

Tema 11: Introducción a la física atómica y semiconductores

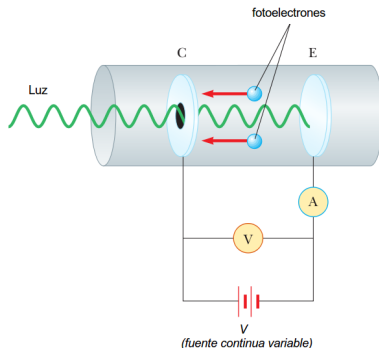
Fundamentos Físicos y Electrónicos de la Informática

Efecto fotoeléctrico

Efecto fotoeléctrico

Una luz sobre ciertas superficies metálicas provoca la emisión de electrones (*fotoelectrones*) en dicha superficie.

- Tubo de vacío con dos placas metálicas:
 - E = emisora
 - C = colectora
- En oscuridad, el amperímetro marca cero $I = 0$
- Si se ilumina E con la intensidad y frecuencia apropiada, el amperímetro marca paso de corriente \rightarrow existe flujo de fotoelectrones entre placas E y C .



Efecto fotoeléctrico

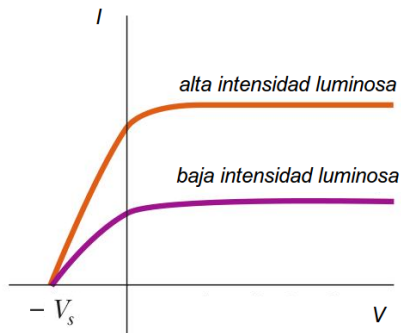
- Para valores grandes de V la corriente alcanza un valor máximo. Todos los e^- emitidos por E son recolectados por C , la corriente no puede aumentar más.

- La corriente aumenta al aumentar la intensidad luminosa.

- Cuando $V < 0$, la corriente cae porque los e^- son repelidos por C .

- Sólo los e^- que tengan energía cinética $K > q_e V$ llegarán a C .

- Potencial de frenado (V_S): mayor potencial al que $I = 0$.



- Energía cinética máxima de un e^-

$$K_{max} = q_e V_S$$

Efecto fotoeléctrico

Algunas características experimentales del efecto fotoeléctrico

- A)** K_{max} es independiente de la intensidad luminosa.
- B)** No existe emisión de e^- , independientemente de la intensidad luminosa, si la frecuencia de la luz disminuye por debajo de una frecuencia de corte f_c , cuyo valor es característico del metal iluminado.
- C)** K_{max} aumenta al aumentar la frecuencia de la luz incidente.

La física clásica no podía explicar estos 3 hechos experimentales. La explicación fue dada por Einstein que uso ideas previas de Planck acerca de la cuantización de energía.

Efecto fotoeléctrico

Explicación de Einstein del efecto fotoeléctrico

La luz (o cualquier radiación em) de frecuencia f , se puede considerar un flujo de fotones. Donde la energía de cada fotón es

$$E = hf$$

$h = 6,626 \times 10^{-34}$ Js, es la constante de Planck

cada fotón se mueve en el vacío con una velocidad $c = 3 \times 10^8$ m/s

- Así un fotón transfiere toda su energía a un e^- del metal
- Los e^- menos ligados en el átomo tendrán una energía cinética

$$K_{max} = hf - \phi$$

Funcion trabajo (ϕ) = Mínima energía con la cual un e^- está unido a un metal. Es característica de cada metal.

Efecto fotoeléctrico

La interpretación de Einstein permite explicar las características experimentales del efecto fotoeléctrico

A) K_{max} es independiente de la intensidad luminosa.

$$K_{max} = hf - \phi \quad \Rightarrow \quad K_{max} \text{ solo depende de } f \text{ y } \phi$$

B) Si $f < f_c$, no existe emisión de $e^- \rightarrow$ Si $hf < \phi \Leftrightarrow f < \frac{\phi}{h}$ no hay suficiente energía para arrancar electrones.

