

Profesor: Dr.-Ing. Paola Vega Castillo

Capítulo 1. Fundamentos de Semiconductores

➤ Introducción

Los semiconductores son el material base con el cual se construyen los elementos activos. Conviene en este momento recordar la clasificación de elementos en elementos pasivos y activos, para comprender el objeto de estudio de este curso.

Elementos activos son aquellos que cumplen alguna de las siguientes características:

- Pueden otorgar energía en un tiempo infinito, como ejemplo de estos elementos se tiene básicamente a las fuentes de tensión y corriente.
- Permiten la amplificación de voltaje o corriente. Como ejemplo de este caso se tiene a los transistores.

Por otra parte, los elementos pasivos son aquellos que:

- No pueden otorgar energía en un tiempo infinito, sino sólo consumirla o almacenarla durante un tiempo limitado.
- No permiten la amplificación de voltaje o corriente.

En este curso se estudiarán los elementos activos más importantes, así como otros dispositivos electrónicos basados en semiconductores. Además se presentará un resumen de los conceptos básicos de física de semiconductores, así como de los principales dispositivos basados en estos materiales y sus aplicaciones básicas. Así mismo, se discutirá la fabricación de circuitos integrados y el flujo de diseño físico de circuitos analógicos (flujo analógico de back-end).

1.1 Estructura atómica

El átomo posee un núcleo en el cual se concentran los protones y los neutrones, y una nube electrónica, en la cercanía del núcleo, en la cual se encuentran los electrones. Esta nube electrónica es en realidad una organización espacial de los electrones caracterizada por niveles de energía, los cuales se representan con el número cuántico principal n . El número cuántico principal indica la energía del nivel y la distancia de este nivel con respecto al núcleo.

Estos niveles de energía contienen orbitales, los cuales son regiones de alta probabilidad de encontrar al electrón. Los orbitales son zonas espaciales cuya

forma está descrita por las soluciones de la ecuación de Schrödinger. La orientación de dichos orbitales en el espacio está dada por el número cuántico magnético m . El cuarto y último número cuántico, el spin, está relacionado con la rotación del electrón sobre su propio eje.

De acuerdo con el principio de exclusión de Pauli, los electrones de un átomo ocupan estados electrónicos -descritos por los cuatro números cuánticos- de forma tal que dos electrones no ocupan un mismo estado electrónico, es decir, no existen electrones que tengan los mismos números cuánticos. Este principio, junto con el principio de construcción (Aufbau Prinzip) determina la forma en que se ocupan los estados electrónicos definidos por los números cuánticos. El principio de construcción establece que los electrones ocupan primero los niveles de menor energía, dado que éstos son los niveles más estables.

De acuerdo con estos números, los electrones se han ordenado en la tabla periódica de los elementos. En esta pueden distinguirse, entre muchas otras formas de clasificación de los elementos, la división de los elementos en metales, metaloides y no metales. De los elementos de la tabla periódica interesa, para los objetivos de este curso, los elementos metálicos y metaloides de los grupos II, III, IV, V y VI, pero especialmente aquellos del grupo IV.

1.2 Modelo de bandas de energía

Cuando los átomos se aproximan unos a otros, la energía de los niveles individuales se modifica de manera que los electrones del material obedezcan al principio de exclusión de Pauli. Este fenómeno se conoce como desdoblamiento de los niveles de energía. Este desdoblamiento, es decir, reorganización de niveles de energía debido a la proximidad de átomos, da origen a dos bandas de energía: la banda de valencia y la banda de conducción, separadas por una banda prohibida en la cual no existen estados electrónicos que puedan ser ocupados por los electrones.

La banda de valencia es el estado de energía más alto que está lleno a cero grados Kelvin. Por otra parte, la banda de conducción, está vacía a cero grados Kelvin. Para que un electrón participe en el proceso de conducción, debe contar con una energía mínima que está dada por la energía del límite inferior de la banda de conducción.

La banda de valencia y la banda de conducción están separadas por un rango de energía sin estados electrónicos asociados; este rango de energía se conoce como la banda prohibida.

Los electrones en la banda de valencia no participan en el proceso de conducción. Se requiere entonces aplicar una energía mínima igual a la de la banda prohibida para lograr que un electrón de la banda de valencia pase a la banda de conducción y participe en el proceso de conducción.

1.3 Clasificación de los materiales

La clasificación de los materiales según su conductividad eléctrica se deriva del modelo de bandas de energía, ya que la relación de estas tres bandas determina las características eléctricas, ópticas y térmicas del material. Los materiales pueden clasificarse, de acuerdo con su conductividad eléctrica, en tres tipos:

a) Aislantes:

Los aislantes se caracterizan por tener electrones fuertemente ligados al núcleo, a los cuales se les debe aplicar una gran cantidad de energía para desligar al electrón del núcleo de manera que éste pueda participar en el proceso de conducción eléctrica, es decir, se requiere mucha energía para mover un electrón de la banda de valencia a la banda de conducción. Estos materiales presentan, por lo tanto, una baja conducción eléctrica.

En el caso de los materiales aislantes, la banda prohibida es del orden de los 8-9 eV. Ejemplos de estos materiales son el dióxido de silicio (SiO_2) y el nitruro de silicio (Si_3N_4), como dos aislantes de gran importancia en la microelectrónica, así como el diamante.

El electrón-Volt (eV) es una medida de energía que equivale a $1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$.

b) Semiconductores:

Estos materiales se caracterizan por poseer una conductividad media. Se caracterizan por formar enlaces covalentes y obedecen a la regla del octeto, que establece que el número de átomos vecinos de un átomo está dado por $8-N$, donde N es el número de valencia del elemento. Con esto, se ocupan los estados electrónicos de valencia, logrando llenar el último subnivel y alcanzando una configuración estable. En los gases, esta configuración corresponde a la configuración de gas inerte.

