

5. Semiconductores y la unión P-N

Thomas Zimmer, Universidad de Burdeos, Francia

Resumen

Resultados del aprendizaje	1
Antecedentes físicos de los semiconductores	1
El cristal de Silicio	1
Las Bandas de Energía.....	2
Portadores de Carga	3
El Semiconductor Intrínseco	5
El Semiconductor Extrínseco	5
Semiconductor tipo N	5
Semiconductor tipo P	6
La Unión P-N.....	7
La Unión P-N en equilibrio térmico	7
Polarización de la Unión PN.....	9
La unión PN bajo la luz solar.....	11
Referencias Bibliográficas	13

Resultados del aprendizaje

- Obtener la idea de un cristal de silicio
- Comprender el concepto de diagrama de bandas de energía
- Entender el movimiento de los portadores de carga en un cristal
- Identificar a un semiconductor intrínseco
- Comprender los semiconductores extrínsecos tipo N y tipo P
- Reconocer la unión P-N en equilibrio térmico
- Comprender el comportamiento de la unión P-N al aplicar un voltaje CC
- Comprender el mecanismo físico dentro de la unión P-N bajo la luz solar

Antecedentes físicos de los semiconductores

El cristal de Silicio

En 2013, la producción mundial de fotovoltaicos (PV) era cerca de 40 GWp. El 90% de los módulos fotovoltaicos fabricados se basan en elementos de silicio [1]. Se entiende entonces que la mayoría de las celdas

solares fabricadas hoy en día utilizan silicio como su materia prima. Por lo tanto, para entender el principio subyacente de la energía de una celda solar, debemos centrar nuestra atención en el cristal de silicio.

Un cristal se caracteriza por una disposición regular y ordenada de sus átomos. La red cristalina de silicio resulta de una repetición periódica de un patrón geométrico elemental en las tres dimensiones del espacio.

El cristal de silicio es sólido, gris oscuro y tiene una densidad de 2.328 g/cm^3 . Presenta una red cristalina en forma de diamante. La cohesión del cristal de silicio se garantiza por medio de enlaces covalentes uniendo cada átomo a sus cuatro vecinos más cercanos. Tales enlaces resultan en el hecho de que dos átomos comparten dos electrones de valencia. Un electrón de valencia es un electrón en la capa externa del átomo. Fig. 1 representa un plano 2-D del cristal: en un momento dado, los electrones de valencia a y b (teniendo espines opuestos) deben ser considerados como pertenecientes a ambos átomos 1 y 2.

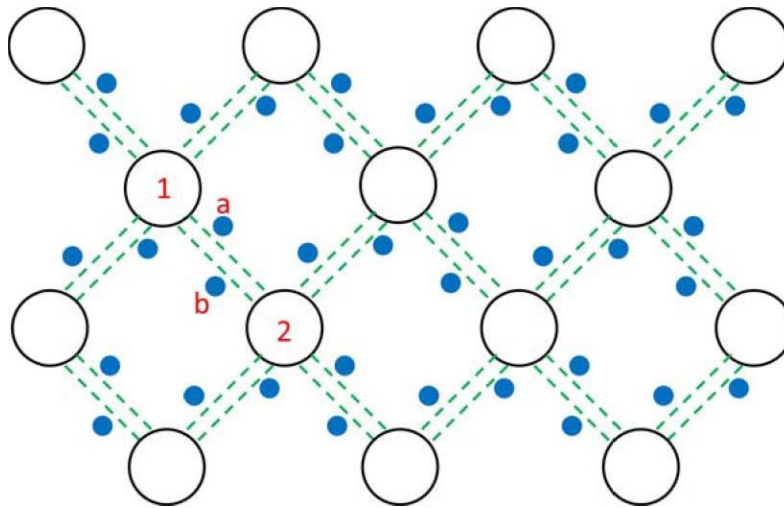


Figura 1: Representación 2-D de la red cristalina del silicio

Todos los electrones son necesarios para garantizar todos los enlaces, o, en otras palabras, la cohesión del cristal; pero esto no significa que los electrones no pueden desplazarse individualmente de un enlace a otro. Cada vez que un electrón se desplaza a otro enlace, es entonces remplazado por otro electrón. Se puede decir que, los electrones de valencia están esclavizados a una tarea determinada, pero son libres de desplazarse.

Las Bandas de Energía

El modelo de Bohr nos dice que los electrones del átomo de silicio pueden ocupar ciertos valores discretos de energía. Dentro del cristal de silicio, los niveles de energía se modifican en comparación con los de un único átomo aislado. Esto es particularmente cierto para los electrones de valencia. Los electrones de valencia necesitan garantizar los enlaces mientras que, al mismo tiempo, se desplazan dentro del cristal como moléculas de un gas en un volumen cerrado. Debido a esta deslocalización de los electrones de valencia, las reglas de la mecánica cuántica suponen que los niveles de energía iniciales se separan en bandas de energía que consisten en todos los niveles de energía posibles. Podemos distinguir dos bandas de energía, la banda de valencia y la banda de conducción (ver Fig. 2). La banda de energía entre la banda de valencia y la banda de conducción es llamada banda prohibida y dentro de esta banda, no hay niveles de energía permitidos. A temperatura ambiente, la banda prohibida es 1.1 eV para un cristal de silicio.