Frecuencia de corte, $f_c = \frac{\phi}{h}$

Frecuencia por debajo de la cual no se emiten electrones

\rightarrow Longitud de onda de corte $\lambda_c = \frac{c}{f_c} = \frac{hc}{\phi}$

C) K_{max} aumenta al aumentar la frecuencia de la luz incidente: $E = hf$
 \rightarrow al aumentar f , mayor es la energía absorbida por el e^-

Efecto fotoeléctrico

Ejemplo 1: Una superficie de sodio se ilumina con una luz que tiene una longitud de onda de 330 nm. La función trabajo del sodio es de 2.46 eV. a) Calculad la energía cinética máxima de los fotoelectrones expulsados. b) Encuentre la longitud de onda de corte, λ_c , para el sodio.

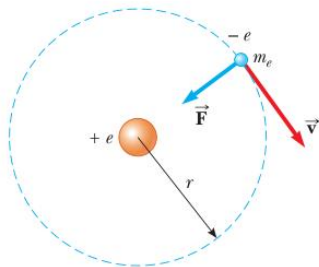
Sol. a) 1.30 eV; b) 504 nm.

Modelo de Bohr del átomo de Hidrógeno

• Bohr combina ideas de cuantización de energía de Planck, el concepto de fotón e ideas de mecánica newtoniana para producir un modelo semiclásico. Aunque obsoleto, explica con éxito sistemas como el átomo de Hidrógeno.

Se basa en los siguientes postulados

- PI)** El e^- se mueve en órbitas circulares alrededor del protón, bajo la influencia de la fuerza eléctrica.
- PII)** Sólo ciertas órbitas son estables. En ellas el e^- no pierde energía por radiación.



Modelo de Bohr del átomo de Hidrógeno

- PIII)** Cuando un e^- hace una transición de una órbita inicial con más energía a otra órbita de menor energía, se emite un fotón con frecuencia tal que se respete la conservación de energía

$$E_i - E_f = hf$$

Igualmente, un fotón incidente puede ser absorbido por el átomo, si tiene una energía igual a la diferencia de energía entre dos estados permitidos.

- PIV)** Las órbitas permitidas son aquellas para las cuales la cantidad de movimiento angular del e^- está cuantizada, y es igual a un múltiplo entero de $\hbar = h/2\pi$

$$m_e v r = n \hbar, \quad n \in \mathbb{N}$$

m_e y v son la masa y velocidad del e^- , mientras que r el radio de la órbita. Y n el número cuántico.

Modelo de Bohr del átomo de Hidrógeno

Veamos cuales son las órbitas posibles.

La energía total del átomo (E) es la potencial eléctrica más la energía cinética $\rightarrow E = U + K$

$$U(r) = -k \frac{q_e^2}{r}; \quad K = \frac{1}{2} v^2 m_e.$$

Además el e^- sigue un movimiento circular uniforme, donde la fuerza centripeta es la fuerza eléctrica

$$k \frac{q_e^2}{r^2} = \frac{m_e v^2}{r} \quad \Rightarrow \quad v^2 = \frac{k q_e^2}{m_e r}$$

pero también sabemos que $m_e v r = n \hbar \Rightarrow v^2 = \left(\frac{n \hbar}{m_e r} \right)^2$

Si igualamos y despejamos en función de el radio de la órbita r

$$r = \frac{n^2 \hbar^2}{m_e K q_e^2} = a_0 n^2$$

Modelo de Bohr del átomo de Hidrógeno

Los radios de las órbitas están cuantizados

Radios de las órbitas en el modelo de Bohr

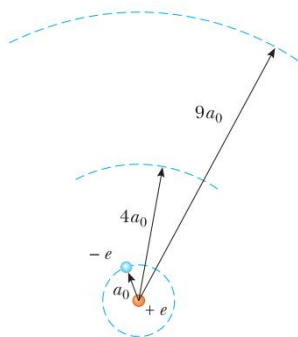
$$r_n = a_0 n^2, \quad n \in \mathbb{N}$$

a_0 es el **radio de Bohr**, es el radio de la órbita más pequeña ($n = 1$).

