

Introducción

Sin lugar a dudas, el estudio de las propiedades físicas de los materiales semiconductores y sus sorprendentes aplicaciones en el desarrollo técnico de dispositivos eléctricos, representan una de las revoluciones científico-tecnológicas de mayor impacto sobre nuestra sociedad. Para tener una idea de la real magnitud de esta revolución pensemos por un momento en los transistores, probablemente la aplicación tecnológica más importante de los semiconductores. Cualquier habitante del mundo moderno se encuentra rodeado cotidianamente por millones de transistores. Están en el televisor, en el equipo de música, en la máquina de lavar, en el reloj de pulsera, en el teléfono celular. Un computador personal puede llegar a tener algunos miles de millones de transistores. De hecho, en el mundo existen muchos más transistores que personas. Pero, naturalmente, una cosa es usar esta tecnología y otra muy distinta es entender como opera. Este último es el objetivo que persigue este breve artículo. Sin embargo, dada la naturaleza altamente especializada del tema y el reducido espacio disponible para desarrollarlo, siempre que sea posible dejaremos de lado las consideraciones de carácter técnico que obligarían a extender la discusión más allá de lo pertinente.

Teoría de bandas de energía

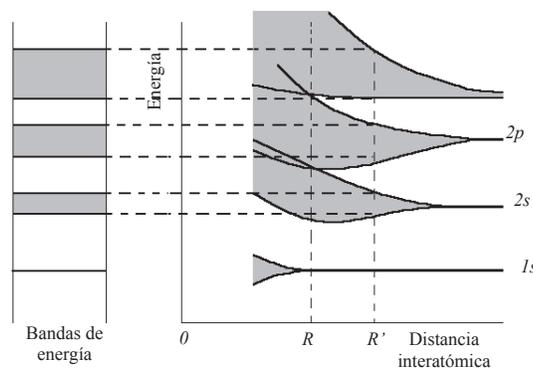
La conductividad σ varía enormemente entre aislantes y conductores. El cociente de conductividades entre los mejores conductores (como el cobre a bajas temperaturas) y los mejores aisladores $\sigma_{Cu} / \sigma_{aislador} \approx 10^{32}$, representa el rango de valores más amplio para una propiedad física de los sólidos. La enormidad de este rango constituye un fuerte indicio de que las propiedades de transporte de carga no son susceptibles de una explicación basada en un modelo clásico. Como veremos a continuación, una adecuada explicación para este fenómeno solo puede ser proporcionada por la mecánica cuántica.

La teoría cuántica nos enseña que los átomos tienen niveles de energía discretos cuando están aislados unos de otros. Sin embargo, si consideramos una gran cantidad de átomos la situación cambia dramáticamente. Realicemos un experimento imaginario en el que un conjunto de N átomos idénticos inicialmente aislados son gradualmente acercados entre si para formar una red cristalina. Observaremos los siguientes cambios en la estructura electrónica:

- Cuando los N átomos se encuentran muy próximos, las funciones de onda electrónicas se empiezan a traslapar y la interacción entre ellos ocasiona que cada nivel energético se divida en N niveles con energías ligeramente diferentes.
- En un sólido macroscópico, N es del orden de 10^{23} , de modo que cada nivel se divide en un número muy grande de niveles energéticos llamados una *banda*. Los niveles están espaciados casi continuamente dentro de una banda.
- Las bandas de energía, llamadas también bandas permitidas, se encuentran separadas unas de otras por brechas, denominadas bandas prohibidas. El ancho de estas bandas dependerá del tipo de átomo y el tipo de enlace en el sólido. Las bandas se designan por las letras s , p , d etc. de acuerdo al valor del momentum angular orbital del nivel energético al cual están asociadas.

De acuerdo al principio de exclusión de Pauli, si consideramos un cristal compuesto por N átomos, cada banda podrá acomodar un máximo de $2 \cdot (2l + 1)N$ electrones, correspondientes a las dos orientaciones del espín y a las $2l + 1$ orientaciones del momentum angular orbital. Agreguemos finalmente que, de no ser por el principio de exclusión, los electrones se agolparían en su estado de mínima energía haciendo imposible la formación de bandas.