Una característica clave de los materiales semiconductores es la posibilidad de controlar la resistividad del material mediante el proceso conocido como dopado, el cual se definirá más adelante. Esta característica es la base del desarrollo de la electrónica de estado sólido.

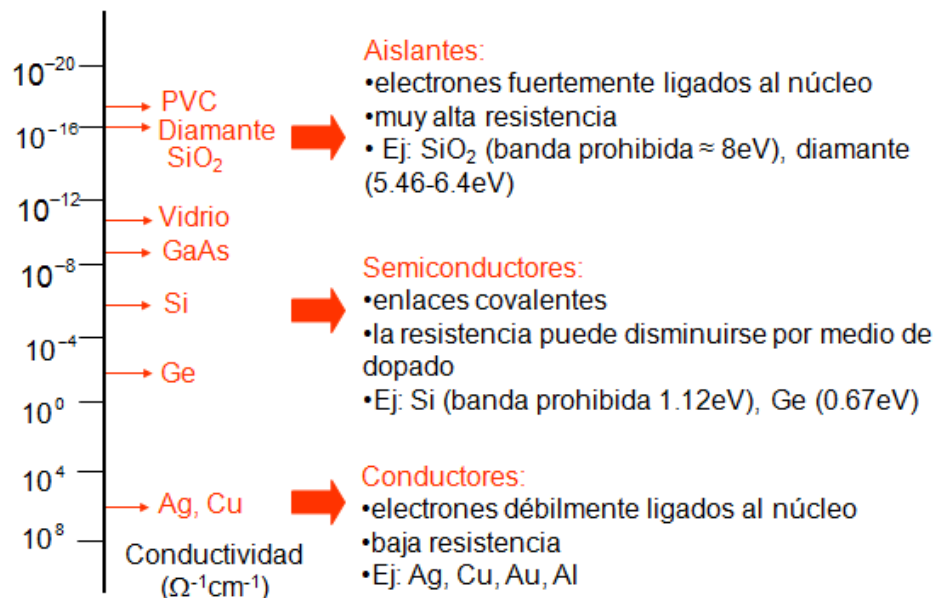
En los materiales semiconductores, existe una banda prohibida del orden 1-3 eV. Entre estos materiales, el silicio tiene una banda prohibida de 1,12 eV. El silicio y el germanio son ejemplos de materiales semiconductores.

c) Conductores:

En los conductores los electrones de valencia están débilmente ligados al núcleo, de manera que requieren de muy poca energía para contribuir al proceso de conducción eléctrica. Esto hace que los conductores posean una alta conductividad. Se dice que los metales son, en realidad, un arreglo de cationes sumergido en un mar de electrones. Estos electrones son los electrones de valencia, los cuales son sumamente móviles, y requieren de poca energía para cambiar su posición manteniendo unido el sólido. Esta es la razón por la cual los metales son dúctiles: en la deformación del material los electrones se redistribuyen logrando una configuración estable que mantiene el sólido. Por el contrario, los semiconductores son quebradizos, dado que en la deformación del material se rompen enlaces covalentes, logrando la separación del sólido, pues los enlaces covalentes son muy direccionales, y los electrones no son tan móviles para redistribuirse logrando mantener el sólido unido.

En los materiales conductores la separación entre bandas de valencia y conducción es muy pequeña, cero, o bien existe un traslape de bandas. Es decir, la banda prohibida es prácticamente inexistente o del todo no existe.

Ejemplo de estos materiales son, en orden decreciente de conductividad: la plata, el cobre, el oro y el aluminio.



*Nota: 1eV= 1.6x10⁻¹⁹J

Figura 1. Clasificación de los materiales según su conductividad

1.4 Cristalinidad

De acuerdo con el grado de ordenamiento de los átomos de un material sólido (cristalinidad), los materiales pueden clasificarse en amorfos, policristalinos y cristalinos.

En los sólidos amorfos, los átomos están dispuestos sin seguir ningún orden en particular. No puede distinguirse ningún patrón de ordenamiento.

Los sólidos policristalinos presentan una estructura regular por tramos, es decir, pueden distinguirse patrones de ordenamiento por regiones. Sin embargo, estos patrones de ordenamiento no se extienden a todo el material.

En cambio, en los sólidos cristalinos los átomos siguen una estructura de ordenamiento regular en todo el material.

El grado de cristalinidad determina tanto las propiedades del material como su aplicación.

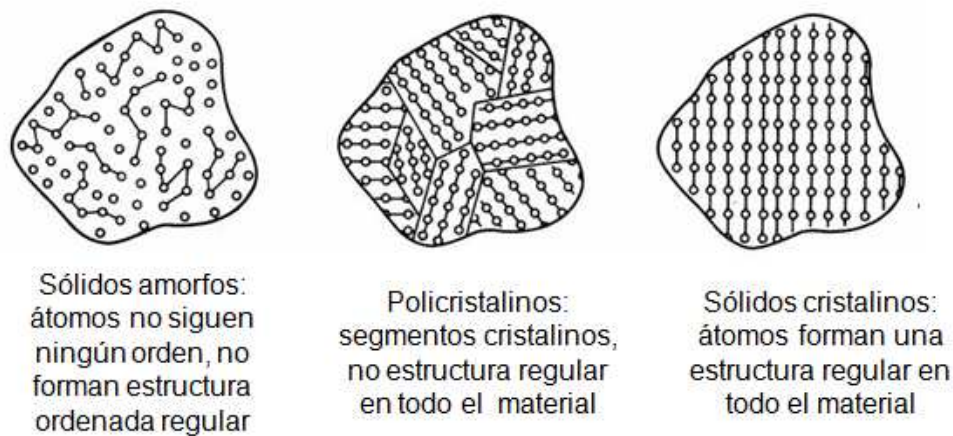


Figura 2. Clasificación de materiales según su grado de cristalinidad

1.5 Semiconductores

Los elementos semiconductores más importantes son el silicio y el germanio, del grupo IV de la tabla periódica, siendo el silicio uno de los elementos más abundantes en la naturaleza.