$$a_0 = 0,0529 \text{ nm}$$

Usando este resultado, podemos ver que

$$E_n = -\frac{kq_e^2}{2a_0} \left(\frac{1}{n^2} \right) = -\frac{13,6}{n^2} \text{ eV}, \quad n \in \mathbb{N}$$



Modelo de Bohr del átomo de Hidrógeno

Niveles de energía del H en el modelo de Bohr

$$E_n = -\frac{13,6}{n^2} \text{ eV} \quad n \in \mathbb{N}$$

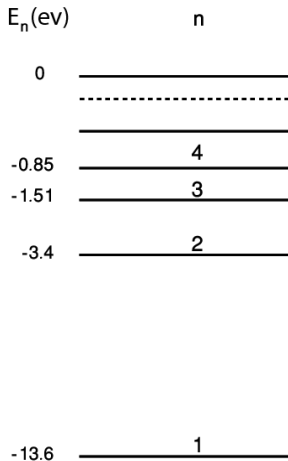
Sólo las energías que satisfagan esta ecuación están permitidas

$$E_1 = -13,6 \text{ eV} \rightarrow \text{Energía del estado fundamental}$$

$$E_\infty = 0 \rightarrow e^- \text{ libre}$$

Ionización= proceso de extraer o eliminar un e^- del átomo \Rightarrow Según modelo de Bohr la energía de ionización del H es de 13.6 eV

Diagrama de niveles de Energía

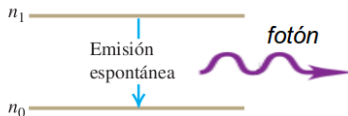
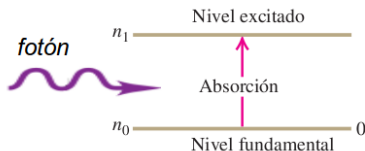


Modelo de Bohr del átomo de Hidrógeno

- Así cuando un e^- hace una transición de una órbita exterior a una interior, emite un fotón de frecuencia

$$f = \frac{E_i - E_f}{h} = \frac{kq_e^2}{2a_0h} \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right)$$

- Igualmente Igualmente, un fotón incidente puede ser absorbido, si tiene una energía igual a la diferencia de energía entre dos estados permitidos.



Modelo de Bohr del átomo de Hidrógeno

Ejemplo 2: Un átomo de H está en su estado fundamental. Sobre el átomo inciden muchos fotones, cada uno con una energía de 10.5 eV. ¿Cuál es el resultado? a) el átomo es excitado a un nivel superior permitido, b) el átomo se ioniza o c) los fotones pasan por el átomo sin interactuar.

Sol. c)

Ejemplo 3: Un átomo de H hace una transición desde el nivel $n=3$ al nivel $n=2$. Después hace una transición del nivel $n=2$ al $n=1$. ¿Qué transición da como resultado la emisión de un fotón con longitud de onda más larga? a) la primera transición, b) la segunda transición o c) ninguna, debido a que las longitudes de onda son las mismas en ambas transiciones.

Sol. a)

Estructura de los sólidos

- En la naturaleza los átomos no se presentan aislados sino que se unen para formar moléculas o sólidos.
- Las moléculas pueden existir como entidades separadas en gases (H_2 , N_2 , O_2 , ...), o pueden agruparse para formar líquidos o sólidos.
- Las fases de la materia: gas, líquido y sólido, resultan de la fuerza relativa con que se atraen las moléculas y de la energía térmica de dichas moléculas.
- Si un líquido es enfriado lentamente, las moléculas (o iones) se pueden disponer en *estructuras cristalinas ordenadas*, alcanzando un mínimo de energía interna.
- Si el enfriamiento es rápido, el sólido resultante es frecuentemente no cristalino, y se llama sólido amorfo (ejemplo vidrio de las ventanas).

