

Unidad 2: SEMICONDUCTORES

Semiconductores intrínsecos. El par hueco-electrón. Mecanismo de conducción eléctrica. Concentración de portadores. Semiconductores extrínsecos. Esquema de bandas de energía. Propiedades eléctricas.

INTRODUCCIÓN

Ya en posesión de nuestras herramientas básicas, abordaremos ahora el estudio detallado de estos sorprendentes materiales. Como veremos, aunque su nombre describe acertadamente una propiedad característica, -su pobre conductividad, o si se prefiere, su pobre capacidad aislante-, no es esto lo más relevante para comprender sus aplicaciones.

A partir del gráfico mostrado en la figura 1.5, en la unidad anterior, cuyo origen recomendamos tener bien presente, desarrollaremos algo más la idea hasta llegar a una representación abstracta y potente de la estructura electrónica de los sólidos que nos permitirá explicar eficientemente sus propiedades eléctricas, se trate de aislantes, metales conductores o, lo que más nos interesa, semiconductores.

Cuando decimos que es una representación abstracta, nos referimos a que, de ninguna manera debe asimilarse esta representación a ningún “paisaje” que pudiera ser visto, (si la expresión “ver” pudiera aplicarse apropiadamente a esa escala) con algún fantástico súper microscopio, ya que, recordemos, no es más que un gráfico cartesiano. Si se quiere, puede verse a lo sumo, como una metáfora de la realidad.

Pero esta representación nos acompañará de aquí en más, como un punto de vista para explicar el funcionamiento de los dispositivos microelectrónicos. No es ocioso reflexionar un poco sobre ella.

El texto que sigue, constituye el material de estudio requerido. Como siempre, será beneficiosa la consulta del material ampliatorio. El abordaje de la Guía de Problemas, su discusión y puesta en común, completará nuestro trabajo sobre el tema.

SEMICONDUCTORES

Los semiconductores son un grupo de materiales que presenta un valor intermedio de conductividad entre conductores y aislantes. Sin embargo, no es esta característica lo que los hace unos materiales extraordinarios.

lo más importante es que este valor es fuertemente dependiente de la temperatura, de otras formas de excitación, de la presencia de pequeñísimas cantidades de impurezas y de irregularidades en su red cristalina.

ELECTROMAGNETISMO-ESTADO SÓLIDO II.

- Su dependencia con la temperatura es opuesta a la de los metales, esto es, cuando aumenta la temperatura su conductividad aumenta, como ocurre en general con los materiales de pobre conductividad.
- La incidencia de luz, o en general de radiación electromagnética con la longitud de onda adecuada, aumenta la conductividad o induce la aparición de una diferencia de potencial.
- La introducción controlada de impurezas, -operación conocida como “dopado”-, o de alteraciones en la red cristalina, permite, como veremos, la obtención de materiales con propiedades eléctricas previamente estipuladas, lo que provoca el enorme valor tecnológico de estos materiales.

El silicio (Si) y el germanio (Ge) en estado puro son semiconductores típicos y hay otros materiales como arseniuro de galio (AsGa), sulfuro de cinc (SZn), óxido de cobre (OCu), etc.

Como resultará evidente en la próxima sección, un factor clave de la industria microelectrónica es la necesidad de contar con materiales de partida de extrema pureza. Si la concentración de sustancias no deseadas en las más sofisticadas aplicaciones químicas, biológicas, nucleares, se mide en partes por millón, esto es, cuántos átomos o moléculas extrañas son permisibles por cada millón de átomos o moléculas principales, en este terreno las exigencias se multiplican extraordinariamente. En la operación de dopado mencionada se agregan átomos extraños en forma controlada, en el nivel de 1 cada 10.000.000, lo que significa que si el material de partida no puede garantizar una pureza por lo menos dos órdenes de magnitud mayor, el dopado no puede tener ningún efecto controlable.

En la actualidad el grado de pureza requerido para el silicio microelectrónico es del orden de 10^{-10} , esto es un átomo extraño cada 10.000.000.000 (10^{10}) del material base.

El otro factor de gran importancia en las características de los materiales utilizados para fabricar dispositivos semiconductores, es la perfección de la red cristalina. Idealmente, se busca tener un único cristal (monocristal) sin vacancias (falta de un átomo en un punto de la red) ni átomos intersticiales (presencia de un átomo fuera de su lugar).

La obtención de estos monocristales de gran pureza y sin defectos, requiere la aplicación de técnicas muy sofisticadas, que implican una gran inversión de capital. Algunos de estos métodos se han estudiado en el curso de química.

