

## Actividad Clase 3 - Semiconductores – Nicolas Di Domenico

1] Los semiconductores forman un grupo de materiales que presenta un comportamiento intermedio entre los conductores y los aislantes. (...) *los semiconductores en estado puro y a temperaturas bajas presentan una conductividad relativamente baja por lo que sus propiedades se asemejan a la de los aislantes. Sin embargo, la conductividad de estos materiales es una función creciente con la temperatura de forma que a la temperatura ambiente la mayoría de los semiconductores presentan una conductividad apreciable, aunque siempre es menor que la de un metal.* Incluso a una temperatura dada, es posible variar a voluntad la conductividad de estos materiales si se les añade una cantidad controlada de impurezas (...). Es precisamente esta característica la que ha permitido desarrollar una gran variedad de componentes y dispositivos electrónicos basados en los materiales semiconductores. (Albella, Martínez-Duart. **Fundamentos de electrónica física y microelectrónica**. Addison Wesley. Madrid 1996)

**1.1.** Analice el párrafo en *itálica*. Amplíe la descripción de las características de los semiconductores en relación a los aislantes y los metales. Explique a qué se deben las diferencias de comportamiento, frente a la temperatura, entre metales y semiconductores.

El párrafo en *itálica* señala que a bajas temperaturas los **semiconductores puros** tienen muy **baja conductividad**, por lo tanto, se **comportan como aislantes**. Esto se debe a que, en esas condiciones, todos los electrones están ocupando la **banda de valencia** y no hay electrones libres en la **banda de conducción**, que es la que permite el movimiento de cargas.

A medida que aumenta la temperatura, los electrones ganan energía suficiente para **saltar el “gap” (brecha energética)** que separa ambas bandas y pasan a la banda de conducción. Esto **aumenta la conductividad**, aunque sigue siendo menor que la de un metal.

Comparando:

- Un **aislante** tiene un gap muy grande, mayor a 3 eV, así que los electrones **no pueden saltar**, ni siquiera con aumento de temperatura → sigue sin conducir.
- Un **semiconductor** tiene un gap más pequeño, de aproximadamente 1 eV, por lo que con **temperaturas moderadas**, algunos electrones sí logran saltar y se genera conductividad.
- Un **metal** no tiene gap: su banda de conducción ya tiene electrones libres, aunque la temperatura sea baja, siempre conduce bien.

Por lo tanto, el comportamiento de los semiconductores es **intermedio**: no conducen como los metales, pero **a diferencia de los aislantes**, sí lo pueden hacer si reciben energía (por temperatura o luz, por ejemplo).

Las diferencias de comportamiento frente a la temperatura entre metales y semiconductores se deben a la distinta estructura electrónica de ambos materiales. En los metales, los electrones responsables de la conducción ya se encuentran en la banda de conducción incluso a baja temperatura, por lo que su número no cambia; sin embargo, al aumentar la temperatura, las vibraciones térmicas del retículo cristalino generan más colisiones y dificultan el movimiento de los electrones, reduciendo la conductividad. En cambio, en los semiconductores, a bajas temperaturas casi no hay electrones libres, pero al aumentar la temperatura, muchos adquieren suficiente energía para saltar la brecha de energía (gap) hacia la banda de conducción, lo que incrementa la cantidad de portadores de carga y, por ende, aumenta la conductividad.

**1.2.** Respecto del párrafo subrayado, justifique o critique lo que allí se dice. Amplíe respecto de las consecuencias tecnológicas que tiene la posibilidad descripta. (Máx. 15 renglones)

El párrafo es correcto porque explica una de las características más importantes de los semiconductores: **su conductividad eléctrica se puede modificar a propósito**. Esto se logra mediante un proceso llamado **dopado**, que consiste en **agregar pequeñas cantidades de otras sustancias (impurezas)** al material. Aunque estas impurezas están en cantidades muy chicas (como 1 átomo cada 10 millones), son suficientes para **cambiar mucho la capacidad del material de conducir corriente eléctrica**.

Dependiendo del tipo de átomo que se agregue, se pueden generar **más electrones libres** (llamado tipo **n**) o **más huecos** (lugares donde falta un electrón, llamado tipo **p**). Estos electrones o huecos son los que se mueven y generan corriente.

La posibilidad de elegir cuánta conductividad queremos y qué tipo, permite construir zonas diferentes dentro del mismo semiconductor. Esto es fundamental para crear **componentes como diodos, transistores y chips**, que son la base de **todos los dispositivos electrónicos modernos**. Gracias a esta propiedad, los semiconductores hicieron posible la revolución tecnológica.