Estructura de los sólidos

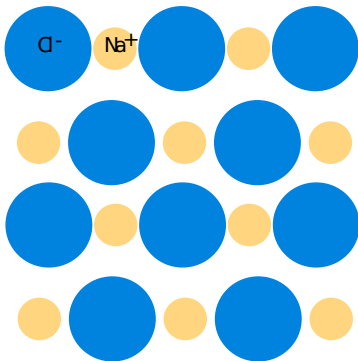
- Las propiedades de los sólidos están originadas por la composición química y la forma de enlace de los materiales.
- Por ejemplo, una propiedad eléctrica como la conductividad se debe a la estructura atómica (concretamente a distribución de e^- en las orbitales exteriores). Usando esta propiedad, los materiales sólidos se pueden clasificar en **conductores, aislantes y semiconductores**.
- Buscamos entender comportamientos de los semiconductores, ya que en ellos se basa la descripción de la mayoría de los dispositivos electrónicos.
- Para entender las propiedades de los semiconductores debemos comprender su composición química y la estructura electrónica de los enlaces que los conforman.

Enlaces en los sólidos

Enlace iónico

Formación de red cristalina (*ejemplo NaCl*): un átomo (*Na*) cede el e^- de su última capa a otro átomo (*Cl*), resultando que el cristal está formado por iones del tipo positivos y negativos (Cl^- y Na^+) que tienden a atraerse electrostáticamente.

- Este tipo de enlace es frecuente en muchos **aislantes**.
- No existen e^- libres (Polietileno, PVC, Silicona, etc.)
- Los e^- están fuertemente ligados a los núcleos de los átomos.
- Si aplicamos un campo eléctrico, no habrá apenas corriente al no existir cargas libres

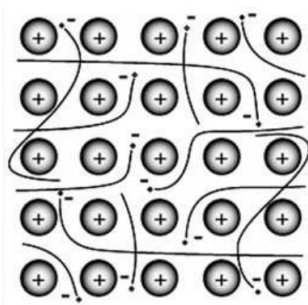


Enlaces en los sólidos

Enlace metálico

La última capa energética del átomo de un metal esta parcialmente llena con e^- débilmente ligados que se pueden liberar con facilidad, formando una nube electrónica que sirve de unión entre los núcleos atómicos. La red cristalina se mantiene por la interacción entre los núcleos atómicos positivos y los e^- que los rodean.

- Los conductores (metales) se caracterizan por tener un gran número e^- libres (Cu, Al, etc.)
- En un metal la capa más exterior está parcialmente llena.
- Tienen una nube de e^- libres a casi todas las temperaturas.
- Los metales alcalinos (Li, K, Na...) tienen sólo un e^- en su ultima capa, que esta ligado débilmente.

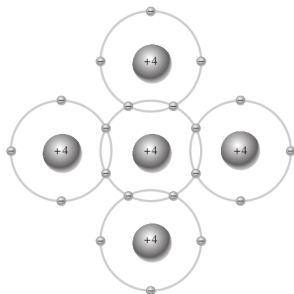


Enlaces en los sólidos

Enlace covalente

Dos o más átomos comparten sus e^- . Por ejemplo, en el silicio (Si) cada átomo de la red cristalina, comparte sus 4 e^- en la última capa con sus 4 átomos vecinos

- Como en enlace iónico, no existen e^- libres en la red cristalina, por esta razón materiales como el Si, Ge, diamante son buenos aislantes.
- Sin embargo esto solo ocurre a una red cristalina ideal a 0 K.
- Un e^- puede ser excitado fuera del enlace covalente y por lo tanto estar libre para participar en la conducción de corriente.