MODELO MICROSCÓPICO DE CONDUCCIÓN ELÉCTRICA DE SEMICONDUCTORES

Retomando la descripción que hicimos para los metales y para los dieléctricos, representemos nuevamente la estructura electrónica de un sólido cristalino, en este caso de un material semiconductor:

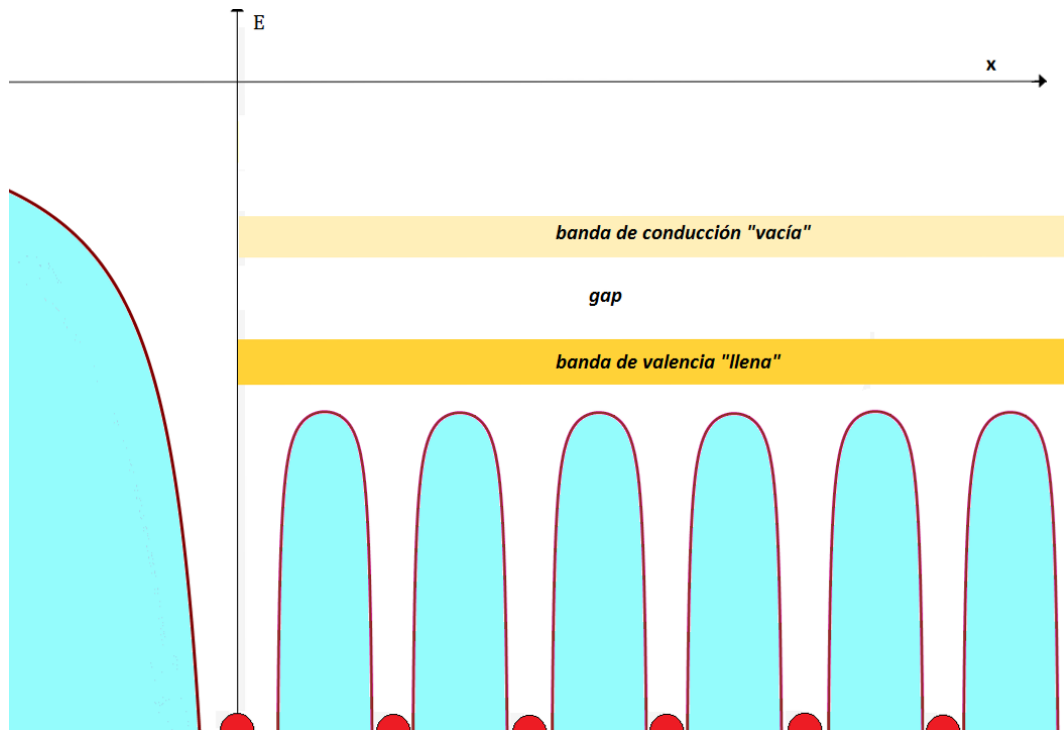


Figura 2.1. Los semiconductores presentan un gap intermedio. Igual que en los dieléctricos, la concentración de portadores de la corriente eléctrica en la banda de conducción crece, según una relación exponencial, con la temperatura.

A diferencia de los metales, con su capa de valencia sólo parcialmente ocupada, los materiales semiconductores, al unirse mediante covalencia, forman una estructura electrónica estable, en la que no quedan lugares vacantes.

Si el esquema de la Fig. 2.1 representa la estructura electrónica de un cristal puro de un semiconductor típico, a 0 K (-273 °C) todos los electrones se encontrarán en su estado energético fundamental y la banda de valencia estará totalmente ocupada, mientras que la banda de conducción estará totalmente vacía. La característica distintiva de los semiconductores es que el GAP o "zona prohibida" tiene una "altura" energética del orden de 1eV, y esta es una diferencia de energía que los electrones pueden adquirir con sólo que aumente la temperatura unos pocos grados.¹

Es decir, que a temperaturas crecientes le corresponderá una distribución electrónica cada vez más desplazada hacia la banda de conducción, donde hay muchos estados vacantes. Al mismo tiempo se van creando lugares vacantes en la banda de valencia. Podemos representarlo como sigue:

¹ Cualquier exceso de energía absorbido por el electrón por sobre el valor necesario para salvar el GAP, es energía cinética del electrón (y/o del hueco, ver más adelante). Algunos materiales (p. ej. AsGa) sólo requieren que la energía transferida sea igual a la del GAP. Tienen especial aplicación en dispositivos optoelectrónicos. Otros como Si y Ge requieren además la transferencia de cierta cantidad de movimiento.

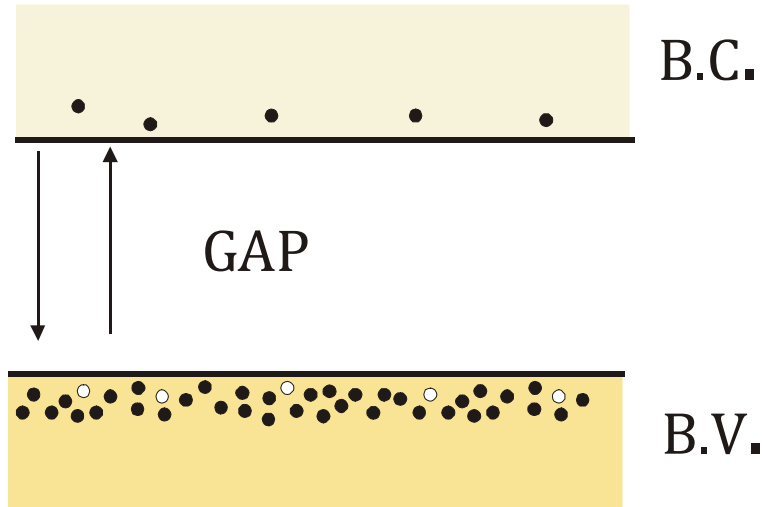


Figura 2.2. En un semiconductor en equilibrio térmico, el flujo de electrones desde la banda de valencia a la banda de conducción (excitación, representada por la flecha ascendente) es igual al flujo contrario (recombinación, flecha descendente), manteniéndose constante la concentración de electrones excitados (n) e igual a la concentración de "huecos" (p).

