Capítulo 5

SEMICONDUCTORES

1. Semiconductores intrínsecos. Electrones y huecos

2. Semiconductores extrínsecos. Tipos "p" y "n"

3. Ecuación del semiconductor

4. Condición de neutralidad eléctrica

Augusto Beléndez, Carlos Pastor y Agapito Martín. Semiconductores.
En "Física para estudiantes de informática III". Universidad Politécnica de Valencia (1990). ISBN: 84-7721-125-6

1. Semiconductores. Electrones y huecos

En los semiconductores puros la conducción tiene lugar por medio de electrones que están presentes sólo a causa del material cristalino puro (por ejemplo, Ge o Si) y no a causa de elementos extraños. Para estos materiales la banda de energía prohibida es mucho menor que en un aislante típico cuando la temperatura está próxima a los 0 K, estando, también a esa temperatura, la banda de conducción vacía y la de valencia llena, por lo que no existe conducción. La única posibilidad de que haya conducción es comunicar a los electrones una energía igual o mayor que E_G (energía de separación de la banda prohibida) -que los hace pasar a la banda de conducción-, lo que puede conseguirse, por ejemplo, mediante excitación térmica o luminosa. A la temperatura ambiente, E_G vale, para el Si 1'12 eV y para el Ge 0'72 eV. Es decir, a la temperatura ambiente el calor puede ser suficiente para que pase un pequeño número de electrones desde la banda de valencia a la de conducción. Este tipo de materiales recibe el nombre de *semiconductores intrínsecos,* y el tipo de conducción el de *conducción intrínseca.*

Augusto Beléndez, Carlos Pastor y Agapito Martín. Semiconductores.
En "Física para estudiantes de informática III". Universidad Politécnica de Valencia (1990). ISBN: 84-7721-125-6

Para comprender la naturaleza de la conducción intrínseca es importante tener presente la estructura cristalina del germanio y el silicio. Sus configuraciones electrónicas son:

$$Si: \ 1s^2\ 2s^2\ 2p^6\ 3s^2\ 3p^2$$

$$Ge: \ 1s^2\ 2s^2\ 2p^6\ 3s^2\ 3p^6\ 3d^{10}\ 4s^2\ 4p^2$$

es decir, ambos elementos cuentan con cuatro electrones en su última capa.

La estructura cristalina del Ge o del Si es muy similar a la del diamante. Cada átomo está situado en los vértices de un tetraedro regular. El enlace entre cada pareja de átomos es covalente estando cada átomo rodeado por otros cuatro con los que comparte los cuatro electrones de valencia.

Los modelos más utilizados para representar esquemáticamente las estructuras de los semiconductores son el de bandas de energía y el bidimensional de enlaces. El segundo, por su simplicidad, es muy intuitivo para explicar los procesos de conducción en semiconductores, pero no permite ningún tratamiento cuantitativo y hay que tener precaución en su uso, para no extraer demasiadas conclusiones, que serían erróneas al utilizar un modelo tan simple.

En la figura 1 se muestra un modelo bidimensional de un cristal puro a temperatura muy baja, cuando todos los electrones de valencia permanecen ligados en enlaces covalentes. El símbolo +4 encerrado dentro de un círculo representa al ión Ge^{+4} o al Si^{+4}, formado por un átomo de uno de estos elementos al que se le han quitado sus cuatro electrones de valencia. Por otra parte, en el diagrama de bandas vemos que la banda de valencia (BV) se encuentra completamente llena y la de conducción (BC) vacía -a 0 K-, estando estas bandas separadas por una banda prohibida (BP) de anchura E_G.

En esta situación ya hemos indicado que no existe conducción: el material es aislante.