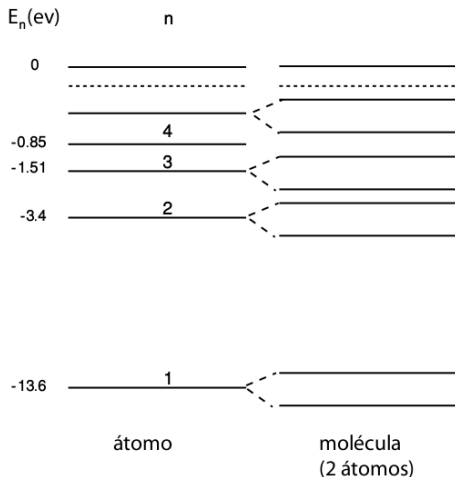


Semiconductores \Rightarrow enlace covalente

Bandas de energía en los sólidos

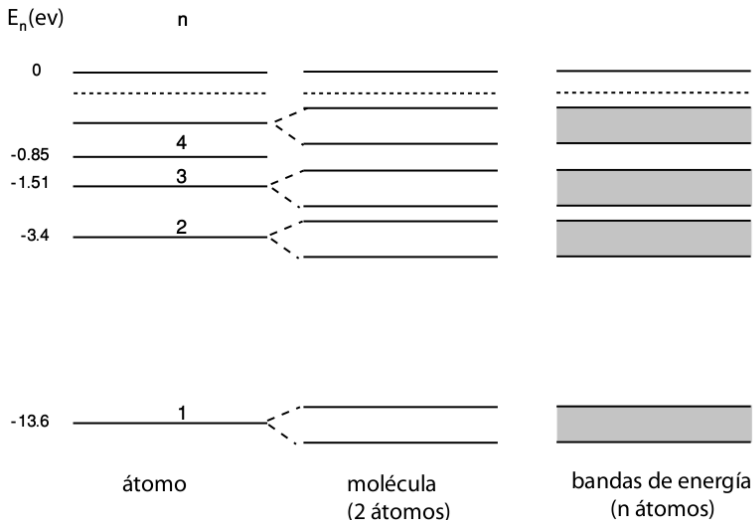
- Cuando 2 átomos de H, se juntan para formar una molécula H_2 , sus órbitas exteriores se dividen

- Este desdoblamiento de los niveles de energía ocurre en un forma similar en todos los átomos (independientemente de su número de e^-)



Bandas de energía en los sólidos

También sucede cuando un gran número de átomos se unen, como es el caso de los sólidos con enlace covalente ($\sim 10^{23}$ átomos/cm³).



Bandas de energía en los sólidos

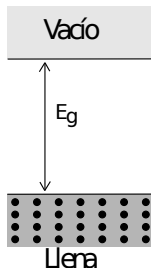
- Un sólido cristalino tiene un número considerable de bandas de energía que proviene de los diferentes orbitales atómicos
- Entre dichas bandas de energía permitidas surgen bandas donde no existen ningún estado: bandas prohibidas.
- **Banda de valencia (BV):** el más alto de los intervalos de energía electrónicas (o bandas) que se encuentra ocupado por electrones.
- **Banda de conducción (BC):** la banda de energía electrónicas que está por encima de la banda de valencia
- **Para que haya conducción de corriente en una banda debe haber estados vacantes a los que los e^- puedan acceder.**

Bandas de energía en los sólidos

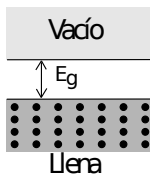
- Este modelo de bandas explica satisfactoriamente la existencia de conductores, semiconductores y aislantes.