Figura 1 Formación de bandas de energía como función de la separación de los átomos. Si existen muchos átomos cada nivel de energía se divide en un conjunto casi continuo de niveles que constituyen una banda.



Metales, semiconductores y aisladores

Las bandas asociadas con las capas completas internas en los átomos originarios tienen las cuotas exactas de electrones que les permite el principio de exclusión de Pauli. En estas bandas los orbitales no sufren alteraciones significativas y retienen su carácter atómico al formarse el sólido. Sin embargo, la banda correspondiente a la capa atómica más externa, ocupada por los electrones de valencia, es la más interesante en lo que se refiere a las propiedades de los sólidos. Si la banda más externa no está completamente llena, se denomina *banda de conducción*. Pero, si está llena, se llama *banda de valencia* y la banda vacía que queda inmediatamente encima de esta última recibe el nombre de *banda de conducción*.

Estamos ahora en condiciones de definir los distintos tipos de materiales de acuerdo a sus propiedades de transporte de corriente eléctrica:

- *Conductor* es toda sustancia en que la energía del primer estado electrónico vacío se encuentra inmediatamente adyacente a la energía del último estado electrónico ocupado. En otros términos, un conductor es un material en el cual la última banda ocupada no está completamente llena.
- *Aislador* es toda sustancia en que la energía del primer estado electrónico vacío se encuentra separada, por una brecha finita, de la energía del último estado electrónico ocupado.
- *Semiconductor* es un material aislador en que el ancho de banda prohibida es menor que $1eV$.

A fin de precisar nuestra definición de *semiconductor* recordemos que a temperatura ambiente ($T \approx 300^\circ K$) la energía térmica transferida a un electrón de la red es del orden de $K_B T \approx 0.025eV$. Un cálculo estadístico que omitiremos muestra que esta energía es suficiente para que una pequeña fracción de los electrones en la banda de valencia pueda “saltar” a la banda desocupada. Sin embargo, a temperatura nula ningún electrón podrá ocupar la banda superior. Por lo tanto, *los semiconductores a $T=0^\circ K$ son aisladores*. Esto nos permite definir los semiconductores como *aisladores de banda prohibida angosta*. La Figura 2 muestra esquemáticamente las diferencias existentes entre las tres clases de sólidos de acuerdo a sus propiedades de transporte de carga.

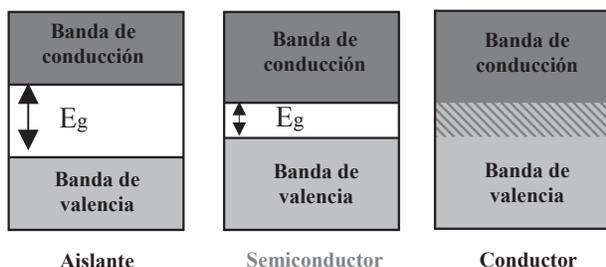


Figura 2 Metales, semiconductores y aisladores desde el punto de vista de la teoría de bandas.

Gap de Energía (eV)

| Aisladores | eV | Semiconductores | eV |
|-------------------|------|----------------------|------|
| Diamante | 5,33 | Silicio | 1,14 |
| Oxido de Zinc | 3,2 | Germanio | 0,67 |
| Cloruro de Plata | 3,2 | Telurio | 0,33 |
| Sulfuro de Cadmio | 2,42 | Antimoniuro de Indio | 0,23 |

Tabla 1 Gap de energía de algunos aisladores y semiconductores.

Semiconductores extrínsecos

Hasta ahora sólo hemos hablado acerca de materiales semiconductores naturales, los que definimos como aisladores de banda prohibida angosta; ellos reciben el nombre de *semiconductores intrínsecos*. Sin embargo, existe la posibilidad de diseñar y fabricar materiales con características eléctricas específicas “a la medida” agregando, de manera controlada, impureza a semiconductores. Este proceso de introducción de impurezas extrañas se denomina dopado.

