Capítulo 6

CONDUCCION EN SEMICONDUCTORES

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

1. Fenómenos de transporte en semiconductores

En un semiconductor pueden aparecer fenómenos de transporte de cargas debidos, tanto a la aplicación de campos eléctricos como a la existencia de gradientes de concentración de portadores, es decir, cuando dicha concentración depende del punto del material semiconductor.

Cuando se estudian estos fenómenos de transporte aparecen conceptos similares a los estudiados en el tema de corriente eléctrica en conductores, pero con la diferencia de que en los conductores los portadores de carga son los electrones libres, mientras que en un semiconductor pueden ser electrones libres y huecos.

Los fenómenos de transporte son muy variados. Nosotros analizaremos tres de ellos de interés fundamental en el estudio de los semiconductores y sus aplicaciones:

(a) La conducción eléctrica debida al transporte de carga originado por la aplicación de un campo eléctrico constante.

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

(b) La conducción eléctrica debida a la difusión de carga originada por la existencia de un gradiente de portadores.

(c) El efecto Hall, en el que la aplicación de un campo magnético, crea un campo eléctrico (léase una diferencia de potencial).

En cualquier caso, la excitación aplicada perturba la velocidad de los portadores y esta perturbación es la base del fenómeno de transporte considerado.

2. La corriente de arrastre. Conductividad

En un semiconductor coexisten dos tipos de portadores, electrones y huecos, cuyas concentraciones aumentan al incrementarse la temperatura. La energía cinética de dichos portadores también aumenta con la temperatura, de modo que, aun en ausencia de campo eléctrico los portadores se encuentran en movimiento en el cristal. Sin embargo, y debido a la presencia de imperfecciones en la red cristalina, de impurezas y defectos, los portadores chocarán con las heterogeneidades de la red, modificándose la dirección de su movimiento. El movimento de los portadores es aleatorio por lo que puede suponerse que la velocidad media del conjunto de portadores es nula.

Cuando se aplica un campo eléctrico **E** al semiconductor, al movimiento aleatorio de los portadores debido a la agitación térmica se superpone un movimento en la dirección del campo, de modo que la velocidad media de los portadores no es nula, sino que toma valores $\mathbf{v}_p$, para los huecos, y $\mathbf{v}_n$, para los electrones libres. Aparece, pues, un desplazamiento de cargas y una corriente que recibe el nombre de desplazamiento o de arrastre.

La velocidad media de los portadores se denomina velocidad de

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

arrastre o de desplazamiento. Su dirección es la del campo eléctrico aplicado, su sentido el del campo para los huecos y el opuesto para los electrones libres, y su módulo es proporcional a la intensidad del campo eléctrico aplicado. En resumen,

$$\mathbf{v}_p = \mu_p \mathbf{E}$$

$$\mathbf{v}_n = -\mu_n \mathbf{E}$$

donde μ_p y μ_n son las movilidades de los huecos y los electrones, respectivamente, y su valor depende, entre otros factores, del material y de la temperatura.

La movilidad da un índice de la facilidad que un material presenta para poner en movimiento sus portadores bajo la acción de un campo eléctrico, y representa la velocidad de desplazamiento por unidad de campo eléctrico.

La movilidad de los electrones es, en general, superior a la de los huecos, y estas movilidades disminuyen al aumentar la temperatura (pues aumenta la frecuencia de choques con la red) y, crecen con el grado de pureza del material y de su estado cristalino.

Aunque las velocidades de arrastre de los electrones y los huecos son de sentido contrario, las corrientes eléctricas a que dan lugar son del mismo sentido. Por tanto, si llamamos n y p a las concentraciones de electrones y huecos, respectivamente, y si convenimos en subindicar la corriente debida a los electrones por n, y la debida a los huecos por p, podemos escribir las densidades de corriente de arrastre como:

$$\mathbf{J}_{an} = e\, n\, \mu_n \mathbf{E}$$

$$\mathbf{J}_{ap} = e\, p\, \mu_p \mathbf{E}$$

con e la carga del portador en valor absoluto. La densidad de corriente de arrastre total será:

$$\mathbf{J}_a = \mathbf{J}_{an} + \mathbf{J}_{ap}$$

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

es decir:

$$\mathbf{J}_a = e\,(n\,\mu_n + p\,\mu_p)\,\mathbf{E}$$

Comparando esta expresión con la ley de Ohm, $\mathbf{J}_a = \sigma\mathbf{E}$, resulta evidente que la conductividad del semiconductor es:

$$\sigma = e\,(n\,\mu_n + p\,\mu_p)$$

En un semiconductor intrínseco el número de electrones libres y el de huecos es el mismo, es decir, $n = p = n_i = p_i$, por lo que la conductividad intrínseca es:

$$\sigma = e\,n_i\,(\mu_n + \mu_p)$$

Para un semiconductor extrínseco la concentración de portadores mayoritarios es muy superior a la de portadores minoritarios. Para el **tipo p**, p >> n, por lo que:

$$\sigma \approx e\,\mu_p\,p$$

Para el tipo n, n >> p, por lo que:

$$\sigma \approx e\,\mu_n\,n$$

Cuando la densidad de corriente se mide en A/m^2 y **E** es V/m, σ se mide en $\Omega^{-1}m^{-1}$, que suele escribirse como mhos/m.

Es interesante puntualizar que puesto que σ depende de las movilidades y concentraciones de **ambos** tipos de portadores, y éstas son funciones de la temperatura, la conductividad depende de la temperatura.

La movilidad disminuye al aumentar la temperatura. La concentración de portadores aumenta con la temperatura. Este incremento se debe a la

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

generación de pares electrón-hueco, por lo que el efecto de la temperatura es mucho más notable en los semiconductores intrínsecos que en los extrínsecos, en los que la concentración de portadores depende esencialmente, y en un amplio margen de temperaturas, del grado de dopado.

El efecto conjunto de estos dos factores, disminución de la movilidad y aumento de la concentración, se traduce en un aumento de la conductividad con la temperatura, ya que, generalmente, el efecto del aumento de concentraciones prevalece sobre la disminución de la movilidad.

En la figura 1 se han representado las curvas $\sigma(T)$ para un semiconductor intrínseco y para otro extrínseco.

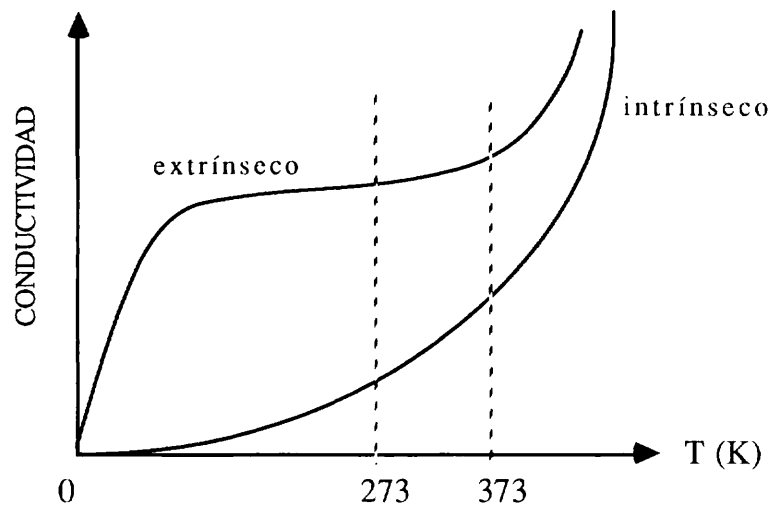

Figura 1

3. La corriente de difusión

Hasta aquí hemos considerado a nuestro semiconductor homogéneo con la única perturbación existente de un campo eléctrico, causante de una densidad de corriente de portadores.

Pensemos ahora otra posibilidad: que nuestro semiconductor no sea

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

homogéneo, es decir, que la concentración de portadores en el interior de la muestra de semiconductor no es uniforme. Entonces aparece un gradiente de concentraciones que da lugar a una difusión de portadores desde las zonas de mayor concentración a las de menor concentración, con el correspondiente transporte de cargas.