El dibujo pretende esquematizar la situación donde cinco electrones, que han adquirido la energía suficiente (los llamamos excitados), han "saltado" a la banda superior, dejando cinco lugares vacantes (a los que llamaremos "**huecos**") en la banda de valencia. Por supuesto que la distribución electrónica entre las bandas es el resultado de un equilibrio dinámico en el que el "flujo" de electrones hacia la banda de conducción es igual al flujo en sentido inverso. Un electrón en la banda de conducción puede perder cierta cantidad de energía y volver a la banda de valencia y ello está ocurriendo permanentemente. Se llama a este proceso "recombinación". O sea que en un semiconductor en equilibrio térmico, existe un proceso continuo de excitación y recombinación de tal forma que la concentración de electrones y huecos se mantiene sensiblemente constante y, además la concentración de electrones (n) es igual a la concentración de huecos (p). A mayor temperatura corresponde mayor concentración de ambos. Además la concentración dependerá también, por supuesto, del valor del GAP.

Como sugieren los dibujos, los electrones que ocupan las bandas de energía superiores, no están limitados por las barreras de potencial atómicas, por lo que pueden desplazarse por todo el cristal. Son los electrones que en los metales llamamos "libres". Pero mientras la banda de conducción esté totalmente llena y la de valencia totalmente vacía, ningún fenómeno de conducción eléctrica puede ocurrir. Como dedujimos en el capítulo anterior:

La condición para que una banda electrónica participe del proceso de conducción eléctrica es que no se encuentre totalmente llena ni totalmente vacía.

Pero cuando se produce la excitación electrónica, el panorama cambia totalmente pues al aplicar un campo eléctrico, *tanto los electrones de la banda de valencia como*

los de la banda de conducción, comenzarán a tener un movimiento neto como cualquier carga libre en un campo eléctrico, dando origen a una corriente eléctrica. En efecto, en la banda de conducción hay una pequeña cantidad de electrones y una gran cantidad de estados vacantes a los que aquellos pueden pasar.

Pero también pasan cosas que nos interesan en la banda de valencia. La existencia de lugares vacantes, que hemos llamado "huecos", permite también un desplazamiento de electrones en el mismo sentido que en la banda de conducción (de la misma manera que se mueve un líquido, por acción de la gravedad, en un tubo parcialmente vacío y no lo puede hacer si está totalmente lleno). O sea que tenemos corrientes eléctricas en ambas bandas y los efectos se sumarán.

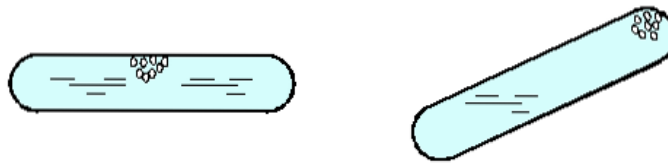


Figura 2.3. La existencia de burbujas en el seno del líquido, permite que éste baje al inclinar el tubo. El movimiento más notable es el de las burbujas en sentido contrario.

La analogía con el tubo parcialmente lleno, todavía nos da otra utilidad. Efectivamente, mientras que allí la parte más notable del movimiento es la de las burbujas de aire, en el caso de los electrones puede describirse lo que sucede como el movimiento de los huecos "en contracorriente". Los huecos se consideran como partículas virtuales de carga positiva que se mueven en dirección opuesta a los electrones de la banda de conducción. A estas partículas virtuales se les puede asignar masa, energía cinética y potencial, etc. Esto facilita el tratamiento matemático del fenómeno y permite también una buena descripción cualitativa de los procesos que ocurren en los distintos dispositivos semiconductores.

La condición para que exista la corriente eléctrica es, por supuesto, la existencia de un campo eléctrico, o sea que se aplique una diferencia de potencial, que ocasionará que los electrones de la banda de conducción, moviéndose contra la dirección del campo, se dirijan hacia las regiones de mayor potencial eléctrico, mientras que los huecos de la banda de valencia se mueven en dirección opuesta.

Para describir los procesos de transferencia energética y de transporte, utilizamos gráficos como el de la Fig. 2.2, donde en la dirección vertical, tenemos una variación de energía, mientras que la horizontal es una coordenada de posición. Si los límites de las bandas son perfectamente horizontales, eso significa que no hay variaciones de energía con la posición. Pero si hay aplicado un campo eléctrico, que tendrá dirección horizontal, esas líneas ya no pueden ser horizontales, ya que la energía potencial de las cargas dependerá de su posición a lo largo del material bajo tensión, por lo que deberemos dibujarlas con una cierta pendiente proporcional a la tensión. Prácticamente todos los textos que abordan este tema han adoptado una convención que también seguiremos aquí:

Las líneas representan la energía potencial de los electrones, y no el potencial eléctrico, por lo que mayor altura significa menor potencial.