Consideremos los efectos de estas impurezas en el silicio (*Si*), uno de los semiconductores de uso más frecuente (véase la Figura 3). La configuración electrónica del *Si* es $[Ne]3s^2 3p^2$, de modo que tiene cuatro electrones de valencia. Para fijar ideas, veamos que sucede si reemplazamos algunos de los átomos de *Si* por átomos de fósforo (*P*) que tienen cinco electrones de valencia y cuya configuración electrónica es $[Ne]3s^2 3p^3$:

- Por cada átomo de *P* que se agrega aparece un estado electrónico nuevo y adicional en la banda prohibida. Este nivel se ubica justo por debajo de la banda de conducción del *Si*.
- Cada átomo de *P* utiliza cuatro de sus cinco electrones de valencia para formar enlaces con cuatro átomos de *Si* vecinos, quedando un electrón extra que necesita liberar para alcanzar su configuración más estable de ocho

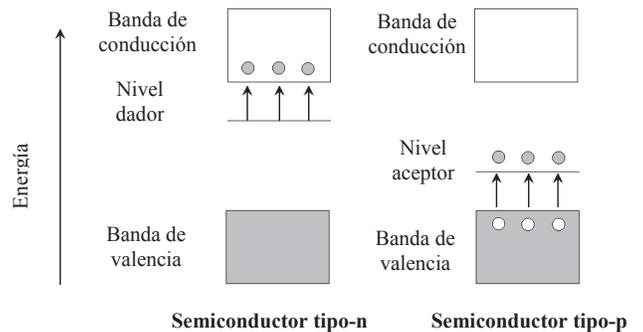
electrones. La energía térmica es suficiente para que el electrón extra sea transferido a la banda de conducción dejando atrás un ión positivo P^+ inmóvil.

- Los átomos de P se llaman *átomos dadores*, y la conductividad eléctrica en este tipo de semiconductores implica fundamentalmente movimiento de electrones procedentes de los átomos dadores a través de la banda de conducción. Este tipo de semiconductores se denomina de *tipo-n*, donde n se refiere a negativo, el tipo de carga eléctrica que transportan los electrones.

Reemplacemos ahora algunos átomos de Si por átomos de aluminio (Al) cuya configuración electrónica es $[Ne]3s^2 3p^1$ de manera que tiene tres electrones de valencia.

- Por cada átomo de Al que se agrega aparece un estado electrónico nuevo que se encuentra justo por encima de la banda de valencia del Si .
- Cada átomo de Al utiliza sus tres electrones de valencia para formar enlaces con tres átomos de Si vecinos. La capa externa del Al tratará de capturar un electrón extra de la banda de valencia para conformar una capa estable de ocho electrones.
- Un electrón se trasfiere con facilidad desde la banda de valencia hasta el nivel aceptor formando un ión negativo inmóvil. Cuando esto ocurre, se crea una *vacante positiva* en la banda de valencia. Debido a que en este tipo de semiconductores la conductividad eléctrica consiste fundamentalmente en la transferencia de vacantes positivas, se les denomina semiconductores de *tipo-p*.

Figura 3 En un semiconductor con átomos dadores (por ejemplo P en Si), el nivel dador se encuentra justo por debajo de la banda de conducción. Los electrones (●) son promocionados fácilmente a la banda de conducción. El semiconductor es de *tipo-n*. En un semiconductor con átomos aceptores (por ejemplo Al en Si), el nivel aceptor se encuentra justo por encima de la banda de valencia. Los electrones son promovidos fácilmente al nivel aceptor dejando agujeros positivos (○) en la banda de valencia. El semiconductor es de *tipo-p*.