**2]** Se ha dicho que el comportamiento de un semiconductor intrínseco frente a las variaciones de temperatura constituye una limitación para posibles aplicaciones prácticas. ¿Es esto absoluto? ¿Se le ocurre algún ejemplo de aplicación práctica de esta característica?

No, no es una limitación absoluta. Aunque los **semiconductores intrínsecos** (es decir, los puros, sin impurezas) tienen una **baja conductividad** a temperatura ambiente y eso puede parecer una desventaja, en realidad **su sensibilidad a la temperatura puede aprovecharse** en ciertas aplicaciones.

Por ejemplo, se usan en **sensores térmicos** o **termómetros electrónicos**, porque su conductividad **aumenta mucho con el calor**. Esto permite detectar pequeños cambios de temperatura de forma precisa. También pueden utilizarse en detectores de radiación infrarroja o en circuitos de protección contra sobrecalentamiento.

Por lo tanto, aunque su uso es limitado comparado con los semiconductores dopados (extrínsecos), **sí tienen aplicaciones prácticas útiles gracias a esa característica de variar con la temperatura**.

### 3] Discuta la validez de las siguientes afirmaciones

En un semiconductor 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

La afirmación **correcta es la opción a)**. Esto es así porque en un **semiconductor intrínseco (puro)**, los electrones que pueden moverse (electrones libres) aparecen solo cuando **ganan energía (por ejemplo, con temperatura)** y **saltan desde la banda de valencia a la banda de conducción**.

Pero cuando un electrón hace ese salto, **deja un hueco en su lugar**, así que **siempre se forman en pares: 1 electrón libre = 1 hueco**. Por lo tanto, su número es **siempre igual**.

Las opciones **b)** y **c)** son **incorrectas**, porque no puede haber más de uno que del otro: **siempre se generan juntos**.

La afirmación **d)** también es **correcta**, porque la **cantidad total** de estos portadores **sí depende de la temperatura** (a más temperatura, más pares electrón-hueco).

4] ¿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?

El agregado de cantidades tan pequeñas de impurezas como 1 parte en 100.000.000 puede alterar profundamente las propiedades eléctricas de un semiconductor porque, en estado puro, la cantidad de portadores de carga (electrones libres y huecos) es extremadamente baja. En estos materiales, la conductividad depende directamente de cuántos electrones pueden moverse, y naturalmente hay muy pocos. Sin embargo, al agregar impurezas específicas (como átomos del grupo III o V), cada uno puede generar un portador nuevo, ya sea un electrón libre o un hueco, sin necesidad de aumentar la temperatura. Esto provoca un cambio drástico en la conductividad, aumentando miles o incluso millones de veces su valor original. La sensibilidad del semiconductor a este tipo de modificación es lo que permite su uso en componentes electrónicos.

Como consecuencia, los materiales de partida deben ser de una pureza extremadamente alta. Si el semiconductor ya contiene impurezas no controladas, el efecto del dopado no se puede predecir ni manejar con precisión, lo que impediría fabricar dispositivos confiables. Por eso, se requiere que el material base, como el silicio, tenga una pureza del orden de una impureza cada 10.000.000.000 de átomos. Además, la estructura cristalina debe ser perfecta, sin defectos ni átomos desordenados, ya que cualquier irregularidad puede afectar el comportamiento eléctrico del material. Esta exigencia en la calidad del material es fundamental para que el dopado sea efectivo y para asegurar el buen funcionamiento de los dispositivos electrónicos fabricados.

5] 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?

No hay contradicción en el párrafo, siempre que se entienda correctamente cómo se comportan los **electrones** y los **huecos** en un semiconductor.

Primero, es cierto que los **electrones**, al tener carga negativa, se mueven **en dirección opuesta al campo eléctrico** y tienden a ir hacia donde hay **menor potencial eléctrico** (mayor energía potencial). En la banda de conducción, pueden moverse libremente y producir corriente.

En la **banda de valencia**, también puede haber movimiento de electrones, pero allí ocurre de una forma distinta: un electrón salta desde una posición ocupada a un **hueco**

(una posición vacía cercana), y este salto deja un nuevo hueco en el lugar original. Este proceso es equivalente a que el **hueco se haya movido** en la **misma dirección del campo eléctrico**, y hacia un **potencial eléctrico más alto** (aunque no haya una partícula física que lo haga). El hueco se comporta como una partícula con carga positiva.