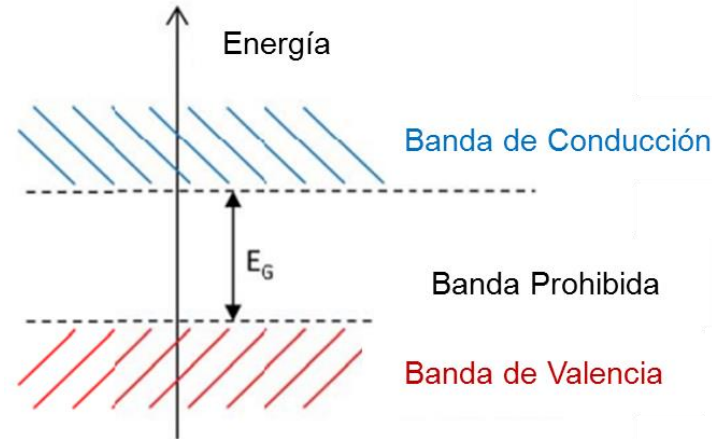


Figura 2: Representación de las Bandas de Energía del cristal de silicio

Portadores de Carga

Asumiendo una temperatura cero, todos los electrones en el cristal están unidos a un enlace, todos los estados en la banda de valencia están ocupados y, en consecuencia, todos los estados en la banda de conducción están vacíos. Si aplicamos un campo eléctrico al cristal, ninguna corriente fluye puesto que todos los estados permitidos están ocupados. A cero Kelvin, el cristal de silicio es un aislador perfecto.

Cuando la temperatura cambia, algunos de los electrones de valencia reciben suficiente energía térmica para romper su enlace y convertirse en electrones libres (no están esclavizados a la tarea de garantizar la cohesión del cristal). En la Fig. 3 se muestra una vista esquemática.

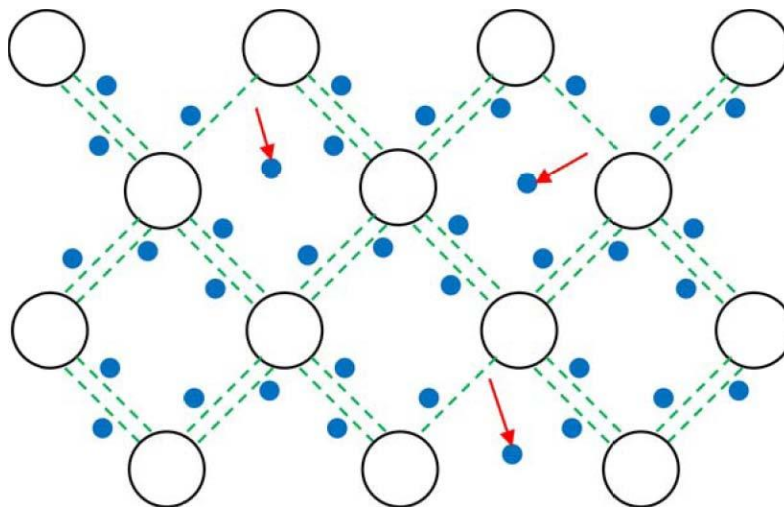


Figura 3: Electrones libres en el cristal de silicio

La energía térmica debe ser mayor que la banda prohibida E_G para que los electrones ocupen un estado en la banda de conducción. En consecuencia, dejan estados libres en la banda de valencia. En la Fig. 4 se da una presentación esquemática.