Es como si representáramos el potencial a lo largo de un conductor (como hacíamos en Electro I) pero con el signo cambiado, representación que tiene la ventaja de que así los electrones se mueven espontáneamente "cuesta abajo" y cuando tengamos que entender los procesos dentro de un transistor, resultará más sencillo.

Como se comprende fácilmente, en la Fig 2.4, el gráfico de la izquierda representa un SC, donde se muestran sólo los electrones excitados y los huecos, (ambos son los portadores de la corriente) en el que no hay aplicada diferencia de potencial. El caso opuesto (con tensión) se muestra a la derecha.

Todo lo que hemos discutido hasta aquí se refiere a un material puro, formando un monocristal perfecto. Es lo que se conoce como semiconductor **intrínseco** y no tiene mucha aplicación práctica, salvo como materia prima para la fabricación de los otros materiales, mucho más importantes, conocidos como semiconductores **extrínsecos**. La característica central de los primeros es, como hemos visto, que la concentración de huecos y electrones es la misma y ambos son portadores de la corriente, sumándose los efectos.

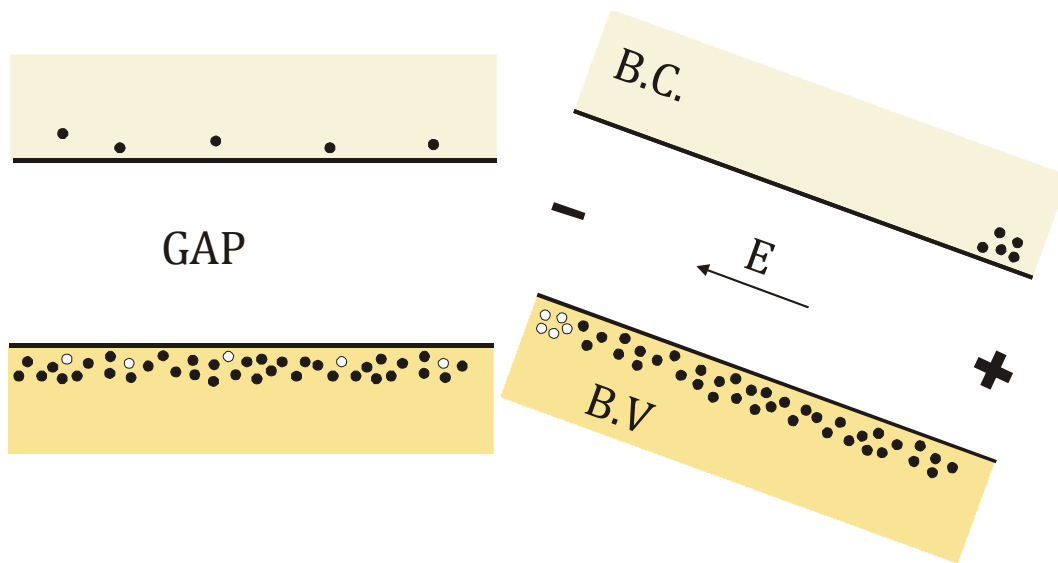


Figura 2.4. El gráfico de la izquierda es el mismo de la Fig. 2.2, que se transforma en el de la derecha al aplicarse tensión. El potencial más alto se representa con un nivel más bajo. Los electrones se mueven "contra" el campo eléctrico, mientras que los huecos lo hacen en la dirección del mismo.

En los semiconductores intrínsecos se observa una fuerte variación de la conductividad con la temperatura, siendo siempre la relación directa, aunque no proporcional (más bien es exponencial). Esto se explica porque en estos materiales, la conductividad es prácticamente directamente proporcional a la concentración de portadores, siendo ésta muy baja (típicamente, sólo un átomo de

cada billón (10^{12} , origina un portador) y constituyendo, por lo tanto, el factor limitante. Esto marca una diferencia importante con los conductores metálicos. En efecto, allí la concentración de portadores (electrones) es mucho mayor, ya que puede considerarse que cada átomo aporta un electrón conductor, y el factor limitante de la conductividad es la movilidad de los electrones y ésta disminuye al aumentar la temperatura, debido a la mayor interferencia provocada por el movimiento más desordenado de los átomos de la red.

Si hacemos un gráfico de la conductividad (=inversa de la resistividad = $1/\rho$) vs. la temperatura absoluta, obtenemos algo como lo que se muestra en la Fig. 2.5.