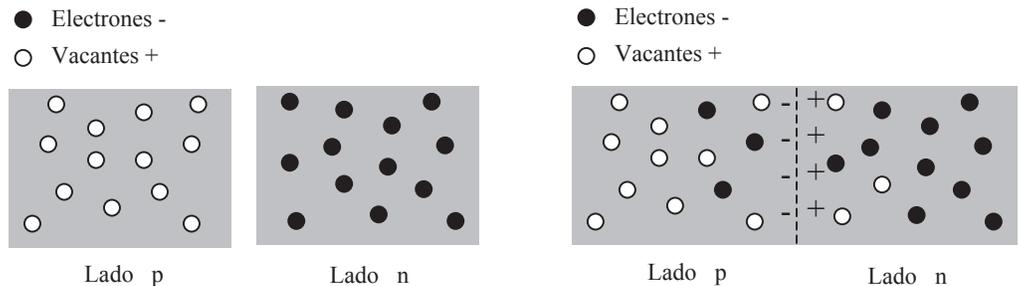


Aplicaciones de los semiconductores

A partir de la década de 1950, los dispositivos semiconductores -conocidos también como *dispositivos de estado sólido*- remplazaron los tubos electrónicos de la industria tradicional. Por la enorme reducción de tamaño, consumo de energía y costo, acompañada de una mucho mayor durabilidad y confiabilidad, los dispositivos semiconductores significaron un cambio revolucionario en las telecomunicaciones, la computación, el almacenamiento de información, etc.

Desde el punto de vista de su forma de operación, el dispositivo semiconductor más simple y fundamental es el *diodo*; todos los demás dispositivos pueden entenderse en base a su funcionamiento.

Figura 4 Unión pn . Debido a la diferencia de sus concentraciones, las vacantes se transfieren del lado p al n y los electrones se difunden del lado n al p . Como resultado, existe una doble capa de carga en la unión, siendo negativo el lado p y positivo el n .



Cuando un semiconductor de tipo n y otro de tipo p se unen del modo indicado en la Figura 4, las concentraciones inicialmente desiguales de electrones y vacantes dan lugar a una transferencia de electrones a través de la unión desde el lado p al n y de vacantes desde el lado n al p . Como resultado, se crea una doble capa de carga en la unión semejante a la de un condensador de placas paralelas, siendo negativo el lado p y positivo el lado n .

Existe por tanto una diferencia de potencial V a través de la unión que tiende a inhibir una transferencia posterior. La región de la unión se llama *región de agotamiento* porque está desprovista de portadores de carga.

Establezcamos ahora una diferencia de potencial externa a través de la unión pn mediante una batería. Cuando el terminal (+) de la batería se conecta al lado p de la unión como se muestra en la Figura 5, se dice que la unión está sometida a una polarización directa. Este tipo de polarización disminuye el potencial a través de la unión. La transferencia de electrones y vacantes se incrementa, por tanto, en un intento de restablecer el equilibrio, dando lugar a una corriente en el circuito.

Si el terminal (+) de la batería se conecta al lado n de la unión, como se ilustra en la Figura 5, se dice que la unión está inversamente polarizada. La polarización inversa tiende a incrementar la diferencia de potencial a través de la unión, inhibiendo, por tanto, la transferencia posterior. Esencialmente, la unión conduce en una sola dirección.

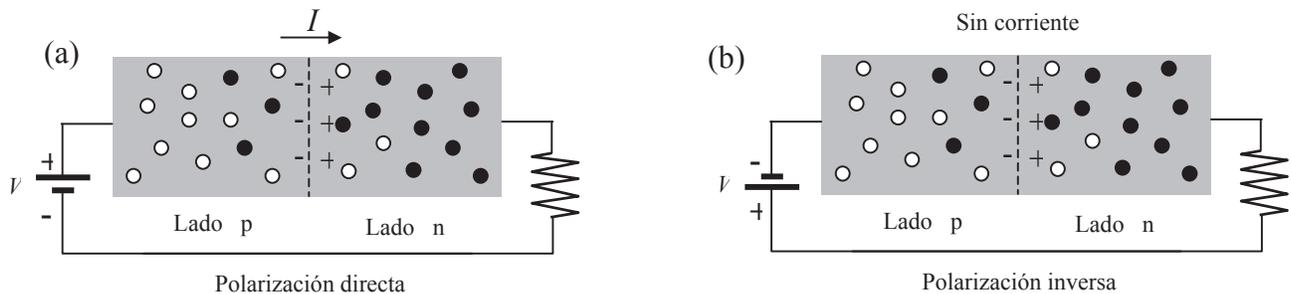


Figura 5 Diodo de unión pn . (a) Unión pn con polarización directa. La diferencia de potencial aplicada estimula la transferencia de vacantes del lado p al n y de electrones del lado n al p , dando lugar a una corriente I . (b) Unión pn con polarización inversa. La diferencia de potencial inhibe la transferencia posterior de vacantes y electrones, de modo que no hay corriente.