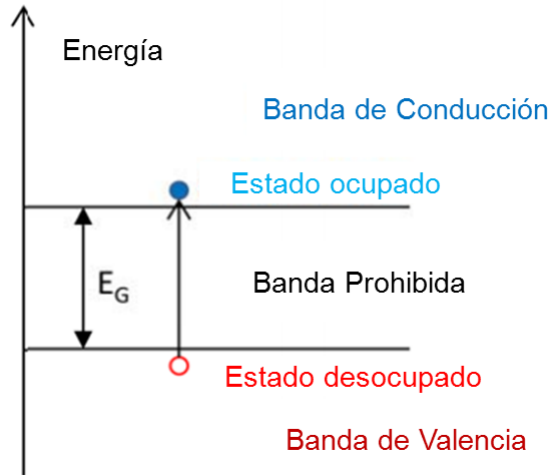


Figura 4: Diagrama de Bandas de Energía

Ahora, veamos lo que sucede cuando se aplica un campo eléctrico. El número de electrones libres ocupando estados en la banda de conducción es mucho menor en comparación con todos los estados disponibles en la banda de conducción. Por lo tanto, se desplazan al aplicar un campo eléctrico, resultando en una transferencia de la carga global y en consecuencia en una corriente eléctrica. Además, la presencia de estados desocupados en la banda de valencia permite a los electrones en la banda de valencia –estos electrones son también sujetos al campo eléctrico macroscópico aplicado- a contribuir a la transferencia de carga global (y a la corriente eléctrica). De este modo, los estados desocupados se desplazan en la dirección opuesta. Este mecanismo es puesto en evidencia en la Fig. 5.

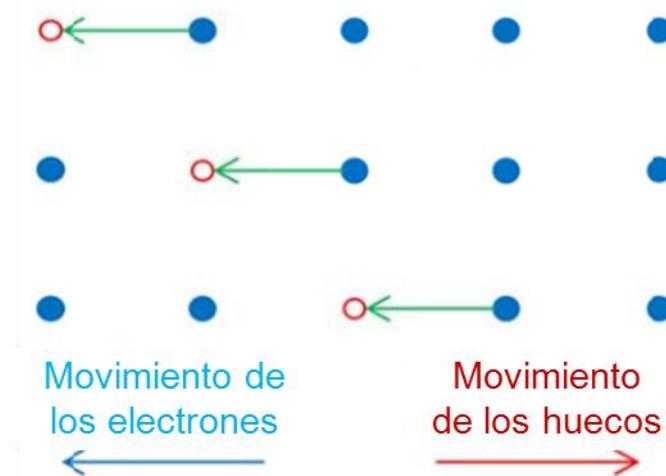


Figura 5: Movimiento de los electrones y de los huecos en el cristal de silicio

El número de estados desocupados es pequeño en comparación con el número de electrones en la banda de valencia. Es muy común considerar estos estados desocupados como partículas libres (como los electrones en la banda de conducción) con carga opuesta. Estos estados desocupados son llamados huecos. Un hueco tiene una carga positiva q igual a 1.6×10^{-19} C, la misma cantidad que la carga del electrón, pero con signo opuesto.

Podemos concluir que en un cristal de silicio (semiconductor), el transporte de carga (flujo de corriente) se realiza por dos tipos de portadores de carga:

- Electrones libres con carga negativa $-q$ que se desplazan (ocupan los estados) en la banda de conducción
- Huecos libres con carga positiva $+q$ que se desplazan (ocupan los estados) en la banda de valencia

El Semiconductor Intrínseco

Semiconductores absolutamente puros sin impurezas en la red cristalina son llamados intrínsecos. La característica fundamental de un semiconductor puro es la igualdad absoluta de número de electrones libres y huecos libres a cualquier temperatura. Estos portadores son térmicamente u ópticamente (absorción de un fotón, proceso fundamental en una celda PV) generados.

La concentración (cantidad por unidad de volumen) n de electrones libres y p de huecos libres son iguales y llamados concentración intrínseca del semiconductor.

$$n = n_i = p$$

Puede demostrarse que $n_i = AT^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{E_G}{2kT}\right)$

Con: T: Temperatura

E_G : Banda prohibida

k: Constante de Boltzmann

A: Constante

Como puede verse en la expresión anterior, n_i es fuertemente dependiente de la temperatura. Por lo tanto, la resistividad de un semiconductor intrínseco disminuye rápidamente cuando la temperatura aumenta debido al fuerte aumento del número de pares electrón-hueco creados.

A temperatura ambiente (300 K), la concentración intrínseca del silicio es de $n_i = 1.45 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$. Puede ser considerada muy pequeña en comparación con el número de átomos en un cristal de silicio (igual a $5 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$).

El Semiconductor Extrínseco

Un semiconductor extrínseco o un semiconductor dopado es obtenido mediante la introducción de impurezas bien definidas (de forma controlada) en un semiconductor intrínseco. El objetivo de este proceso es modificar las características eléctricas del semiconductor y es el paso más fundamental en la creación de dispositivos electrónicos.

Semiconductor tipo N

Supongamos que dopamos el cristal de silicio con un elemento de la columna V de la tabla periódica (p. ej. Fósforo (P) o arsénico (As)). Las impurezas se colocan dentro de la red cristalina por sustitución como se muestra en la Fig. 6.