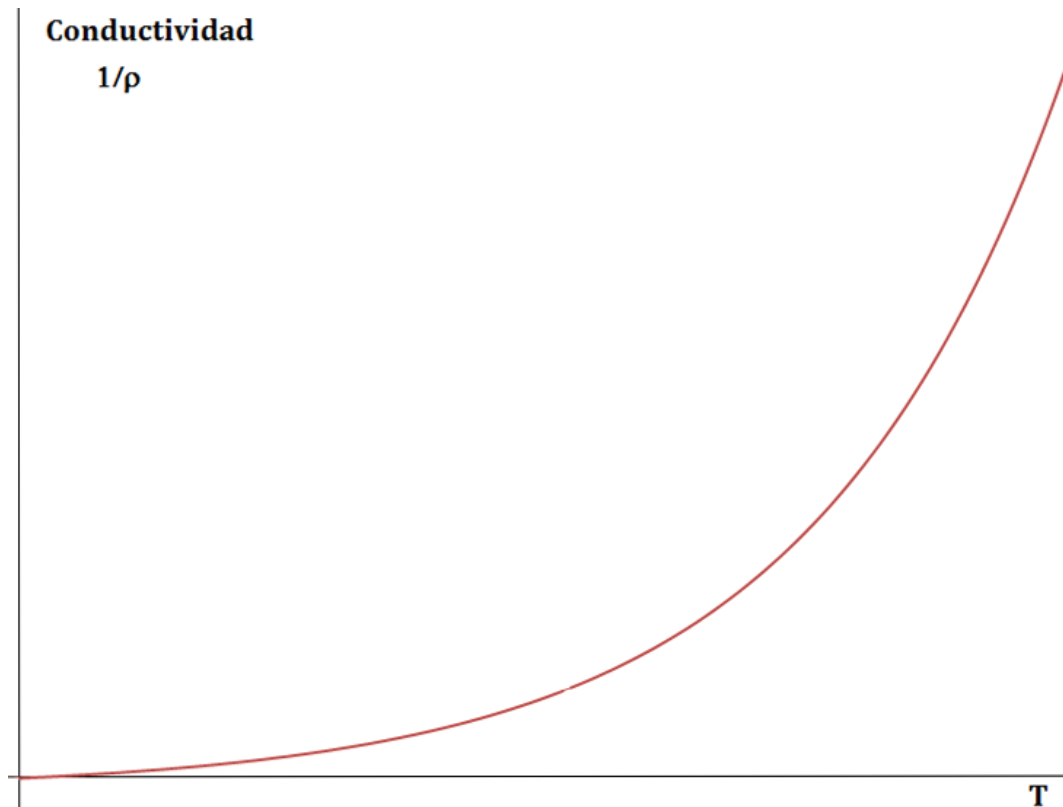


Figura 2.5. En los semiconductores intrínsecos la conductividad aumenta exponencialmente con la temperatura, igual a lo que sucede con la concentración de portadores.

Esta característica de los SC intrínsecos, constituye una limitación para posibles aplicaciones, además veremos que es muy útil que la conductividad sea fundamentalmente del tipo **n** o **p**.

Los semiconductores **extrínsecos** se obtienen, como se dijo, de los intrínsecos. El agregado de pequeñísimas cantidades de impurezas, altera profundamente y en forma previsible las propiedades eléctricas del material. Las impurezas que se agregan, en forma controlada, son elementos del grupo III o del V de la Tabla Periódica. Tanto el Si como el Ge, que tomaremos como ejemplo, pertenecen al grupo IV, lo que significa que poseen cuatro electrones de valencia. Estos electrones, compartidos entre átomos vecinos, forman el enlace químico,

sumamente estable que origina la estructura del sólido en forma de cristal ordenado.

En la Fig. 2.6 se representa la estructura de un cristal de silicio, tal como se estudió en química al presentar el “modelo de conductividad de la unión covalente”. Este modelo es más simple que el de la teoría de bandas que estamos estudiando ahora y como vimos, sus predicciones cuali y cuantitativas no son satisfactorias. Pero tiene la ventaja de brindar una imagen menos abstracta y podríamos suponer que representa el “paisaje” que podría “verse”, si esta acción pudiera tener sentido a la escala de que estamos hablando. También podemos reinterpretarlo a la luz del modelo más exacto que nos da la mecánica cuántica.

Los puntos negros, descritos anteriormente como que representan electrones de valencia que forman la unión covalente que da estabilidad al cristal, son los que, por su baja energía, permanecen **en** la banda de valencia, según la teoría de bandas. Algunos de estos electrones pueden excitarse y desprenderse de la unión, dejando un lugar vacante, que llamamos “hueco” en el nuevo modelo y ser impulsados por un campo eléctrico aplicado, constituyendo una corriente eléctrica. Son estos electrones liberados los que pueblan la banda de conducción.