Entonces, aunque son los electrones los que realmente se mueven, el modelo de los huecos ayuda a visualizar y describir la corriente en la banda de valencia. Por eso, el párrafo es correcto y no tiene contradicción: **los electrones se mueven contra el campo**, mientras que **los huecos (como cargas positivas) lo hacen a favor del campo**.

**6]** ¿Cuál es el sentido de la corriente eléctrica transportada por los huecos, comparada con la de los electrones de la banda de conducción?

La corriente eléctrica transportada por los **huecos** tiene **el mismo sentido** que la corriente transportada por los **electrones de la banda de conducción**. Aunque los huecos no son partículas reales, se comportan como si fueran **cargas positivas** que se mueven **a favor del campo eléctrico**.

En realidad, lo que ocurre es que los **electrones de la banda de valencia** saltan de un átomo a otro ocupando huecos cercanos. Cada vez que un electrón se mueve hacia un hueco, **el hueco “se mueve” en sentido contrario**, pero como el hueco tiene carga positiva, se dice que **su movimiento es a favor del campo eléctrico**, lo que genera una corriente en ese mismo sentido.

Por lo tanto, tanto los **electrones libres** (que se mueven contra el campo) como los **huecos** (que se mueven a favor del campo) **aportan corriente en la misma dirección**, y sus efectos **se suman**.

**7]** ¿Puede haber huecos en un metal? ¿Bajo qué condiciones es conveniente introducir el concepto de "hueco"?

En los metales, que son materiales conductores, **no es necesario introducir el concepto de hueco**, porque su estructura electrónica es diferente a la de los semiconductores. En un metal, **las bandas de valencia y de conducción se superponen**, lo que significa que **hay electrones disponibles para moverse libremente sin necesidad de excitarse o saltar de una banda a otra**.

**8]** 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?

Sí, es posible que la **concentración de portadores** (es decir, la cantidad de electrones o huecos disponibles para conducir corriente) sea **mayor** que la **concentración de impurezas** añadidas durante el dopado, pero solo en determinadas condiciones.

Esto ocurre cuando se trabaja a **temperaturas elevadas**. A medida que la temperatura sube, además del efecto del dopado, se activa también el **mecanismo intrínseco**, es decir, se empiezan a formar pares electrón-hueco **por excitación térmica**. Estos portadores se suman a los ya generados por el dopado.

En temperaturas bajas o moderadas, el número de portadores suele coincidir con la cantidad de impurezas (por ejemplo, un electrón libre por cada átomo donante). Pero a temperaturas altas, los portadores generados por el calor **pueden superar en número a las impurezas**, haciendo que el comportamiento del semiconductor deje de estar dominado por el dopado y pase a ser como el de un **semiconductor intrínseco**. A esto se lo llama **régimen intrínseco**.

**9]** 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?

Si se parte de un **semiconductor extrínseco tipo p**, significa que sus **portadores mayoritarios** son **huecos**, generados por dopado con **átomos trivalentes** (como el boro), que pertenecen al **grupo III** de la tabla periódica.

Para cambiar el tipo de portadores y pasar de **tipo p a tipo n**, es necesario introducir impurezas que generen **electrones libres**, es decir, átomos que aporten un electrón adicional. Estos son los **átomos pentavalentes**, que pertenecen al **grupo V** de la tabla periódica, como el **fósforo (P)**, **arsénico (As)** o **antimonio (Sb)**.

Entonces, si queremos sobredopar una región del semiconductor tipo p para que se vuelva de tipo **n**, debemos doparla con **impurezas del grupo V**, que generen una alta concentración de **electrones** y hagan que estos se conviertan en los **portadores mayoritarios** en esa zona.

Esto es exactamente lo que se hace en la **fabricación de un diodo**, donde se une una región tipo p con una tipo n, formando la llamada **unión pn**, que es la base de su funcionamiento.

**10]** Utilizando el modelo de las bandas de energía electrónicas, haga una descripción detallada de los procesos que ocurren en un SC extrínseco bajo la acción de un campo eléctrico, a temperatura ambiente y que explican sus propiedades eléctricas.

En un **semiconductor extrínseco**, la estructura de bandas es la misma que en uno intrínseco: hay una **banda de valencia** (llena de electrones) y una **banda de conducción** (vacía en estado puro), separadas por un **gap** (una brecha de energía). Lo que cambia es que, al dopar el material con impurezas específicas, se introducen **niveles de energía adicionales dentro del gap**, muy cercanos a una de las bandas.