Augusto Beléndez, Carlos Pastor y Agapito Martín. Semiconductores.
En "Física para estudiantes de informática III". Universidad Politécnica de Valencia (1990). ISBN: 84-7721-125-6

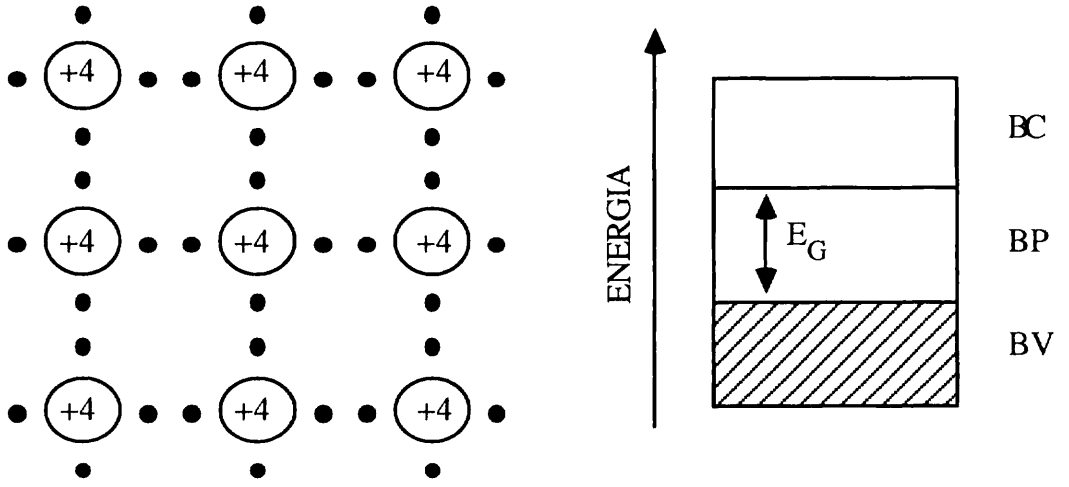

Figura 1

A temperatura superior, la vibración térmica de los átomos de la red cristalina hace que se rompa algún enlace y algunos de los electrones ligados lo abandonen, quedando libres. Por otra parte, en el enlace no saturado aparece como una concentración de carga positiva que se denomina *hueco* (figura 2). El lugar vacío en el enlace covalente dejado por el electrón liberado puede ser ocupado por uno de los electrones de valencia vecinos, con lo que el lugar de la falta de electrón habrá cambiado de sitio: el hueco se ha "movido". El lugar vacante no produce corriente por sí mismo pero permite que otro electrón se mueva, sin que haya que suministrar una energía adicional para romper el enlace.

La propiedad más destacable que hace diferente un semiconductor de un metal es que el hueco dejado en el enlace covalente por el electrón liberado, se comporta como si fuera una nueva partícula libre con carga eléctrica positiva de $1'6 \times 10^{-19}$ C. En el metal la conducción se produce por el movimiento de los electrones libres, mientras que en un semiconductor puro aparecen dos tipos de portadores de carga, los electrones libres y los huecos. Al aplicar un campo eléctrico ambos tipos de portadores se desplazarán en sentidos contrarios, dando lugar a corrientes eléctricas en el mismo sentido. Resulta, sin embargo, sorprendente que un hueco pueda moverse, a pesar de que el átomo ionizado

Augusto Beléndez, Carlos Pastor y Agapito Martín. Semiconductores.
En "Física para estudiantes de informática III". Universidad Politécnica de Valencia (1990). ISBN: 84-7721-125-6

no se mueva.

