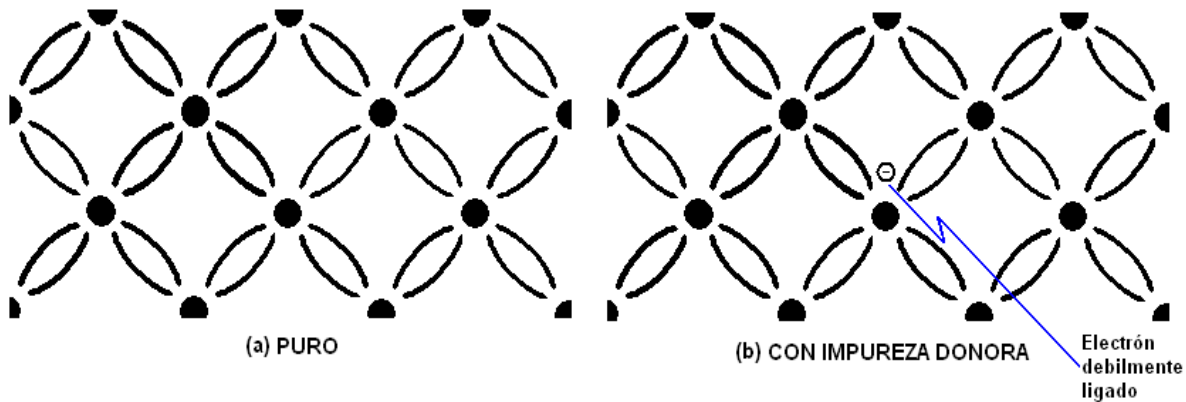


Figura 2.0.3: Estructura del semiconductor.

En este esquema, cada barra representa al electrón compartido. Así en el semiconductor puro (Ge o Si) cada átomo ha completado su octeto. En el caso de tener una impureza donora vemos que la misma comparte cuatro de sus cinco electrones con cuatro átomos vecinos completando su octeto y el quinto electrón queda débilmente ligado al átomo y por lo tanto basta una pequeña energía para que dicho electrón pueda desplazarse libremente dentro del cristal. Desde el punto de vista del diagrama energético podemos ubicar las impurezas muy cerca del borde inferior de la banda de conducción (para mostrar que una pequeña energía hará pasar un electrón por átomo de impureza a la banda de conducción). En estas condiciones la figura 2.0.4 representaría el diagrama energético del semiconductor a 0°K y a 300°K (27°C) con impurezas donoras.

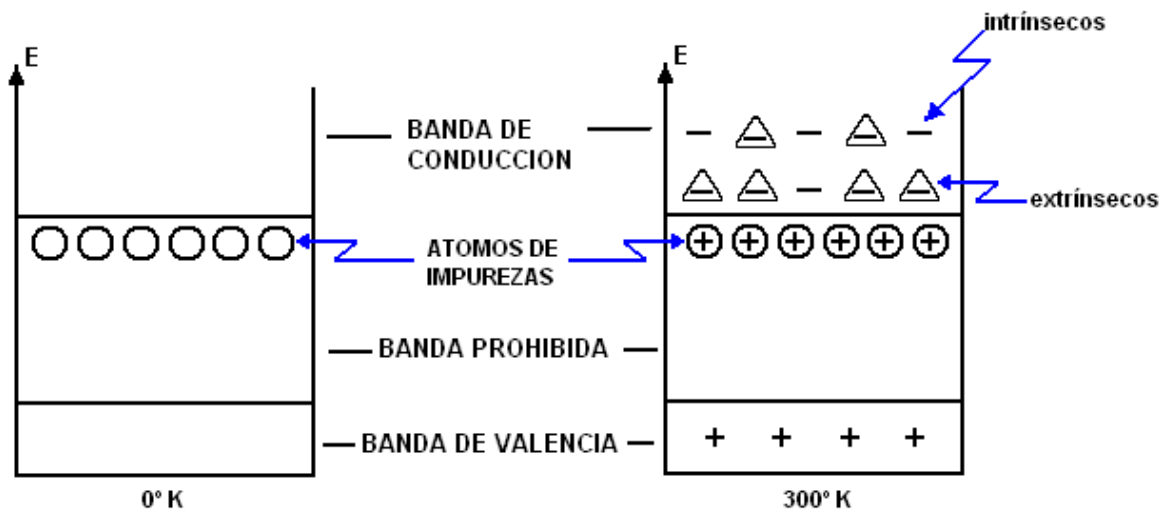


Figura 2.0.4: Material tipo N a 0°K y a 300°K .