Aislante

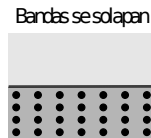
A $T=0$ K, la BV y BC están separadas por una amplia banda prohibida. Todos los niveles de BV están ocupados, la banda está llena y no contribuye a la conducción, y la BC está vacía. *En el aislante ideal la intensidad de corriente es nula para cualquier tensión aplicada.*



a) Aislante



b) Semiconductor



c) Metal

Bandas de energía en los sólidos

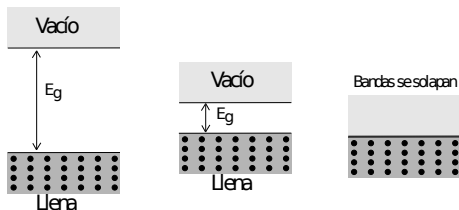
Semiconductor

A $T=0$ K tiene estructura parecida al aislante.

- La diferencia de entre semiconductores y aislantes es el tamaño, E_g de la banda prohibida que es mucho menor.

- Esto permite el paso de e^- de la BV a la BC mediante excitación térmica u óptica.

- A $T=0$ K la BV está completa y la BC vacía, \rightarrow se comporta como un aislante, pero al ser pequeña la anchura de la banda prohibida, al aumentar la temperatura cada vez más e^- adquieren la energía suficiente para superarla y el material aumenta su conductividad.

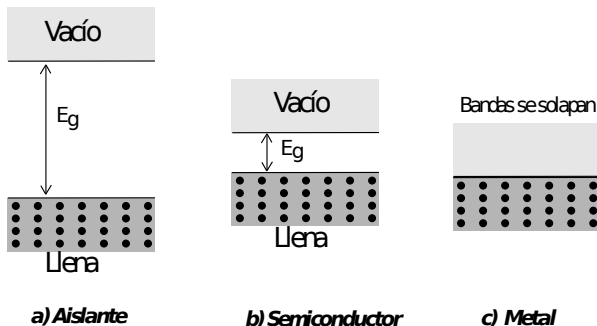


Bandas de energía en los sólidos

Metales

Las BV y de BC prácticamente se solapan, de manera que la banda prohibida prácticamente desaparece.

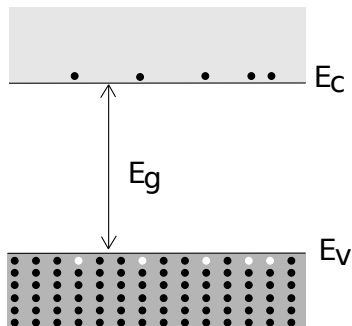
Surgen pues niveles desocupados para los electrones, que pueden moverse bajo la influencia de un campo eléctrico establecido, lo que explica la alta conductividad de los metales.



Semiconductores

Electrones y Huecos en un Semiconductor

- Al aumentar la T , algunos e^- en la BV adquieren suficiente energía para que sean excitados hacia la BC saltando la banda prohibida.
- Aparecen e^- en la BC que originariamente estaba vacía, dejando estados desocupados en la BV. Estos estados desocupados que se producen en la BV se les llama **huecos**.
- Si se aplica un campo eléctrico, el hueco puede ser ocupado por otro e^- de valencia, que deja, a su vez, una nueva vacante en la región donde estaba (otro hueco).
- Este efecto es equivalente al de una carga $+e$ moviéndose en la dirección del campo eléctrico.



Semiconductores

- El paso de un e^- a la BC produce un **hueco** en la BV, al que se considera como un portador de carga positiva que contribuye a la conducción.

El concepto de hueco como partícula cargada es un artificio que permite describir de forma sencilla el complejo movimiento de los e^- de valencia en una capa incompleta.

La corriente que existe en un semiconductor es debida al movimiento de electrones y de huecos (**portadores de carga**).