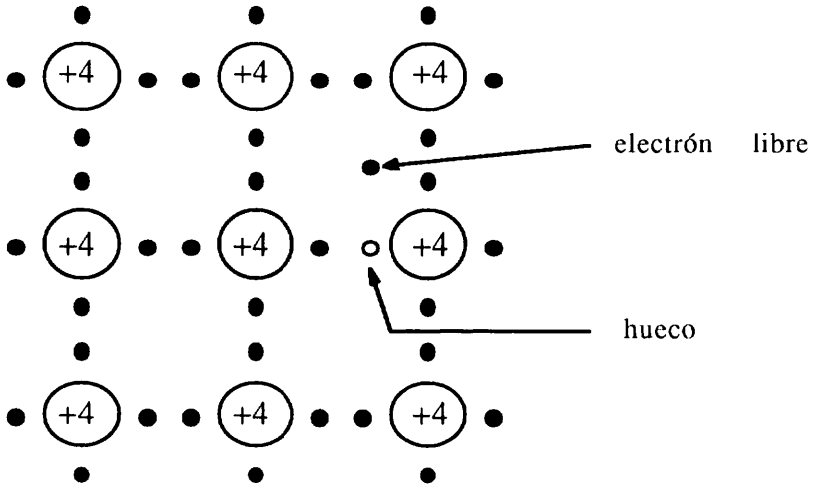

Figura 2

Una forma de visualizar este movimiento se tiene en la figura 3, en la que un electrón de un enlace covalente en la parte inferior ha saltado a un hueco. El resultado es que parece que el hueco se haya desplazado a la parte superior. Obsérvese que el electrón liberado inicialmente no interviene en este proceso y puede desplazarse de manera totalmente independiente. Se ha convertido en un electrón de conducción.

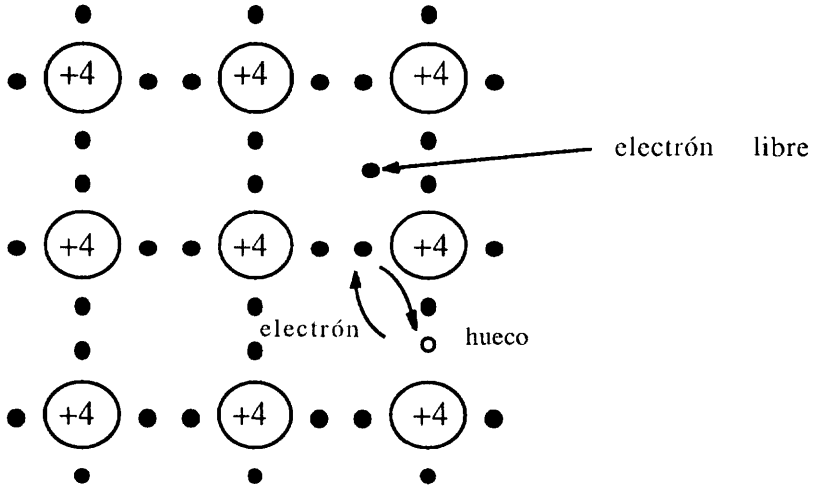

Figura 3

Augusto Beléndez, Carlos Pastor y Agapito Martín. Semiconductores.
En "Física para estudiantes de informática III". Universidad Politécnica de Valencia (1990). ISBN: 84-7721-125-6

En un semiconductor puro los electrones de conducción y los huecos siempre están presentes en igual número ya que el proceso de liberar un electrón ligado produce un hueco. Cada vez que se libera un electrón se dispone de dos portadores de corriente y el cristal presenta conductividad eléctrica.

Estudiemos la generación de un par electrón-hueco mediante un diagrama de energías. A temperaturas muy bajas no hay electrones en la banda de conducción estando la de valencia llena. Si se suministra una energía E, igual o superior a la anchura de la banda prohibida, E_G, electrones de la banda de valencia pueden pasar a la de conducción, dando lugar a electrones libres en la banda de conducción y a huecos en la de valencia.

El fondo de la banda de conducción, E_C, representa la mínima energía de un electrón libre y el techo de la banda de valencia, E_V la máxima energía cinética del hueco (figura 4).

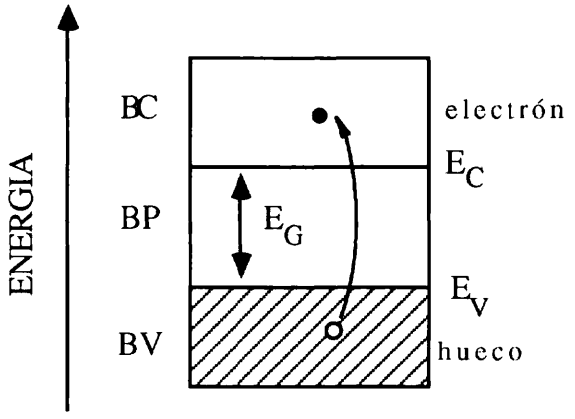

Figura 4

En resumen, los semiconductores puros (intrínsecos) son aislantes en los cuáles la discontinuidad de energía entre la banda de valencia y la de conducción es aproximadamente de un eV o menos, de modo que es relativamente fácil excitar térmicamente a los electrones desde la banda de valencia a la de conducción.