También existen semiconductores compuestos binarios, terciarios y cuaternarios. Los semiconductores binarios se componen de los elementos de los grupos III y V o II y VI o bien se utiliza la mezcla *SiGe* (Silicio-Germanio). El arseniuro de galio (*GaAs*), es el compuesto binario de mayor aplicación en la industria microelectrónica.

Existen también compuestos semiconductores ternarios y cuaternarios tales como *AlGaAs* y *InGaAsP*, además de aleaciones como $Al_xGa_{1-x}As$ y $Ga_xIn_{1-x}As_{1-y}P_y$. Estos materiales semiconductores se utilizan en la fabricación de circuitos

integrados, diodos emisores de luz (LED), dispositivos láser y detectores lumínicos.

El silicio y el germanio tienen una estructura cristalina del tipo *fcc* (*faced-centered cubic*), es decir, cúbica centrada en las caras. Puesto que el diamante presenta la misma estructura, la estructura *fcc* se conoce como “estructura de diamante”.

El arseniuro de galio (GaAs) presenta también una estructura *fcc*, que se diferencia de la estructura del diamante por el hecho de incluir dos tipos de átomos (Ga y As). Esta estructura se conoce como estructura de zinc blenda (zinc blende).

El silicio cristalino posee una estructura de número de coordinación 4, es decir, cada átomo está rodeado por cuatro átomos con los cuales forma enlaces covalentes con los cuatro electrones de valencia, según la regla del octeto.

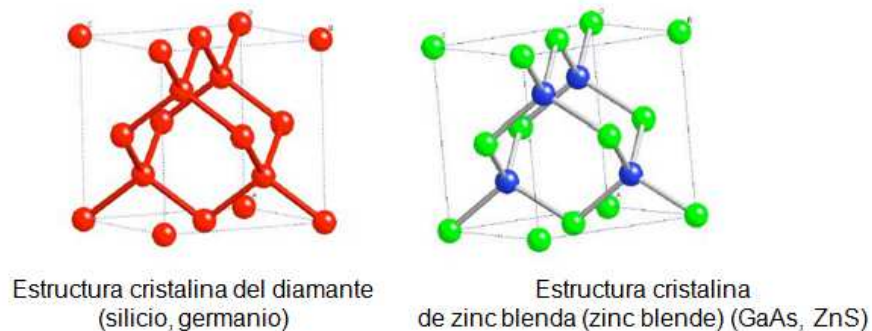


Figura 3. Estructuras cristalinas más comunes en los semiconductores

1.6 Generación y Recombinación

A cero grados Kelvin, la estructura cristalina está totalmente quieta y no existen electrones libres. Conforme la temperatura aumenta, la energía térmica causa vibración de la estructura cristalina, lo cual rompe algunos enlaces, excitando (liberando) electrones que pueden contribuir al flujo de corriente. Al romperse un enlace se crea una vacante en el material debido a la ausencia del electrón excitado en el enlace. Esta vacante se conoce como hueco.

Los electrones y huecos interactúan en el semiconductor, dando lugar a un flujo de corriente. Los dos procesos básicos de interacción son la generación y la recombinación.

El proceso de generación consiste en la transición de un electrón de la banda de valencia a la banda de conducción. Esto genera un hueco (vacante) en la banda de valencia, dando lugar a la creación de pares electrón-hueco. La energía mínima para el proceso de generación es la energía de la banda prohibida.

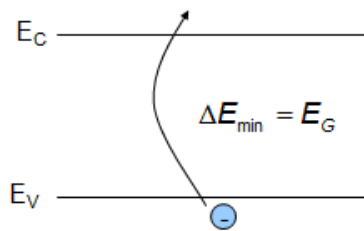


Figura 4. Proceso de generación

El proceso de recombinación consiste en la transición de un electrón de la banda de conducción a la banda de valencia. Con esto un hueco es ocupado por un electrón, de manera que el hueco se elimina de la banda de valencia, es decir, hay una aniquilación de pares electrón-hueco.

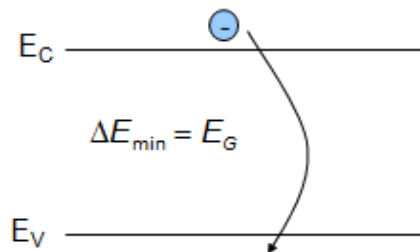


Figura 5. Proceso de recombinación

Los procesos de recombinación y generación pueden originarse por luz o calor. En el caso de estímulos lumínicos, estos procesos se conocen como fotogeneración y fotorecombinación, respectivamente. En el caso de estímulos térmicos, los términos correspondientes son generación térmica directa y recombinación térmica.

1.7 Dopado

Como se mencionó anteriormente, la característica clave de los semiconductores es la posibilidad de variar su conductividad por medio de la introducción de impurezas en el material. Este proceso se conoce como dopado.

Se puede distinguir entre dos tipos de semiconductores:

- Intrínsecos, o semiconductores puros.
- Extrínsecos, o semiconductores dopados.