Nótese que a 300 K tendremos electrones y huecos intrínsecos (electrones en la banda de conducción y huecos en la banda de valencia) y además electrones en la banda de conducción aportados por las impurezas (electrones o portadores EXTRÍNSECOS), mientras que las impurezas han quedado como átomos fijos ionizados positivamente (iones positivos fijos). En estas condiciones, intervendrán en la conducción eléctrica los huecos intrínsecos de la banda de valencia y los electrones intrínsecos y extrínsecos de la banda de conducción. Vemos así que para un semiconductor contaminado con impurezas donoras hay más portadores libres negativos (electrones) que portadores libres positivos (huecos). Por esta causa la corriente eléctrica en este material se deberá fundamentalmente a los portadores negativos (mayoritarios) y por ello se dice que el material es de tipo N.

Es importante recalcar el hecho que para la conducción sólo intervienen los electrones que están en la banda de conducción y los huecos de la banda de valencia.

Evidentemente a la temperatura ambiente en un semiconductor de tipo N la mayor parte de la corriente se debe a los portadores negativos y en mucho menor grado intervienen los portadores positivos. Por eso se dice que los portadores mayoritarios son electrones y los minoritarios son huecos. En este semiconductor si se aumenta la temperatura se generan pares electrón-hueco (portadores intrínsecos) pues a la temperatura ambiente todos los átomos de impureza aportaron ya su electrón.

Si en cambio contaminamos a un semiconductor (Si o Ge) con impurezas trivalentes (aceptoras) que poseen tres electrones en su banda de valencia, solo tres átomos del semiconductor puro podrán compartir sus electrones y faltará un electrón para completar los octetos.

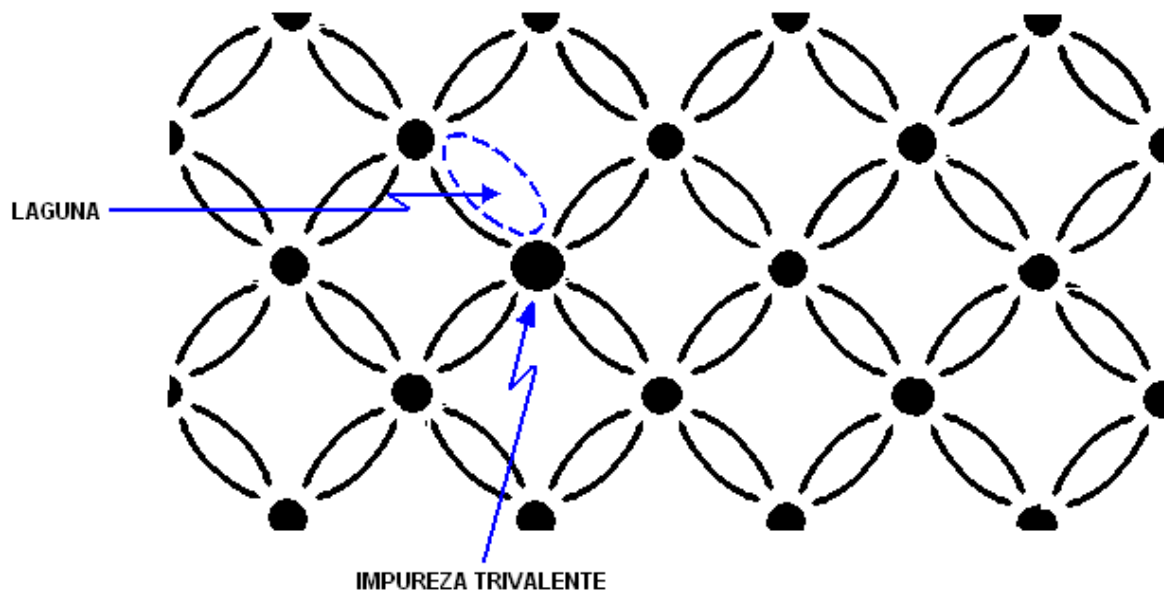


Figura 2.0.5: Semiconductor con impurezas aceptoras.

Sin embargo, basta una pequeña energía para que se capture un electrón de las uniones vecinas (de la banda de valencia) completándose el octeto correspondiente, es decir, en forma análoga a lo visto aparecerán huecos en la banda de valencia. Por lo tanto, en el diagrama energético correspondiente, los átomos de impureza aceptora (pues "aceptan" un electrón) deben ubicarse vecinos al borde superior de la banda de valencia.

Así, la figura 2.0.6 representa el diagrama energético del semiconductor a 0°K y a 300°K (27°C) con impurezas aceptoras.