Augusto Beléndez, Carlos Pastor y Agapito Martín. Semiconductores.
En "Física para estudiantes de informática III". Universidad Politécnica de Valencia (1990). ISBN: 84-7721-125-6

En la siguiente tabla se da la discontinuidad de energía, E_G, de algunos aislantes y semiconductores.

AISLANTES	E_G (eV)	SEMICONDUCTORES	E_G (eV)
Diamante	5'33	Silicio	1'12
Oxido de zinc	3'20	Germanio	0'67
Cloruro de plata	3'20	Teluro	0'33
Sulfuro de cadmio	2'42	Antimoniuro de indio	0'23

2. Semiconductores extrínsecos. Tipos "n" y "p"

Mediante la operación de añadir a un semiconductor puro cantidades minúsculas, del orden de una parte por millón, de sustancias extrañas adecuadas o impurezas (átomos diferentes), es posible que los semiconductores presenten conductividad eléctrica para un rango de temperaturas mayor. Esta operación recibe el nombre de **dopado.**

Para conseguir esta conductividad basta con sustituir algunos de los átomos del semiconductor puro por otros diferentes que tengan un electrón de valencia más o uno menos que el semiconductor puro. El semiconductor dopado recibe el nombre de *semiconductor extrínseco,* y el tipo de conducción el de *conducción extrínseca.*

Augusto Beléndez, Carlos Pastor y Agapito Martín. Semiconductores.
En "Física para estudiantes de informática III". Universidad Politécnica de Valencia (1990). ISBN: 84-7721-125-6

2.1.- SEMICONDUCTORES DEL TIPO "n"

Si se elige un átomo que tenga un electrón más de valencia, es decir, del grupo V de la tabla periódica, como el arsénico, antimonio o fósforo, encajará fácilmente en la estructura covalente, pues cuatro de sus electrones de valencia pueden formar enlaces covalentes con los cuatro átomos adyacentes de la red, pero el quinto electrón queda débilmente ligado. Este electrón puede liberarse con una energía de ionización pequeña e incluso a bajas temperaturas se puede convertir en un electrón libre (electrón de conducción). Es importante observar que el ión positivo que queda por la liberación del electrón, tiene a su alrededor el mismo número de electrones que cualquiera de los átomos del semiconductor original puro. Sin embargo, el ión positivo es una carga fija, no es un hueco.

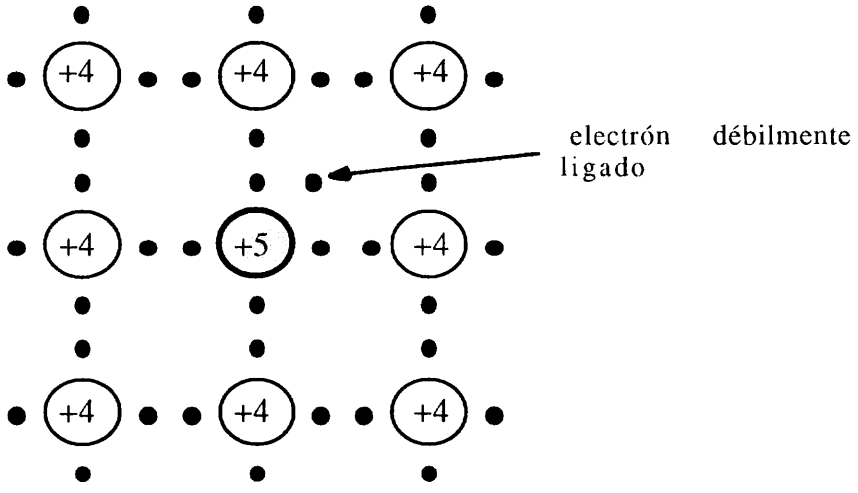

Figura 5

La propiedad de los elementos pentavalentes de dar un electrón libre al cristal sin crear un hueco, ha hecho que se denominen *donantes.* Se dice que hacen al semiconductor del *tipo n* o por exceso, porque conduce la corriente principalmente mediante electrones de conducción cargados