Recombinación

Ocurre que un e^- de BC pierde energía y ocupa un hueco en la BV

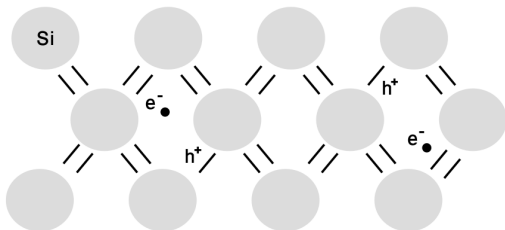
Semiconductor intrínseco

- Elementos semiconductores (ej. Si o Ge) cuando estos están formados por una red cristalina, sin imperfecciones o impurezas se les llama **semiconductor intrínseco o puro**.
- A $T = 0\text{ K}$ la BV está llena y la BC vacía \rightarrow a bajas temperaturas los semiconductores tienen propiedades de los aislantes.
- A temperaturas superiores se generan pares de electrón-hueco (aun la conducción muy pobre!!)
- Los semiconductores puros (intrínsecos) son relativamente poco interesantes
 - ▶ De sólo un elemento: silicio, germanio y carbón.
 - ▶ Compuestos: arseniuro de galio y el fosfuro de indio

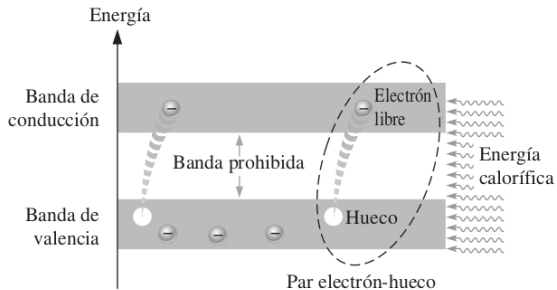
Semiconductor intrínseco

- Gráficamente la creación de pares de electrón-hueco se puede visualizar considerando la ruptura de enlaces covalentes.
- Cuando se rompe un enlace, el e^- es libre para viajar por el cristal, éste es un e^- de conducción y el enlace roto es un hueco.
- Como los e^- y huecos se crean en pares, la concentración de e^- en la BC, n , es igual a la concentración de huecos en la BV, p así para un semiconductor intrínseco se cumple

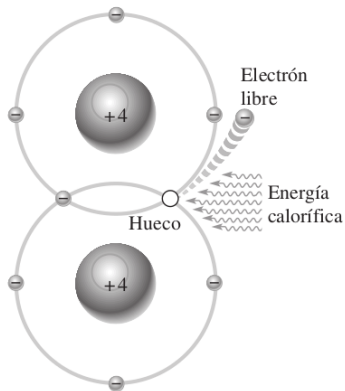
$$n = p$$



Semiconductor intrínseco



(a) Diagrama de energía



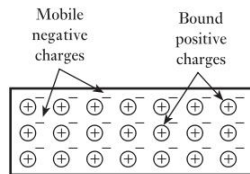
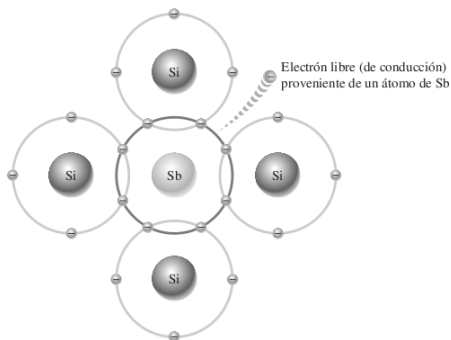
(b) Diagrama de enlaces

Semiconductor extrínseco

- **Dopado** = Inclusión de pequeñas de impurezas en un semiconductor
- Con el dopado la conductividad puede cambiar dramáticamente
- **Impureza** = Otros átomos distintos a los del elemento base que se pueden incluir en la red cristalina
- Existen dos tipos de semiconductores extrínsecos o dopados, los del tipo N (se aumenta la concentración de e^-) y los del tipo P (se aumenta la concentración de huecos). En ambos casos $n \neq p$.
- Al añadir impurezas se crean nuevos niveles de energía en la estructura de bandas, normalmente dentro de la banda prohibida.
- Un semiconductor dopado es neutro, si una carga se mueve, deja una una región del cristal cargada de signo opuesto!!