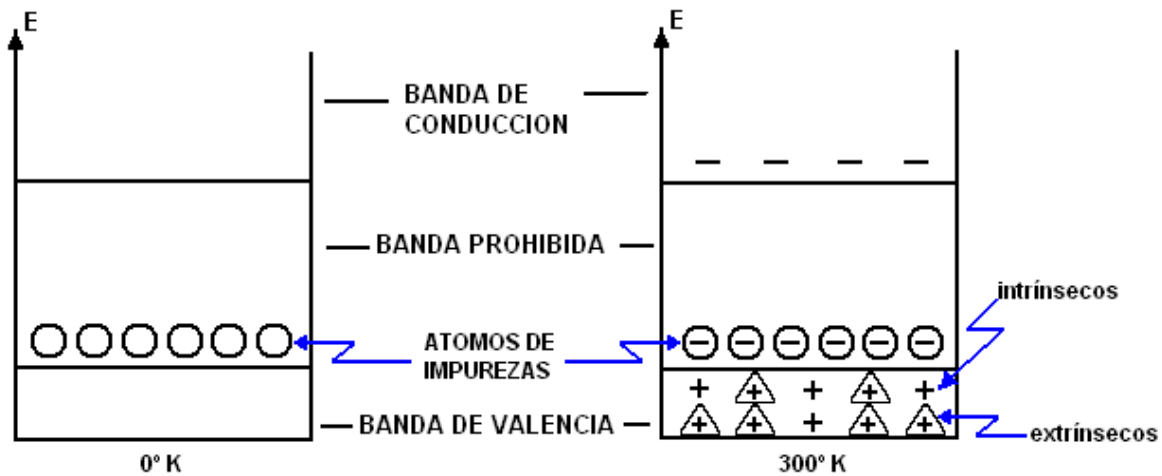


Figura 2.0.6: Material tipo P a 0K y a 300K.

Es de hacer notar que a 300°K tendremos, para este caso, tendremos electrones y huecos intrínsecos (electrones en la banda de conducción y huecos en la banda de valencia) y además huecos en la banda de valencia generados por las impurezas (huecos o portadores positivos EXTRINSECOS), mientras que las impurezas han quedado como átomos fijos ionizados negativamente (iones negativos fijos). Así intervienen, como siempre, en la conducción eléctrica los electrones intrínsecos que están en la banda de conducción y los huecos intrínsecos y extrínsecos de la banda de valencia. Por lo tanto, en un semiconductor contaminado con impurezas aceptoras hay más portadores libres positivos (huecos) que portadores libres negativos (electrones). Por esto, la corriente eléctrica en este material se deberá fundamentalmente a portadores positivos (mayoritarios) y por ello se dice que este material es tipo P.

Resumiendo lo visto podemos decir que:

- SEMICONDUCTOR INTRINSECO:** La conducción eléctrica se debe a electrones y huecos. El número de electrones libres es igual al de huecos libres.
- SEMICONDUCTOR N:** La conducción eléctrica se debe fundamentalmente a electrones libres y en mucho menor grado a huecos libres. El número de electrones libres (intrínsecos más extrínsecos) es mucho mayor que el de huecos (intrínsecos) y por ello los electrones son portadores mayoritarios y los huecos portadores minoritarios.
- SEMICONDUCTOR P:** La conducción eléctrica se debe fundamentalmente a huecos libres y en mucho menor grado a electrones libres. El número de huecos libres (intrínsecos más extrínsecos) es mucho mayor que el de electrones libres (intrínsecos) y por ello los huecos son portadores mayoritarios y los electrones portadores minoritarios.

Normalmente a 40°K (-233°C) todas las impurezas donoras han entregado su electrón a la banda de conducción o las aceptoras han generado un hueco en la banda de valencia.

Si se continúa aumentando la temperatura aumenta la generación de pares electrón-hueco del material intrínseco y así sucesivamente. Si la temperatura aumenta mucho, la concentración de intrínsecos puede superar a la de extrínsecos aumentando rápidamente la conductibilidad del material. Si se aplicó una tensión fija al cristal, al aumentar la conductibilidad aumenta la corriente que circula con lo que se disipará mayor potencia lo que producirá un ulterior aumento de la temperatura. Esto originará más pares electrón-hueco intrínsecos con lo que aumentará la conductibilidad y por consiguiente la corriente, la disipación y la temperatura y así sucesivamente. Este proceso se denomina “corrida térmica” y si no se adoptan medidas externas para limitar la corriente se produce la destrucción del elemento.