Los diodos tienen múltiples aplicaciones. La más evidente, y que se desprende directamente de nuestra discusión anterior, es la conversión de la corriente alterna en continua, proceso que se llama *rectificación*. Otras aplicaciones de interés son las *células solares*, que convierten la energía luminosa en energía eléctrica, y los *diodos emisores de luz (LEDs)* que se utilizan corrientemente en las pantallas de relojes digitales y calculadoras.

Naturalmente, nuestra discusión no podría estar completa sin mencionar al dispositivo de estado sólido más relevante desde el punto de vista tecnológico; el transistor. Dicho en términos simples, *el transistor es un dispositivo utilizado para producir una señal de salida en respuesta a una señal de entrada*. Una de las formas más simples que puede adoptar un transistor se consigue uniendo tres piezas de material semiconductor. Estos materiales pueden ser tanto nnp como $pnnp$. Ambos tipos conforman lo que se denomina un *transistor de unión bipolar*, que consiste esencialmente de tres regiones distintas llamadas *emisor*, *base* y *colector*. Entre las aplicaciones del transistor bipolar podemos mencionar su uso como amplificador de corriente. Mediante la introducción de una pequeña señal de entrada en forma de una corriente variable aplicada a la base I_b , se producirá una corriente de colector I_c que es una fiel copia de la señal de entrada, pero aumentada. Es costumbre expresar la corriente de salida I_c en la forma $I_c = \beta I_b$, donde β se denomina *ganancia de corriente* del transistor. Los transistores pueden tener valores de β desde 10 hasta varios centenares.

En los dispositivos electrónicos se emplean también transistores pero como interruptores. Si no colocamos voltaje entre la base y el emisor, muy pocos electrones serán capaces de pasar del emisor al colector. El transistor se comporta entonces como un interruptor cerrado, rechazando prácticamente todo flujo de corriente. Pero si aplicamos un voltaje alto entre el emisor y la base, la corriente podrá fluir libremente. En este caso el transistor se comporta como un interruptor abierto. Realizando diferentes combinaciones entre transistores es posible desarrollar elementos lógicos que ejecuten desde las simples operaciones aritméticas de una calculadora de bolsillo, hasta los sofisticados cálculos matemáticos involucrados en un vuelo espacial.

Las aplicaciones prácticas de los semiconductores son innumerables. Para hacer justicia al vasto y complejo campo científico y tecnológico inaugurado por los dispositivos de estado sólido sería necesario disponer de varios volúmenes de material escrito. Por lo tanto, estas cuatro modestas páginas apenas si aspiran a haber presentado un simple esbozo; a lo más una introducción a los semiconductores y sus aplicaciones. Si he conseguido realizar dicho esbozo, y al mismo tiempo he podido despertar el interés suficiente como para realizar un estudio más profundo y acabado de este fascinante capítulo de la ciencia moderna, me sentiré más que satisfecho.

Referencias

- (1) Craig R. Barrett: *Fabricación de un Circuito Integrado*, Investigación y Ciencia, Junio 1999.
- (2) Jim Lesurf: *Que Son y Como Operan los Transistores*, New Scientist, Enero 1991.
- (3) Charles Kittel: *Introducción a la Física del Estado Sólido*, tercera edición.
- (4) Richard Feynman, Robert B. Leighton, Matthew Sands: *The Feynman Lectures on Physics, Volumen III*.
- (5) Marcelo Alonso, Edward J. Finn: *Física, Volumen III*.
- (6) Paul A. Tipler: *Física, Volumen II*, cuarta edición.
- (7) Kenneth Krane: *Física Moderna*.
- (8) Arthur Beiser: *Conceptos de Física Moderna*, segunda edición.
- (9) Ralph H. Petrucci, William S. Harwood: *Química General*, séptima edición.
- (10) Ninoslav Bralic, Miguel Kiwi: *Física Contemporánea*.