Augusto Beléndez, Carlos Pastor y Agapito Martín. Semiconductores.
En "Física para estudiantes de informática III". Universidad Politécnica de Valencia (1990). ISBN: 84-7721-125-6

negativamente. Sin embargo, siempre existirán algunos huecos si la temperatura es superior a 0 K, porque algunos enlaces covalentes se romperán por efecto térmico (pues se crearán pares electrón-hueco al ser $T \neq 0$ K). El número de huecos es muy pequeño, pero en el material de tipo n siempre existirán a temperatura ambiente. Por esta razón se llama a los electrones de conducción **portadores mayoritarios** en el material tipo n, mientras que los huecos son **portadores minoritarios.**

Desde el punto de vista del diagrama energético, la existencia de impurezas en la red del semiconductor se manifiesta en la aparición de un nivel local en la banda prohibida. Cuando el dopado se realiza con un donante este nivel recibe el nombre de *nivel donante.* Puesto que al ionizarse el átomo pentavalente se origina un electrón libre, y para su desprendimiento se necesita mucha menor energía que para la ruptura de los enlaces covalentes del elemento tetravalente, el nivel de la impureza donadora debe situarse en la banda prohibida, a poca profundidad bajo el fondo de la banda de conducción (figura 6).

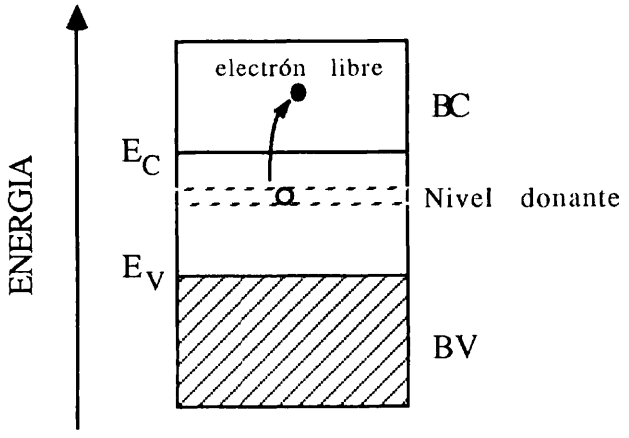

Figura 6

Augusto Beléndez, Carlos Pastor y Agapito Martín. Semiconductores.
En "Física para estudiantes de informática III". Universidad Politécnica de Valencia (1990). ISBN: 84-7721-125-6

2.2.- SEMICONDUCTORES DEL TIPO "p"

Si la impureza introducida en un cristal de semiconductor puro es un elemento de valencia 3 (procedente del grupo III del sistema periódico), como el boro, aluminio o galio, cuando es neutro el átomo no completa la estructura de enlaces con los vecinos. Por tanto, el hueco indicado en la figura 7 atrae a los electrones ligados ordinarios casi tanto como lo haría si se hubiera producido cerca de uno de los átomos originales del cristal. La diferencia consiste en que este último hubiera estado cargado positivamente, mientras que el átomo extraño es neutro. Incluso a temperaturas relativamente bajas, los demás electrones ligados se dirigen hacia el hueco, con lo cual se dispondrá de nuevos huecos para la conducción. El átomo extraño queda cargado negativamente cuando completa los enlaces covalentes, pero el átomo no puede moverse, no puede contribuir a la conductibilidad con ningún portador negativo.