La densidad de corriente de difusión sigue formalmente la **ley de Fick**, siendo proporcional al gradiente de concentraciones, es decir:

$$\mathbf{J}_{dn} = e\, D_n\, \mathbf{grad}\, n$$

$$\mathbf{J}_{dp} = -\, e\, D_p\, \mathbf{grad}\, p$$

donde D_n y D_p son las constantes de difusión, o difusividad, para los electrones y huecos, respectivamente. Sus dimensiones son:

$$[\, D\,] = L^2\, T^{-1}$$

El movimiento de portadores es en sentido opuesto al del gradiente de sus concentraciones. En el caso de los huecos dicho sentido coincide con el de la corriente, mientras que en el caso de los electrones, la densidad de corriente es opuesta a la velocidad de desplazamiento. Es decir, a diferencia de las densidades de corriente de "arrastre", las de "difusión" no dependen de la densidad de portadores, sino de su gradiente. De modo que pueden ser comparables las de minoritarios y mayoritarios si (como ocurre frecuentemente) sus variaciones espaciales son semejantes. De hecho, las corrientes de difusión de minoritarios juegan un papel importante en los semiconductores.

Por otra parte, las constantes de difusión están relacionadas con las movilidades de los portadores. Un análisis estadístico del fenómeno de difusión permite establecer la denominada **relación de Einstein:**

$$\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{D_p}{\mu_p} = \frac{k\, T}{e} = V_T$$

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

donde k es la constante de Boltzmann y T la temperatura absoluta. V_T recibe el nombre de potencial equivalente de temperatura. Su valor a la temperatura ambiente es V_T = 0'026 V.

4. Densidad de corriente total

En los apartados anteriores hemos estudiado dos aspectos del transporte de carga eléctrica en los semiconductores. Cuando existía un campo eléctrico constante o una distribución espacial no homogénea de portadores. Ambos fenómenos pueden darse simultáneamente, por lo que en principio podemos escribir:

Para los electrones:

$$\mathbf{J}_n = \mathbf{J}_{an} + \mathbf{J}_{dn} = e\, n\, \mu_n\, \mathbf{E} + e\, D_n\, \mathbf{grad}\, n$$

Para los huecos:

$$\mathbf{J}_p = \mathbf{J}_{ap} + \mathbf{J}_{dp} = e\, p\, \mu_p\, \mathbf{E} - e\, D_p\, \mathbf{grad}\, p$$

5. Efecto Hall en semiconductores

El efecto Hall está basado en la perturbación que sobre el movimiento de los portadores en el semiconductor supone la presencia de un campo magnético.

Supongamos una muestra semiconductora, como la que se indica en la figura 2, por la que circula una corriente eléctrica de densidad **J**. Si aplicamos un campo magnético constante **B**, según la dirección positiva del eje X, los

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

portadores de carga experimentarán una fuerza que será, para los huecos:

$$\mathbf{F} = e\,\mathbf{v}_p \times \mathbf{B}$$

y para los electrones:

$$\mathbf{F} = -\,e\,\mathbf{v}_n \times \mathbf{B}$$

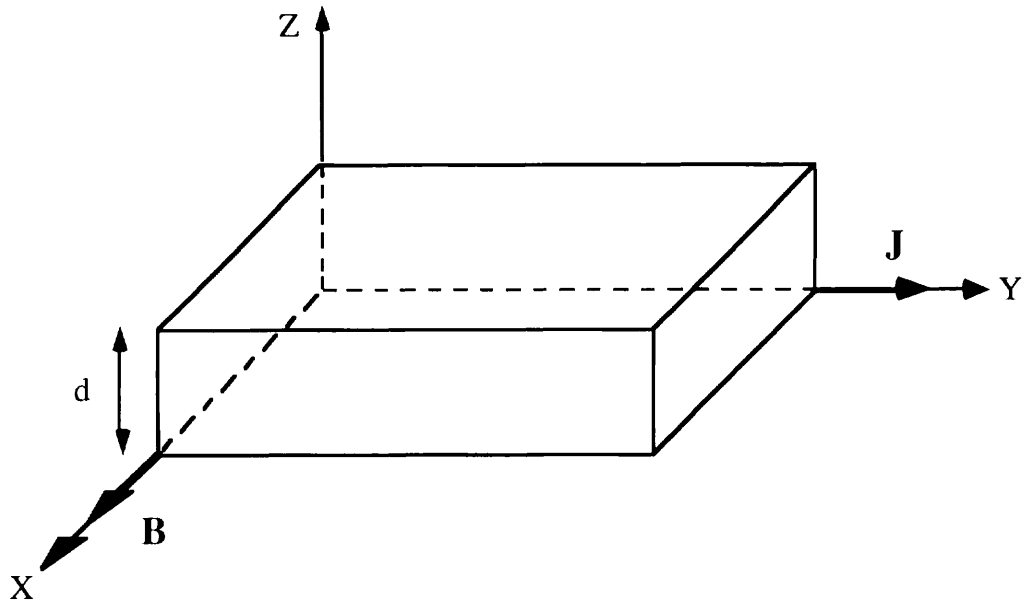

Figura 2

Si el semiconductor es de tipo p, la práctica totalidad de portadores son huecos y, según la expresión de la fuerza, se originará una separación espacial de cargas que da lugar a un campo eléctrico transversal $\mathbf{E}_H$ como el indicado en la figura 3.