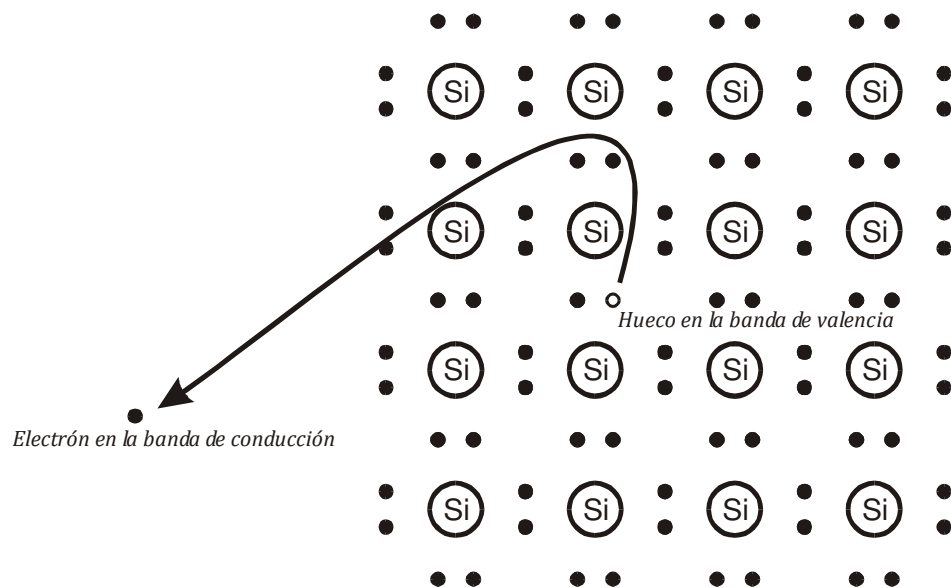


Figura 2.6. Modelo de conductividad de la unión covalente reinterpretado con la teoría de bandas. Semiconductor intrínseco.

Ahora, si algunos átomos del cristal intrínseco, son reemplazados por átomos del V grupo (esto significa cinco electrones de valencia), el electrón sobrante causará una profunda alteración energética. Todo ocurre como si este electrón de más en el estado fundamental (no excitado) tuviese casi la energía necesaria para alcanzar la banda de conducción. Cosa que ocurre ya a muy baja temperatura. Podemos representarlo como antes, (Fig. 2.7)

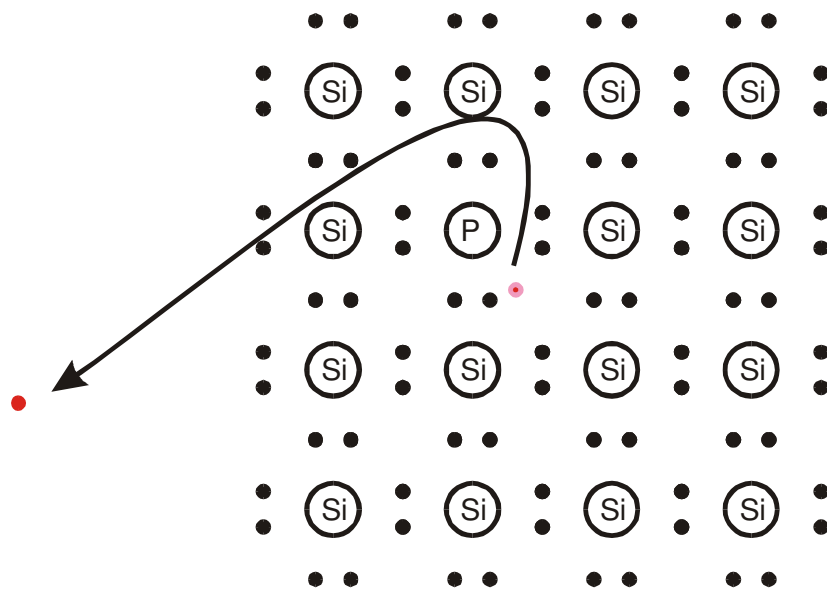
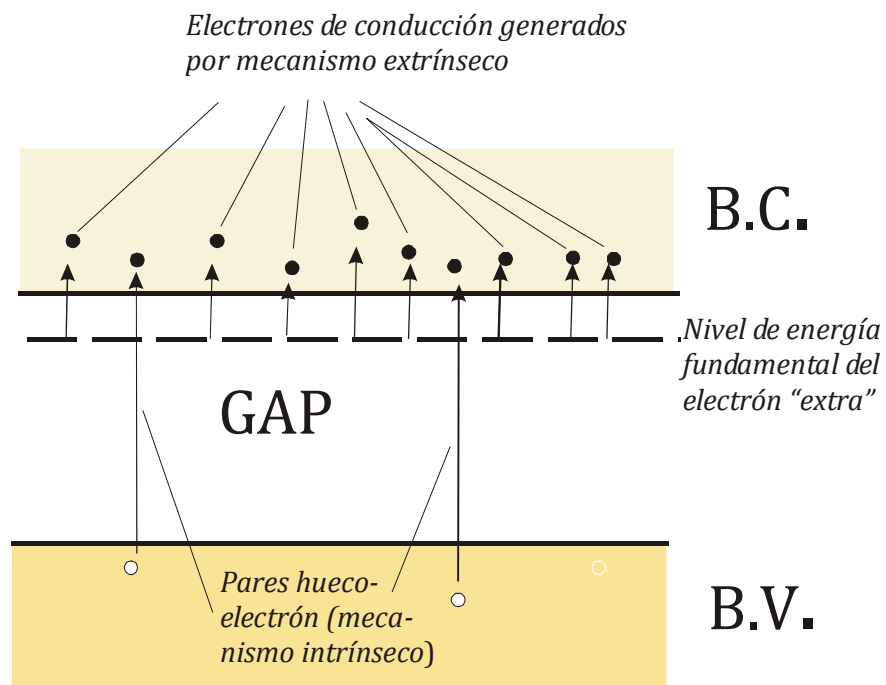


Figura 2.7. Formación de portadores por mecanismo extrínseco. Semiconductor **n**. Arriba: teoría de bandas. Abajo: modelo del enlace covalente.