- En un **tipo n**, se agregan impurezas del grupo V (pentavalentes) que introducen **electrones libres** en la **banda de conducción**, incluso a temperatura ambiente.
- En un **tipo p**, se agregan impurezas del grupo III (trivalentes) que crean **huecos** en la **banda de valencia**, al aceptar electrones.

Cuando se aplica un **campo eléctrico externo**, estos portadores (electrones en tipo n, huecos en tipo p) **comienzan a moverse**:

- Los **electrones**, con carga negativa, se desplazan **en sentido contrario al campo**.
- Los **huecos**, con carga positiva, se mueven **a favor del campo**.

Este movimiento de portadores genera una **corriente eléctrica neta** en el semiconductor. Como en un extrínseco hay una gran cantidad de portadores gracias al dopado, la **conductividad eléctrica es mucho mayor** que en un semiconductor intrínseco.

A temperatura ambiente, el dopado es suficiente para mantener una alta concentración de portadores, pero además hay cierta generación térmica de pares electrón-hueco por excitación térmica, aunque en menor medida. En este contexto, el **modelo de bandas de energía permite visualizar claramente** cómo los portadores se distribuyen, se mueven y explican el buen comportamiento eléctrico del material dopado.

**11]** Al dopar un SC intrínseco, aumenta fuertemente la concentración de uno de los portadores. ¿Qué sucede con la concentración del otro? ¿Por qué?

Cuando se dopa un **semiconductor intrínseco** (que en estado puro tiene igual cantidad de electrones libres y huecos), se agrega una impureza que hace aumentar mucho **uno solo** de los dos tipos de portadores.

Por ejemplo:

- Si se agregan impurezas que liberan **electrones**, el material se vuelve **tipo n**, y los **electrones** pasan a ser los **portadores mayoritarios**.
- Si se agregan impurezas que generan **huecos**, el material se vuelve **tipo p**, y los **huecos** son los **portadores mayoritarios**.

Al ocurrir esto, la **concentración del otro portador (el minoritario) disminuye notablemente**. Esto sucede porque los dos tipos de portadores están relacionados: **cuando uno aumenta, el otro baja**. Esa relación se mantiene porque el material está en equilibrio, y no puede tener cualquier combinación de portadores.

Por eso, al dopar, no solo se aumenta un tipo de portador, sino que también se **reduce la cantidad del otro**, que queda en segundo plano. Este comportamiento es lo que permite controlar el tipo de conducción eléctrica en los semiconductores.

**12]** Escribir en unos pocos (3 ó 4) renglones una explicación de los siguientes términos de la teoría de semiconductores:

**Banda de conducción:**

Es la zona de energía donde los electrones pueden moverse libremente por el material y conducir corriente. Solo los electrones que están en esta banda pueden generar electricidad.

**Gap:**

Es la brecha de energía entre la banda de valencia (llena) y la banda de conducción (vacía). Si es pequeña, los electrones pueden saltar más fácilmente y el material conduce mejor.

**Intrínseco / Extrínseco:**

Un semiconductor intrínseco es puro, sin impurezas. Un extrínseco es dopado con impurezas que aumentan su capacidad de conducir electricidad.

**Tipo p / Tipo n:**

En un semiconductor tipo p los portadores mayoritarios son huecos (falta de electrones). En el tipo n, los portadores mayoritarios son electrones libres.

**Par hueco-electrón:**

Se forma cuando un electrón gana energía y salta a la banda de conducción, dejando un hueco en la banda de valencia. Ambos pueden moverse y transportar carga.

**Recombinación:**

Es el proceso en el cual un electrón de la banda de conducción vuelve a ocupar un hueco en la banda de valencia, desapareciendo ambos portadores.

**Excitación térmica:**

Es cuando un electrón gana energía debido al calor y salta desde la banda de valencia a la de conducción, generando un par hueco-electrón.



**Dopado:**

Es la incorporación controlada de impurezas en un semiconductor para aumentar la cantidad de portadores y mejorar su conductividad.

**Concentración de portadores:**

Es la cantidad de electrones libres y huecos que hay en el material. Determina cuán bien conduce el semiconductor.

**Portador minoritario / mayoritario:**

El mayoritario es el tipo de portador que más abunda (electrones o huecos), según el dopado. El minoritario es el otro, presente en menor cantidad.