Semiconductor extrínseco tipo *N*

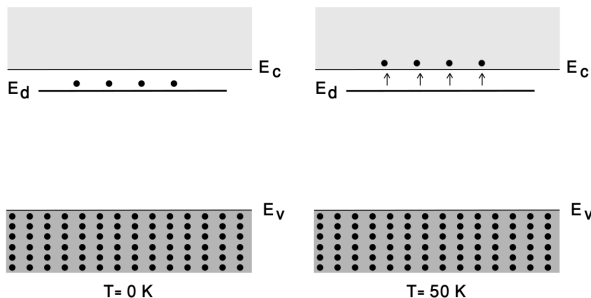
- Generación de un e^- libre mediante la introducción de una impureza **donadora** en una red cristalina de Si o Ge.
- Dopados con elementos pentavalentes, columna V de la tabla periódica (P, As y Sb)
- Se origina un aumento controlado de e^- libres
- Aumenta la conductividad
- Portadores de carga mayoritarios: e^-



(b) *n*-type semiconductor

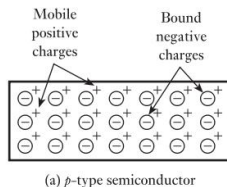
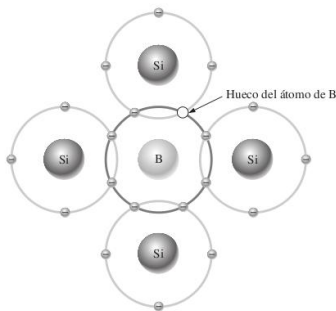
Semiconductor extrínseco tipo N

- Una impureza donadora introduce un nivel de energía, E_d , muy cerca de la BC de la BC
- Este nivel está lleno con e^- a 0 K, y con poca energía térmica los e^- se pueden excitar y pasar a la BC. Entorno a 50-100 K, todos los e^- de este nivel, introducido por la impureza, han sido *donados* a la BC.
- Semiconductor de tipo N se caracteriza porque la concentración de e^- será mucho mayor que la de huecos, $n \gg p$.



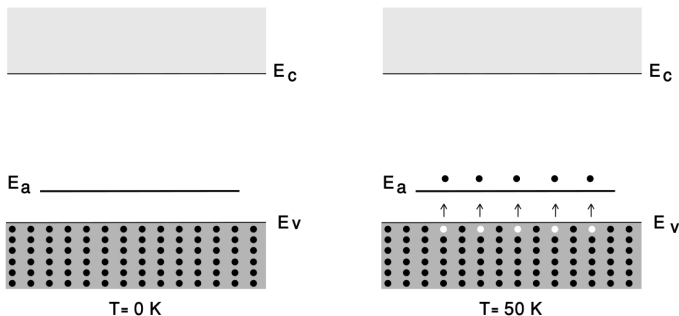
Semiconductor extrínseco tipo *P*

- Generación de un hueco mediante la introducción de una impureza **aceptora** en una estructura de Si o Ge.
- Dopados con elementos trivalentes (de la columna III : B, Ga ...)
- Se origina un aumento controlado de huecos y por lo tanto aumenta la conductividad
- Portadores de carga mayoritarios: huecos



Semiconductor extrínseco tipo P

- Impureza aceptora introduce niveles energéticos, E_a , cerca de la BV.
- Estos niveles están vacíos a 0 K, pero a bajas temperaturas los e^- pueden ser excitados desde la BV hacia este nivel introducido por la impureza, creando así huecos en la BV.
- Ya que el nivel introducido por esta impureza *acepta* e^- de la BV, se le suele llamar impureza aceptora o aceptadora.
- En un semiconductor extrínseco tipo P ocurre que $p \gg n$.



Dispositivos semiconductores

- Combinaciones de zonas tipo P y tipo N
- Explotan la existencia de diferentes portadores de carga
- Su comportamiento eléctrico puede ser no lineal, asimétrico y controlable eléctricamente