El dopado consiste en tomar un material intrínseco e introducir intencionalmente impurezas. Las impurezas se conocen como especies dopantes, y son, simplemente, átomos de un material diferente al intrínseco.

Al incorporarse en la estructura cristalina, los átomos dopantes reemplazan átomos del material intrínseco, por lo que estos átomos se conocen como impurezas sustitucionales. El material resultante, que es un material dopado, se conoce como extrínseco.

Existen dos tipos de especies dopantes: donadores y aceptores.

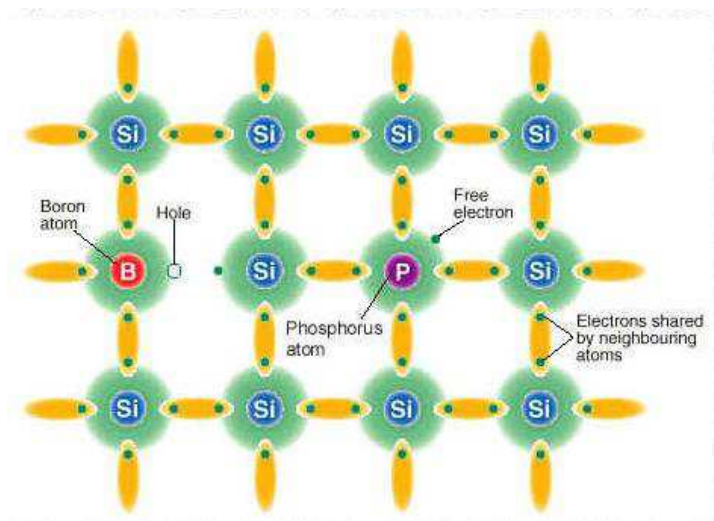


Figura 6. Concepto de dopado

Las especies dopantes donadoras son aquellos elementos que tienen más electrones de valencia que los necesarios para establecer enlaces con sus átomos vecinos más próximos en el material intrínseco. Ejemplos de estos elementos son el arsénico (As), el fósforo (P) y el antimonio (Sb), los cuales tienen 5 electrones de valencia. Al incorporar un átomo de estos elementos en el silicio, el donador establece 4 enlaces covalentes con los 4 átomos de silicio más próximos. Puesto que el donador tiene 5 electrones de valencia pero requiere sólo 4 de ellos para formar los enlaces covalentes para incorporarse a la estructura cristalina, el quinto electrón queda débilmente ligado al átomo dopante y puede, adquiriendo poca energía, contribuir al flujo de corriente. Es decir, la especie donadora efectivamente dona un electrón para la conducción eléctrica.

Las especies aceptoras son aquellos elementos que tienen menos electrones de valencia que los necesarios para establecer enlaces con sus átomos vecinos más próximos en el material intrínseco. Ejemplos de estos elementos son el boro (B) y el indio (In), los cuales tienen 3 electrones de valencia. Cuando un átomo aceptor se incorpora en el silicio, el aceptor establece 3 enlaces covalentes con 3 átomos de silicio. Ya que el aceptor tiene 3 electrones de valencia pero tiene 4 átomos de silicio vecinos, existe un enlace faltante, dado que falta un electrón para formar el enlace. Esto es lo que se conoce como hueco. Así, el átomo aceptor contribuye con un hueco que puede aceptar un electrón durante el proceso de conducción. De ahí el nombre de aceptor.

De acuerdo con el tipo de dopado, puede distinguirse entre dos tipos de semiconductores extrínsecos, a saber:

- Semiconductor tipo n , dopado con donadores.
- Semiconductor tipo p , dopado con aceptores.

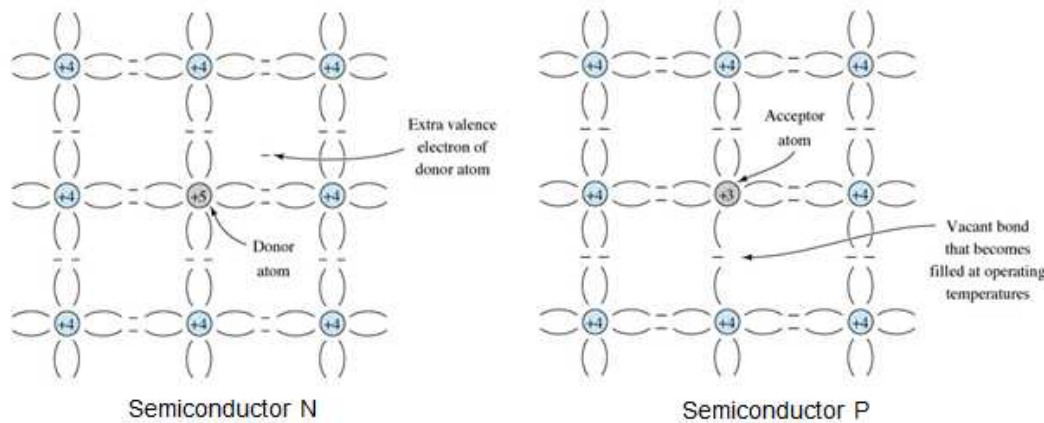


Figura 7. Tipos de dopado

En cualquiera de los dos casos, el dopado no altera la neutralidad eléctrica del material semiconductor.

La introducción de donadores crea nuevos estados electrónicos en la muestra, los cuales se encuentran en la banda prohibida cercanos a la banda de conducción y a cero absoluto están ocupados por electrones. Conforme aumenta la temperatura, estos electrones pueden ganar suficiente energía para pasar a la banda de conducción, aumentando la cantidad de electrones libres en la muestra. La energía de ionización de los donadores en el silicio es mucho menor que la energía necesaria para el proceso de generación. De esta manera, a temperatura ambiente el dopado con donadores aumenta la cantidad de electrones libres en la banda de conducción.