ELECTROMAGNETISMO-ESTADO SÓLIDO II.

La consecuencia inmediata de este mecanismo es que se crea un portador (electrón libre), por cada átomo extraño agregado, y a bajas temperaturas. Si recordamos que en el intrínseco se necesitaba del orden de 10^{12} átomos para tener un par de portadores, podemos comprender que el agregado de cantidades tan pequeñas como una parte de dopante cada diez millones (o sea 10^7) de partes del material base, ocasiona un aumento de cinco órdenes de magnitud (cien mil veces) en la concentración de portadores, con el consiguiente aumento de la conductividad.

Pero además, otra cosa muy importante ha sucedido, se ha roto la paridad electrón / hueco. En efecto, junto con el electrón libre, **no** se forma ahora un hueco, como en el mecanismo intrínseco, por lo que los portadores son ahora mayoritariamente electrones. Decimos mayoritariamente porque el mecanismo intrínseco seguirá funcionando y aunque en una proporción muchísimo menor se formarán pares electrón / hueco, a estos últimos los llamaremos portadores minoritarios.

En forma simétrica, si se dopa con un elemento trivalente (tres electrones de valencia, grupo III), todo sucede como si se formaran sitios vacantes para electrones con una muy pequeña diferencia de energía por encima del "techo" de la banda de valencia. Ya a bajas temperaturas, hay electrones que tienen suficiente energía para ocupar esos sitios, dejando un hueco en la banda de valencia, **sin** que aparezca un electrón en la banda de conducción. Valen las mismas consideraciones para los portadores minoritarios.

El primer caso descrito, con dopaje pentavalente, origina un semiconductor conocido como SC **n** y en este último caso SC **p**. Las letras **n** y **p** hacen referencia a negativo y positivo, signo de los portadores mayoritarios, en cada caso.

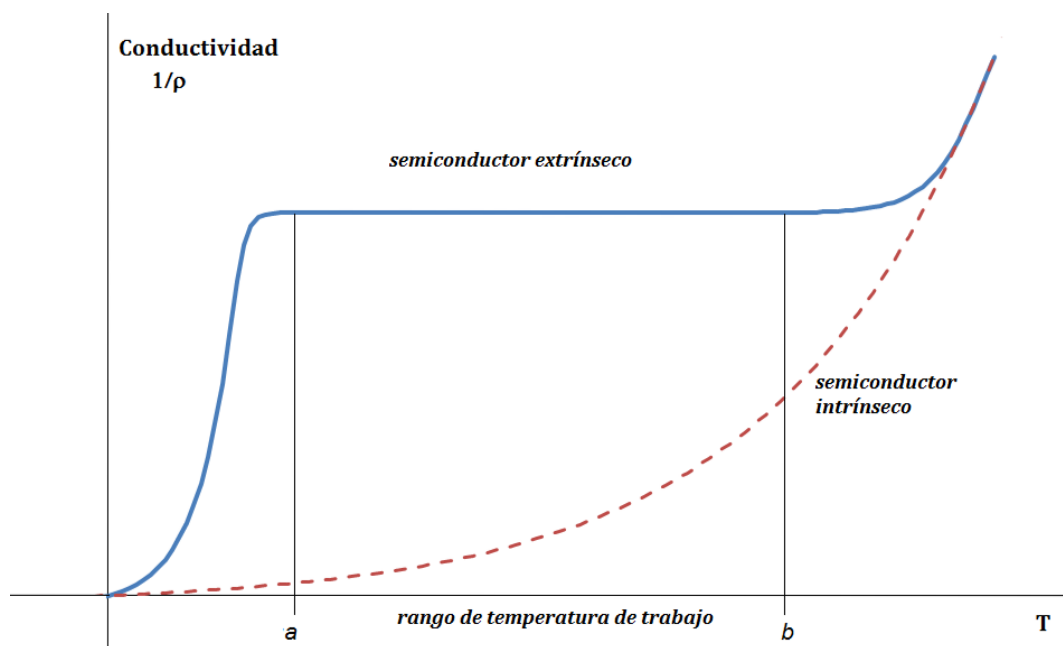
Aparte de aumentar la conductividad en forma controlada, y poder elegir el signo de la carga de los portadores mayoritarios (que ya veremos la gran importancia que tiene) este proceso también cambia las características del comportamiento frente a los cambios de temperatura.

Analicemos el gráfico de la página siguiente, donde se representa la conductividad en función de la temperatura para un SC extrínseco. En línea punteada se conserva la traza para un SC intrínseco, como referencia.

A temperaturas muy bajas, cerca de 0 K, todos los electrones se encuentran en su estado fundamental y, como en los SC intrínsecos, no existe conductividad. Pero puesto que la energía de excitación de los electrones de las impurezas añadidas es muy baja, ya a pocos Kelvin (*a*) comienzan a existir portadores y la conductividad sube muy rápidamente hasta que todos los electrones de los átomos donores, (o los huecos de los aceptores) se han activado.