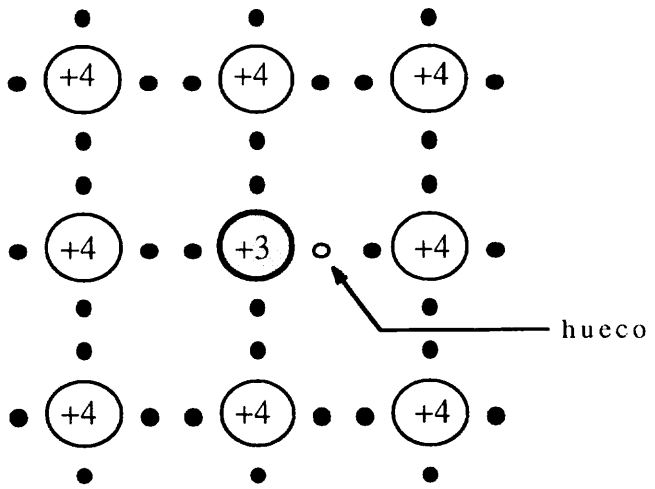

Figura 7

Los átomos del grupo III del sistema periódico reciben el nombre de *aceptores* por su predisposición a aceptar electrones ligados. Por añadir

Augusto Beléndez, Carlos Pastor y Agapito Martín. Semiconductores.
En "Física para estudiantes de informática III". Universidad Politécnica de Valencia (1990). ISBN: 84-7721-125-6

huecos al material sin añadir electrones de conducción, se dice que el material es de *tipo p* o por defecto, pues éste conduce principalmente mediante huecos cargados **p**ositivamente. También pueden existir algunos electrones libres, si la temperatura es superior a 0 K, pues algunos enlaces se romperán por efecto térmico (creándose pares-electrón-hueco), pero este número de electrones es muy pequeño. En un semiconductor de tipo p los huecos son los **portadores mayoritarios**, mientras que los electrones son los **portadores minoritarios**.

En la figura 8 se ha representado el diagrama de energías correspondiente a un semiconductor tipo p. La impureza aceptora origina un nivel de energía, denominado*nivel aceptor,* en la banda prohibida, a poca distancia sobre el techo de la banda de valencia. La ionización de la impureza aceptora supone el salto de un electrón desde la banda de valencia hasta el nivel aceptador, apareciendo en la banda de valencia un enlace vacante, es decir, un hueco, que es precisamente el portador de carga libre.

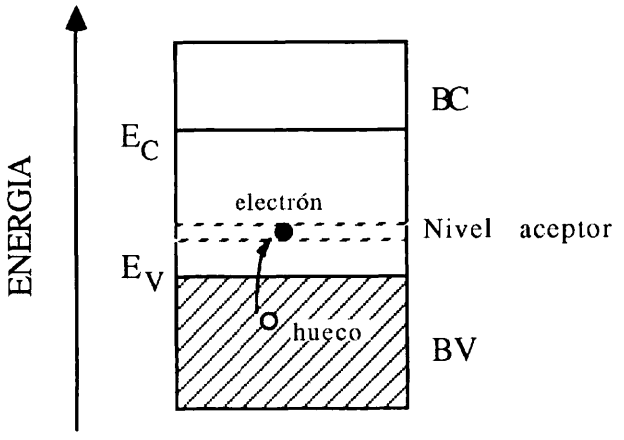

Figura 8

Si a un mismo semiconductor se añaden átomos dadores y aceptores, sólo queda el efecto del exceso del de mayor densidad.