Al introducir aceptores en un semiconductor intrínseco se crean nuevos estados electrónicos en la muestra, los cuales se encuentran en la banda prohibida cercanos a la banda de valencia y se encuentran vacíos a la temperatura de cero absoluto. Conforme aumenta la temperatura, electrones de la banda de valencia pueden ganar suficiente energía para ocupar estos estados electrónicos, aumentando la cantidad de huecos en la muestra. La energía de ionización de los aceptores en el silicio es mucho menor que la energía necesaria para el proceso de generación. De esta manera, a temperatura ambiente el dopado con aceptores aumenta la cantidad de huecos en la banda de valencia.

1.8 Portadores de carga

Existen dos tipos de portadores de carga: electrones (libres) y huecos. En un semiconductor extrínseco, se distingue entre portadores mayoritarios y portadores minoritarios, con base en la concentración de portadores.

Los portadores mayoritarios son aquellos que están presentes en mayor número en el semiconductor, es decir, huecos en semiconductores p y electrones en semiconductores n .

Los portadores minoritarios son aquellos que están presentes en menor número en el semiconductor, es decir, electrones en semiconductores p y huecos en semiconductores n .

Aquí conviene aclarar el origen de los portadores minoritarios. Es necesario recordar que debido a la energía térmica, se crea una cantidad necesaria de pares electrón-hueco en el semiconductor intrínseco. Esto hace que en un semiconductor siempre coexistan los dos tipos de portadores de carga. El dopado únicamente contribuye a aumentar el número de un tipo de portador de carga.

1.8.1 El concepto de hueco

El concepto de hueco es una representación de la banda de valencia con un estado electrónico vacío. El hueco se concibe como una partícula de carga positiva con una magnitud de carga igual a la del electrón y una masa efectiva que es mayor que la del electrón en un factor de 2 a 3. La masa efectiva es una masa equivalente que toma en cuenta el efecto del potencial del cristal en la partícula, sea ésta electrón o hueco. Con el uso de la masa efectiva, la partícula puede tratarse como si fuera una partícula libre en el vacío. El efecto de los átomos del cristal (potencial del cristal) en la partícula se considera tomando la masa efectiva de la partícula para realizar los cálculos. La masa efectiva tiene importantes consecuencias en la movilidad de los portadores de carga, como se discutirá más adelante.

Mientras que los electrones se mueven en la banda de conducción durante la conducción eléctrica, los huecos se mueven en la banda de valencia durante este proceso.

1.8.2 Corriente de huecos

El flujo de corriente en un semiconductor se debe al movimiento de carga libre, sean estos electrones o huecos. En el caso de la corriente de huecos, los electrones y los huecos interactúan para lograr un flujo de corriente.

Cuando un electrón se recombina con un hueco, deja una vacante en otro punto de la red cristalina, es decir, generó un hueco en otra parte del material. Cuando otro electrón ocupa este hueco generado, dejó, igualmente que el primer electrón, una vacante (hueco) en otro punto del semiconductor. Esto puede verse como un desplazamiento de hueco a través del material, dando lugar a una corriente de huecos.

Puesto que el hueco se define como una partícula de carga positiva, la corriente de huecos tiene la misma dirección que la corriente técnica.

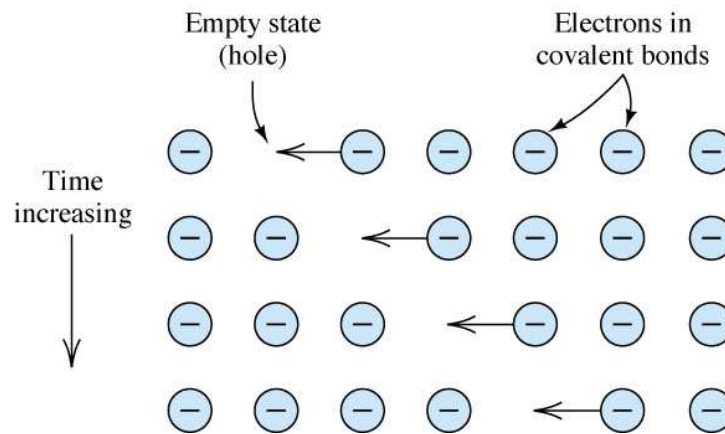


Figura 8. Corriente de huecos

1.9 Nivel de Fermi

Uno de los conceptos más importantes de la teoría de bandas es el nivel de Fermi. Este se define como el nivel de energía en el cual la posibilidad de ocupación de un estado electrónico es de 50%.

La probabilidad $f(E)$ de ocupación de un estado electrónico en función de la energía E se describe matemáticamente con la distribución de Fermi-Dirac, la cual establece que:

$$f(E) = \frac{1}{1 + e^{\frac{E - E_F}{kT}}}$$

donde E_F denota el nivel de Fermi, k es la constante de Boltzmann y T es la temperatura en grados Kelvin.

La posibilidad de ocupación varía con la temperatura, siendo para $0K$ una función rectangular tal que:

$$f(E) = \begin{cases} 1 & \text{para } E < E_F \\ 0 & \text{para } E > E_F \end{cases}$$

Se cumple siempre que, independientemente de la temperatura, $f(E_F) = \frac{1}{2}$

El nivel de Fermi está íntimamente ligado a la concentración de portadores de carga libres en el semiconductor.

El nivel de Fermi del silicio intrínseco se encuentra aproximadamente a la mitad de la banda prohibida, como se muestra en la figura 9.