En un semiconductor tipo n, los portadores mayoritarios circulan en sentido opuesto a **J**, por lo que, teniendo en cuenta el signo de dichos portadores, la fuerza que actúa sobre los electrones es la indicada en la figura 4. También se produce una separación de cargas, pero en sentido contrario al caso anterior, de forma que el campo eléctrico transversal $\mathbf{E}_H$ tiene sentido opuesto.

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

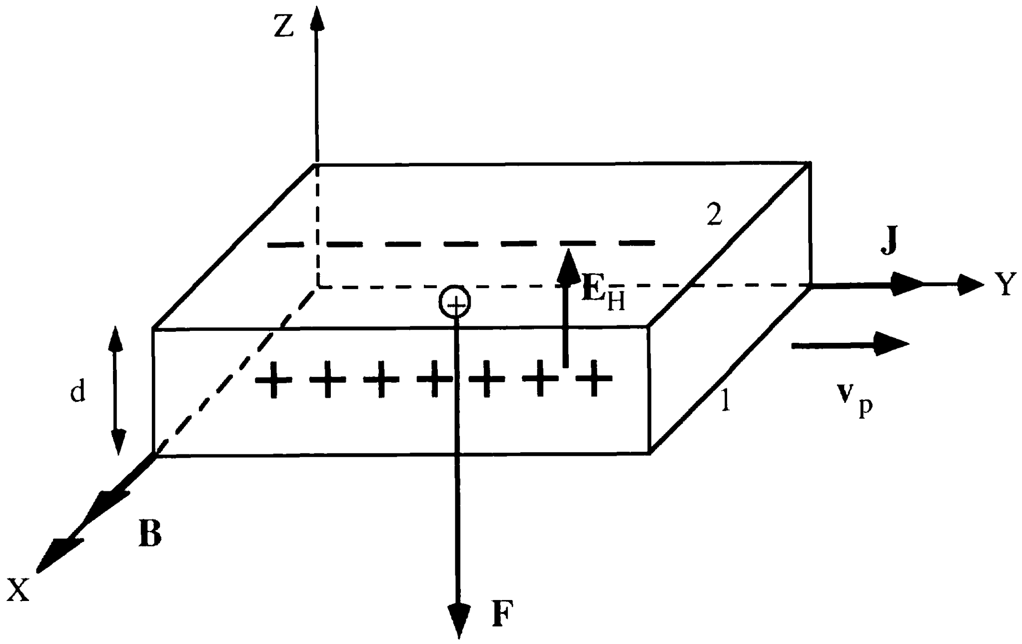

Figura 3

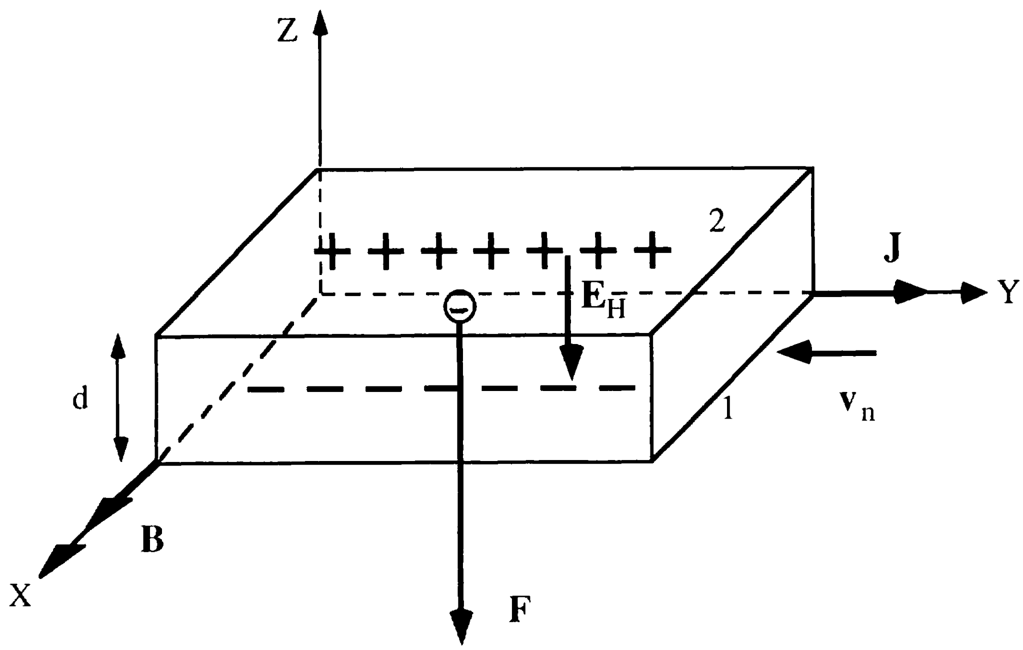

Figura 4

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

El proceso de separación espacial de cargas continúa hasta que el campo eléctrico transversal crea una fuerza que equilibre a la producida por el campo magnético. Es decir, en el estado estacionario, las fuerzas originadas por $\mathbf{E}_H$ y $\mathbf{B}$ son iguales, y para el semiconductor tipo p se escribe en la forma:

$$e\,E_H = e\,v_p\,B$$

Si la anchura de la muestra es d, la diferencia de potencial que aparece entre las caras 1 y 2 es del orden de:

$$V_H = E_H\,d = v_p\,B\,d$$

donde V_H recibe el nombre de **tensión de Hall.**

Expresando v_p en función de la densidad de corriente:

$$v_p = \mu_p\,E, \qquad\qquad J = e\,p\,\mu_p\,E$$

es decir, $J = e\,p\,v_p$, con lo cual la tensión de Hall resulta ser:

$$V_H = \frac{J\,B\,d}{e\,p} = R_H\,J\,B\,d$$

donde R_H recibe el nombre de constante de Hall, y su valor , para el caso de huecos es:

$$R_H = \frac{1}{e\,p}$$

En un semiconductor tipo n, la tensión de Hall es:

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

$$V_H = -\frac{J\,B\,d}{e\,n} = R_H\,J\,B\,d$$

donde el signo menos indica que la polaridad de dicha tensión es opuesta a la que aparece en un semiconductor tipo p. La constante Hall para los electrones es:

$$R_H = -\frac{1}{e\,n}$$

De estos resultados obtenidos de forma sencilla podemos intuir dos aplicaciones de interés:

(1) Determinar el signo de los portadores mayoritarios (y por tanto conocer el tipo de semiconductor), a través del signo de la constante de Hall.

(2) Determinar la concentración de portadores de carga a través de la constante de Hall.

La determinación de R_H puede efectuarse directamente midiendo la tensión de Hall.

Conocidas las concentraciones de portadores, y conocida la resistividad de la muestra, puede calcularse la movilidad de portadores. Para un semiconductor tipo p, se tiene $\sigma = e\,\mu_p\,p$, por lo que:

$$\sigma = e\,\mu_p\,p = \frac{\mu_p}{R_H}$$

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

luego:

$$\mu_p = \sigma R_H$$

De forma análoga, para un semiconductor tipo n:

$$\mu_p = \sigma |R_H|$$

Hay que señalar que en el análisis realizado del efecto Hall se han utilizado dos simplificaciones importantes. En primer lugar, se ha descrito el efecto Hall para el caso de semiconductores extrínsecos, en los cuales las corrientes de arrastre de los portadores minoritarios son despreciables; el estudio de dicho efecto en un semiconductor intrínseco o muy débilmente dopado exigiría un análisis más minucioso. Por otra parte, no se ha tenido en cuenta la distribución estadística de la velocidad de los portadores. Si se tiene en cuenta dicha distribución, es preciso modificar la constante Hall mediante un factor r, próximo a la unidad y característico del tipo de semiconductor. Con ello la constante Hall queda:

Para el *tipo p:*

$$R_H = \frac{r}{e\,p}$$

Para el *tipo n:*

$$R_H = -\frac{r}{e\,n}$$

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