Augusto Beléndez, Carlos Pastor y Agapito Martín. Semiconductores.
En "Física para estudiantes de informática III". Universidad Politécnica de Valencia (1990). ISBN: 84-7721-125-6

3. Ecuación del semiconductor

Llamemos n y p a la concentración de electrones libre y huecos, respectivamente, en un semiconductor. Cuando, por excitación térmica, un electrón abandona la banda de valencia y deja tras de sí un hueco en un semiconductor intrínseco, el número de electrones libres es igual al de huecos, es decir

$$n = p = n_i = p_i$$

donde n_i y p_i son las concentraciones intrínsecas de portadores. En general, para cualquier semiconductor, los procesos de generación de pares electrón-hueco y de recombinación son continuos, y para cada temperatura se llega a un equilibrio en el que el producto np es constante. Se cumple que:

$$np = n_i^2 = p_i^2 = \text{constante} \quad (\text{para } T \text{ y } E_G \text{ fijas})$$

Esta ecuación es esencial en el estudio de semiconductores y dispositivos semiconductores y recibe el nombre de ecuación del semiconductor o **ley de acción de masas**, y es válida para semiconductores intrínsecos y extrínsecos en equilibrio térmico. Fuera del equilibrio, esto es, cuando n y p están gobernadas en el dispositivo por condiciones externas, se tiene $np \neq n_i^2$.

4. Condición de neutralidad eléctrica

Si el semiconductor se encuentra dopado la ley de acción de masas no es suficiente para determinar la concentración de portadores. Además es preciso añadir una relación que ligue dichas concentraciones con la densidad

Augusto Beléndez, Carlos Pastor y Agapito Martín. Semiconductores.
En "Física para estudiantes de informática III". Universidad Politécnica de Valencia (1990). ISBN: 84-7721-125-6

- ALONSO, M. y FINN, E. J. "**Física. Tomo III: Fundamentos cuánticos y estadísticos**". *Addison-Wesley Iberoamericana (México). 1986.*

- BELENDEZ, A., BERNABEU, J. G., VERA, J., PASTOR, C. y MARTIN, A. "**Prácticas de Física**". *Universidad Politécnica de Valencia (Valencia). 1988.*

- BONET, E., CRUZ, J. M., MAS, J., MESEGUER, J. M., PAGE, A., ROBLES, M. y ROMERO, F. "**Prácticas de Física**". *Universidad Politécnica de Valencia (Valencia). 1987.*

- BUECHE, F. J. "**Física para Estudiantes de Ciencias e Ingeniería. Tomo II**". *Mc Graw-Hill (México). 1988.*

- CARTUJO, P., RUBIO, F., HERNANDEZ, A., MIRA, J., SERRA, F. y BAILON, L. A. "**Electrónica I (Física)**". *UNED (Madrid). 1976.*

- CATALA, J. "**Física**". *Saber (Valencia). 1988.*

- EISBERG, R. y RESNICK, R. "**Física Cuántica**". *Limusa (México). 1986.*

- FERNANDEZ, J. y PUJAL, M. "**Iniciación a la Física. Tomo II**". *Reverté (Barcelona). 1985.*

Augusto Beléndez, Carlos Pastor y Agapito Martín. Semiconductores.
En "Física para estudiantes de informática III". Universidad Politécnica de Valencia (1990). ISBN: 84-7721-125-6

- GALINDO, A. y PASCUAL, P. "**Mecánica Cuántica**". *Alhambra (Madrid). 1978.*

- GARCIA, N. y DAMASK, A. C. "**Physics for computer science students**". *John Wiley & Sons (New York). 1986.*

- HAFFORD, W. E. y McWHORTER, E. W. "**A fondo: Electrónica del estado sólido I**". *Anaya Multimedia (Madrid). 1988.*

- LLINARES, J. y PAGE, A. "**Curso de Física Aplicada: Electromagnetismo y Semiconductores**". *Universidad Politécnica de Valencia (Valencia). 1988.*

- NEGRO, J. L. y ESTEBAN, J. M. "**Cerca de la Química**". *Alhambra (Madrid). 1977.*

- ROSADO, L. "**Electrónica Física y Microelectrónica**". *Paraninfo (Madrid). 1987.*

- TIPLER, P. A. "**Física. Tomo II**". *Reverté (Barcelona). 1986.*

Augusto Beléndez, Carlos Pastor y Agapito Martín. Semiconductores.
En "Física para estudiantes de informática III". Universidad Politécnica de Valencia (1990). ISBN: 84-7721-125-6