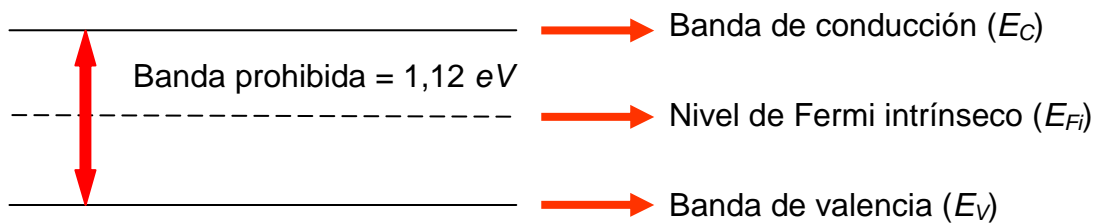


Figura 9. Diagrama de bandas de energía del silicio intrínseco

La introducción de impurezas donadoras en el semiconductor crea nuevos estados electrónicos cuya energía es cercana a la de la banda de conducción, por lo cual, el nivel de Fermi extrínseco se desplaza a una energía mayor que la del nivel de Fermi intrínseco, como muestra la figura 10.

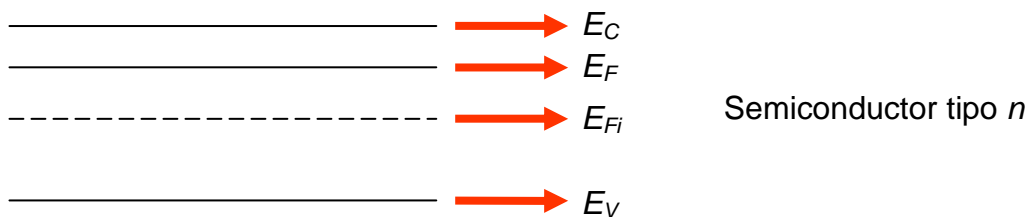


Figura 10. Diagrama de bandas de un semiconductor n

Similarmente, al introducir impurezas aceptoras se crean nuevos estados electrónicos cuya energía es, en este caso, cercana a la banda de valencia, por lo que el nivel de Fermi extrínseco se desplaza a una energía menor que la del nivel de Fermi intrínseco, como se muestra en la figura 11.

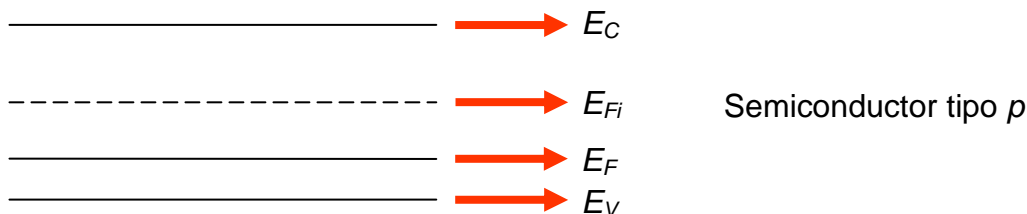


Figura 11. Diagrama de bandas de un semiconductor p

La concentración de portadores de carga está determinada por la ley de acción de masas, que establece que en un semiconductor no degenerado el producto de la concentración de electrones y huecos es igual al cuadrado de la concentración intrínseca de portadores de carga. Es decir:

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

donde n_i es la concentración de portadores de carga en el semiconductor intrínseco en cm^{-3} , p es la concentración de huecos (cm^{-3}), y n es la concentración

de electrones libres (cm^{-3}). En el silicio, la concentración intrínseca de portadores de carga es de $1,45 \times 10^{10} cm^{-3}$.

Se define como un semiconductor degenerado aquel en el cual la diferencia de energía entre el nivel de Fermi y la banda de conducción (semiconductores n) o la banda de valencia (semiconductores p), es estrictamente menor que $3kT$. En semiconductores degenerados, la energía de ionización de las especies dopantes es cero o prácticamente cero. Esto ocurre para niveles de dopado mayores que $10^{18} - 10^{19} cm^{-3}$.

La concentración de portadores de carga y el nivel de Fermi están relacionados como sigue:

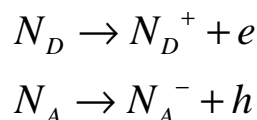
$$n = n_i \cdot e^{\frac{(E_F - E_i)}{kT}} \quad p = n_i \cdot e^{\frac{(E_i - E_F)}{kT}}$$

donde E_i denota el nivel de Fermi del semiconductor intrínseco E_F denota el nivel de Fermi del semiconductor extrínseco.

En el proceso de conducción eléctrica los dopantes se ionizan como sigue:

- Los átomos donadores ceden un electrón, por lo cual se ionizan positivamente.
- Los átomos aceptores aceptan un electrón, por lo cual se ionizan negativamente.

Es decir:



donde N_D es la concentración de donadores, N_A es la concentración de aceptores, e representa un electrón libre y h representa un hueco.