A partir de esta temperatura, la concentración de portadores se mantiene prácticamente constante y con ella la conductividad, (aunque puede observarse una leve disminución de ésta debido a la menor movilidad). La zona de trabajo habitual de los SC extrínsecos está comprendida entre los valores de temperatura *a* y *b* donde la concentración de portadores es constante.

ELECTROMAGNETISMO-ESTADO SÓLIDO II.



ELECTROMAGNETISMO-ESTADO SÓLIDO II.

CONSIGNA DE TRABAJO INDIVIDUAL.

Semiconductor intrínseco	Semiconductor extrínseco	Portadores mayoritarios	Portadores minoritarios
Dopado	Banda de conducción	Banda de valencia	Par hueco-electrón
Tipo p/ Tipo n	Conductividad vs. temperatura	Corriente de huecos	Corriente de electrones

Construya un mapa conceptual o, alternativamente, elabore un texto de alrededor de 200 palabras utilizando las expresiones de la tabla. Utilice por lo menos 6 de ellas.

Alternativa o adicionalmente, formule por escrito la(s) pregunta(s) que considere necesarias para mejorar su comprensión del texto anterior.

PREGUNTAS Y PROBLEMAS

1. Describa las características de los semiconductores en relación a los aislantes y los metales. Explique a que se deben las diferencias de comportamiento, frente a la temperatura, entre metales y semiconductores.
2. En un SC intrínseco, el número de electrones libres:
 - a. es igual al número de huecos
 - b. es mayor que el número de huecos
 - c. es menor que el número de huecos
 - d. depende de la temperatura.
3. ¿Cómo es posible que el agregado de cantidades tan pequeñas de impurezas como 1 parte en 100.000.000 altere tan profundamente las propiedades eléctricas de un semiconductor? ¿Qué consecuencias tiene esto respecto de las características necesarias de los materiales de partida?
4. Analice críticamente el siguiente párrafo del texto citado en 1:

"Como sabemos el movimiento de los electrones se verifica en dirección opuesta al campo, desplazándose siempre hacia los puntos de energía potencial más baja. Así pues, la aplicación del campo eléctrico hace que los electrones de la banda de conducción se muevan dentro de la banda bajando hacia los puntos de menor potencial. Igualmente, cuando se trata de la banda de valencia, también puede existir movimiento de electrones siempre que exista un hueco o estado vacante en las proximidades,(...).De esto se concluye que los huecos de la banda de valencia se desplazan en la dirección del campo eléctrico o, lo que es lo mismo, hacia valores de energía potencial más elevada".

¿Hay alguna contradicción?

5. ¿Cuál es el sentido de la corriente eléctrica transportada por los huecos, comparada con la de los electrones de la banda de conducción?
6. ¿Puede haber huecos en un metal? ¿Bajo qué condiciones es conveniente introducir el concepto de "hueco"?
7. Dado que la consecuencia más importante del proceso de dopado es el aumento de la concentración de portadores, ¿es posible alguna situación en la que la concentración de portadores sea mayor que la concentración de impurezas añadidas?
8. En la fabricación de diodos se parte de un SC extrínseco y se lo sobredopa en una pequeña región, para cambiar el signo de los portadores mayoritarios. Si el extrínseco fuese de tipo **p**, ¿con qué tipo de impureza debería ser sobredopado?
9. Utilizando el modelo de las bandas de energía electrónicas, explique detalladamente los procesos que ocurren en un SC extrínseco bajo la acción

ELECTROMAGNETISMO-ESTADO SÓLIDO II.

de un campo eléctrico, a temperatura ambiente y que determinan sus propiedades eléctricas.

10. Al dopar un SC intrínseco, aumenta fuertemente la concentración de uno de los portadores. ¿Qué sucede con la concentración del otro? ¿Por qué?
11. Escribir en unos pocos (3 ó 4) renglones una explicación de los siguientes términos de la teoría de semiconductores:

banda de conducción:

gap:

intrínseco/extrínseco:

par hueco-electrón:

recombinación:

excitación térmica:

dopado:

concentración de portadores:

BIBLIOGRAFÍA AMPLIATORIA

Textos

Albella, J.M., Martinez Duart, J.M. (2005). *Fundamentos de microelectrónica, nanoelectrónica y fotónica*. Madrid. Pearson Educación.

García, N., Damask, A. (1998) *Physics for computer science students*. (2nd ed.). Springer.

Kittel, C. (1975) *Introducción a la física del estado sólido* (3^a ed.) Reverte.

En la web

Blog de ciencia, con un interesante artículo sobre la tecnología de fabricación de semiconductores.

<http://blogs.publico.es/ignacio-martil/2016/11/18/silicio-la-materia-prima-de-dos-revoluciones-la-electronica-y-la-energetica/>

Sitio donde se detalla un plan nacional de producción de semiconductores (año 2012)

<http://ingenieroandreotti.blogspot.com.ar/2013/01/plan-solar-san-juan-fabricacion-de.html>

Stio de Intel sobre fabricación de chips.

<https://www-ssl.intel.com/content/www/us/en/support/articles/000015079/programs.html>