A concentraciones de dopado mucho mayores que la concentración intrínseca de portadores de carga, puede despreciarse el efecto de los portadores mayoritarios intrínsecos y aproximar la concentración de portadores mayoritarios a la concentración del dopado. Así, en materiales p se tiene que la concentración de huecos es aproximadamente la concentración de aceptores:

$$p \approx N_A$$

mientras que la concentración de electrones (portadores de carga minoritarios) está dada por la ley de acción de masas:

$$n = \frac{n_i^2}{p} \approx \frac{n_i^2}{N_A}$$

En materiales n , la concentración de electrones es aproximadamente igual que la concentración de donadores:

$$n \approx N_D$$

y la concentración de huecos (portadores minoritarios) se calcula con la ley de acción de masas, como sigue:

$$p = \frac{n_i^2}{n} \approx \frac{n_i^2}{N_D}$$

El nivel de Fermi de un semiconductor puede expresarse también en términos de voltaje por medio del potencial de Fermi, como sigue:

$$\phi_{Fp} = V_t \ln \left(\frac{n_i}{N_A} \right) \quad \text{potencial de Fermi del semiconductor } p$$

$$\phi_{Fn} = V_t \ln \left(\frac{N_D}{n_i} \right) \quad \text{potencial de Fermi del semiconductor } n$$

donde V_t es el voltaje térmico, dado por:

$$V_t = \frac{kT}{q}$$

El nivel de Fermi y la concentración de portadores de carga dependen de la temperatura. A bajas temperaturas, la energía térmica es insuficiente para ionizar los átomos dopantes, por lo cual la concentración de portadores de carga mayoritarios es menor que la concentración del dopado:

$$p < N_A, \text{ semiconductor } p$$

$$n < N_D, \text{ semiconductor } n$$

A temperaturas medias, por ejemplo, a temperatura ambiente ($25^\circ\text{C} = 300\text{K}$), la energía térmica es suficiente para ionizar todos los átomos dopantes, y el semiconductor se comporta como un semiconductor extrínseco.

A altas temperaturas, el nivel de Fermi se acerca al nivel de Fermi intrínseco, debido a que la energía térmica contribuye a romper un número creciente de enlaces en la red cristalina, generando así un número creciente de pares electrón-hueco, de modo que el dopado tiene cada vez menos influencia en el material. Por esta razón, a altas temperaturas el semiconductor, aunque esté dopado, se comporta como un semiconductor intrínseco. Este comportamiento se manifiesta también en el diagrama de bandas de energía, donde se observa que al aumentar la temperatura el nivel de Fermi se acerca al nivel de Fermi intrínseco. Este acercamiento de niveles con el aumento de la temperatura se produce a mayor temperatura para niveles de dopado altos, pues debe generarse una mayor cantidad de portadores de carga intrínsecos para sobrepasar la cantidad de portadores de carga mayoritarios causada por el dopado.

1.10 Transporte de portadores de carga

La corriente eléctrica consiste en el movimiento de cargas, es decir, electrones, huecos o iones. En semiconductores, los dopantes ionizados son inmóviles y por lo tanto no contribuyen a la conducción, por lo tanto el flujo de corriente se debe a huecos y electrones libres.

Existen dos mecanismos de transporte de portadores de carga:

- Corriente de difusión, debido a gradientes de concentración de portadores de carga.
- Corriente de arrastre, debido a la aplicación de un campo eléctrico.

1.10.1 Corriente de arrastre

La corriente de arrastre está dada por la relación

$$\vec{J}_{drift} = \sigma \cdot \vec{E}$$

donde J_{drift} es densidad de corriente de arrastre, σ es conductividad del material y E es campo eléctrico aplicado.

La conductividad σ está determinada por la concentración de portadores de carga y su movilidad, de acuerdo con la relación

$$\sigma = (qn\mu_e + qp\mu_h)$$

donde q es la carga del electrón, μ_e es la movilidad del electrón [cm^2/Vs] y μ_h es la movilidad del hueco [cm^2/Vs].

El término “corriente de arrastre” se traduce muchas veces del término inglés “drift current” como “corriente de desplazamiento”, o “corriente de deriva”. Sin embargo,

el término “corriente de desplazamiento” se refiere en realidad como aquella corriente originada por una variación de la densidad de flujo eléctrico en el tiempo (dD/dt) en materiales aislantes. Por otra parte, el término “corriente de deriva” sugiere una corriente sin dirección definida, por lo que en este texto se utiliza el término “corriente de arrastre” por considerarse más apropiado, ya que refleja el hecho de que el campo eléctrico determina la magnitud y dirección de esta corriente.

La conductividad σ depende de la movilidad y la concentración de portadores de carga. La movilidad relaciona el campo eléctrico y la velocidad de arrastre según la siguiente ecuación:

$$\vec{V}_d = \mu \cdot \vec{E} \quad \text{para } |E| < 3 \times 10^3 \frac{V}{cm}$$

donde v_d es la velocidad de arrastre de los portadores de carga [cm/Vs], E es campo eléctrico [V/cm] y μ es movilidad [cm^2/Vs].

En ausencia de un campo eléctrico, el electrón presenta un movimiento térmico aleatorio con una velocidad térmica promedio V_t y un desplazamiento efectivo de cero. Al aplicar un campo eléctrico, el electrón se desplaza con un desplazamiento efectivo diferente de cero y en la dirección determinada por el campo eléctrico.

Esta relación lineal entre velocidad de arrastre y campo eléctrico es válida para magnitudes de campo eléctrico $E < 3 \times 10^3 V/cm$. Para $E > 3 \times 10^3 V/cm$, la velocidad de arrastre permanece constante en $v_d \approx 10^7 cm/s$. Este fenómeno se conoce como saturación de la velocidad.

La movilidad está determinada por varios factores, entre ellos la masa efectiva del portador de carga, dispersión de portadores de carga debido a impurezas del material, y dispersión de portadores de carga causada por la estructura cristalina. Debido a que los huecos tienen una masa efectiva que es 2 a 3 veces mayor que la de los electrones, la movilidad de los huecos es 2 a 3 veces menor que los electrones, es decir, los huecos se desplazan más lentamente que los electrones ante el mismo campo eléctrico aplicado.

La concentración de dopado también afecta la movilidad. A mayor concentración del dopado, menor movilidad, pues aumenta la dispersión debido a impurezas dopantes. La temperatura también disminuye la movilidad, dado que aumenta la vibración en la red cristalina.

1.10.2 Corriente de difusión

El fenómeno de difusión describe flujo de partículas debido a un gradiente de concentración, según la ley de Fick,

$$F = -D \nabla \eta$$

La densidad de corriente de difusión para electrones y huecos se expresa como:

$$J_{diff,n} = q \cdot D_n \cdot \nabla n \quad \text{para electrones}$$

$$J_{diff,p} = -q \cdot D_p \cdot \nabla p \quad \text{para huecos}$$

donde D coeficiente de difusión [cm^2/s], ∇_n y ∇_p son los gradientes de concentración de electrones y huecos, respectivamente.

El operador gradiente se define como

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \hat{x} + \frac{\partial}{\partial y} \hat{y} + \frac{\partial}{\partial z} \hat{z}$$

En análisis unidimensional, el operador gradiente se reduce a la derivada de la concentración con respecto a la posición de interés. La ausencia de signo en la ecuación de corriente de difusión de electrones obedece al hecho de que el gradiente da como resultado directo la dirección del flujo de la corriente técnica debido a la difusión de electrones.

El coeficiente de difusión se relaciona con la movilidad por medio de la relación de Einstein

$$D = \frac{kT}{q} \mu = V_t \mu$$

donde V_t es voltaje térmico, $\approx 25 \text{ mV}$ a $300K$.

1.11 Diagramas de bandas de energía

El diagrama de bandas de energía es una representación de la energía en función de la posición. Esta representación es de gran utilidad para el estudio de los dispositivos electrónicos y sistemas de materiales.

El diagrama consta de dos ejes: el eje de energía (abscisas) y el eje de posición (coordenadas). En muchos diagramas se asume que el lector está familiarizado con el sistema de coordenadas y se omiten los ejes. En otros, además de la energía, el eje “y” se interpreta como un eje de voltaje. En ese caso, la dirección de incremento del voltaje es opuesta a la de la energía, ya que se define:

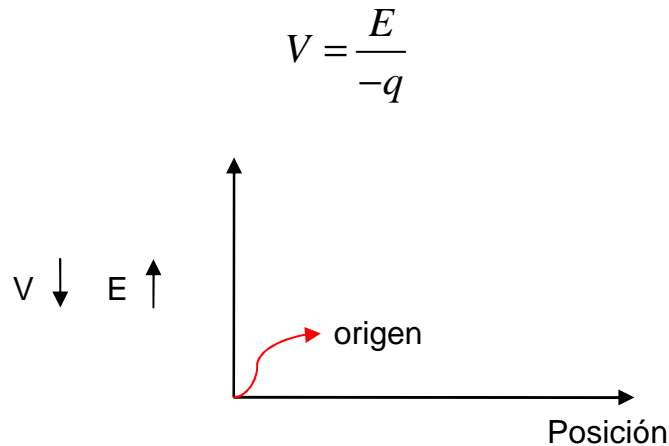


Figura 12. Ejes en un diagrama de bandas de energía

La estructura completa de un diagrama de energía para un semiconductor intrínseco se presenta en la figura 13.

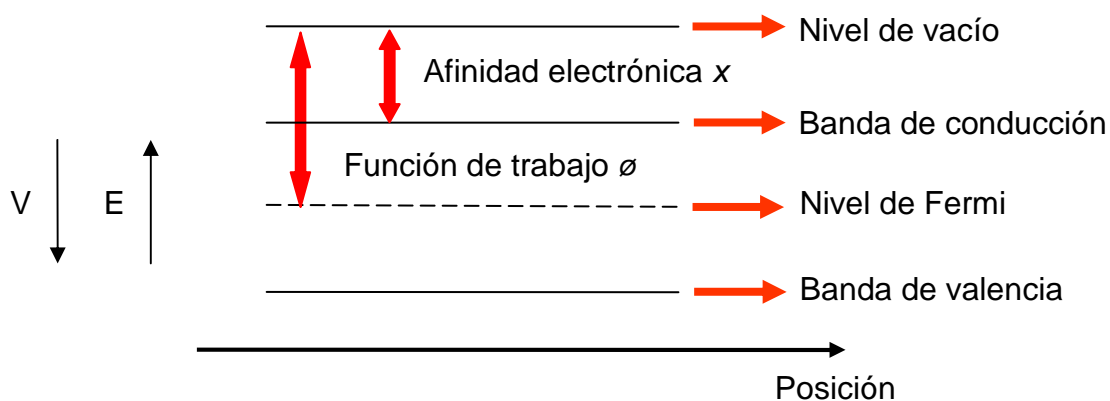


Figura 13. Diagrama de bandas de energía completo para un semiconductor intrínseco

El nivel de vacío es un nivel de referencia, y corresponde a la energía a la cual un electrón se ha liberado del material, es decir, ya no se encuentra ligado a la estructura cristalina y por lo tanto, ha sido removido del material.

La afinidad electrónica es la energía que un electrón, en la banda de conducción, debe adquirir para convertirse en un electrón libre, es decir, para desprenderse del material. Esta cantidad no está definida para metales, para los cuales se utiliza sólo el concepto de función de trabajo. La función de trabajo es la diferencia de energía entre el nivel de vacío y el nivel de Fermi. En los metales, es la energía que debe aplicarse a un electrón para desprenderlo del material.

El nivel de Fermi intrínseco o nivel intrínseco, es el nivel de Fermi para un semiconductor intrínseco, y se encuentra localizado aproximadamente a la mitad de la banda prohibida. El dopado modifica el nivel de Fermi del semiconductor de acuerdo con la intensidad del dopado y el tipo de impureza dopante.