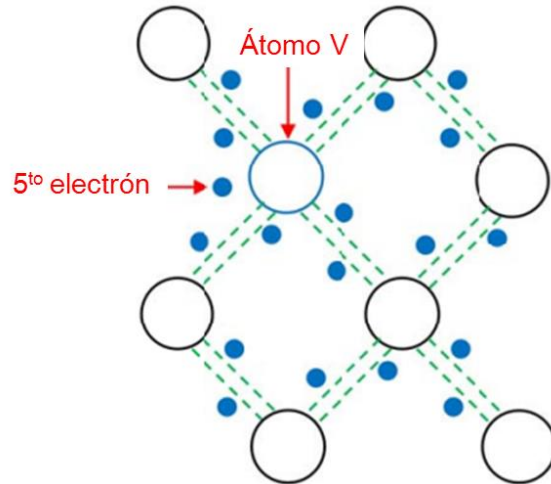


Figura 6: Representación esquemática de silicio dopado tipo N

Un elemento de la columna V es pentavalente, lo que significa que tiene cinco electrones en su capa exterior. Cuatro de ellos se utilizan para asegurar los enlaces covalentes con los otros cuatro átomos vecinos de silicio. El quinto electrón no participa en la cohesión del cristal y está muy débilmente unido a su átomo de origen y una muy baja energía adicional (principalmente térmica) es suficiente para romper el enlace, lo que significa que puede contribuir a la conducción de carga.

La impureza restante es calificada como donante y es ahora un ion fijo cargado positivamente.

En un amplio rango de temperaturas (de 150 K a 600 K), el número de electrones libres es mucho mayor que el número de huecos libres. Por esta razón, estos electrones libres se llaman portadores de carga mayoritarios y los huecos portadores de carga minoritarios. Este semiconductor se denomina como tipo N.

Semiconductor tipo P

Consideremos ahora el dopaje de silicio mediante el uso de un átomo de la columna III de la tabla periódica (p. ej. Boro (B)). Aquí igualmente, los átomos de dopaje se colocan dentro del cristal de silicio por sustitución de los átomos originales, como se muestra en la Fig. 7.

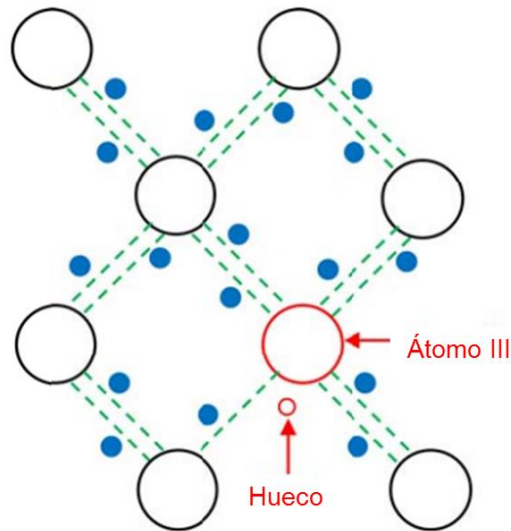


Figura 7: Representación esquemática de silicio dopado tipo P

Con tres electrones en su capa exterior, el elemento de la columna III (trivalente) sólo puede satisfacer tres enlaces covalentes de sus cuatro átomos vecinos. El cuarto enlace no está completo, un vacío existe.

Una cantidad muy pequeña de energía permite que un electrón de valencia llene este vacío, que por consiguiente se ha desplazado. Un hueco ha sido creado que puede participar a la conducción de carga.

La impureza restante es calificada como aceptor y es ahora un ion fijo cargado negativamente.

Como con el material tipo N, pero de manera opuesta, aquí el número de huecos libres es mucho mayor que el número de electrones libres en un amplio rango de temperaturas. Por esta razón, estos huecos son llamados portadores de carga mayoritarios y los electrones portadores de carga minoritarios. Este semiconductor se denomina tipo P.

La Unión P-N

La Unión P-N en equilibrio térmico

El equilibrio térmico está definido por una distribución de temperatura constante y ninguna excitación eléctrica, óptica, mecánica o química es aplicada desde el mundo exterior.

El equilibrio térmico es un estado dinámico en el cual cada fenómeno es compensado por su fenómeno inverso. Así, en cada momento, el número de portadores de carga generados es compensado por el mismo número por recombinación; el flujo de electrones (o huecos) en una dirección es compensado exactamente por el mismo flujo del mismo tipo de portadores en la otra dirección.

Ahora, procedamos con un estudio cualitativo de la unión P-N.

Supongamos que formamos una unión P-N al reunir dos regiones: una región dopada tipo N y la otra región tipo P. Ambas regiones eran eléctricamente neutras. Consideramos un dopaje constante en aras de simplificación. Cada región tiene un gran número de portadores de carga mayoritarios (casi tanto como las impurezas o dopantes) y un número muy pequeño de portadores minoritarios, de tal manera que la siguiente relación se cumple:

$$n \cdot p = n_i^2$$

Una representación esquemática de cada región se muestra en la Fig. 8. Las impurezas ionizadas fijas, los portadores mayoritarios y los portadores minoritarios son mostrados en cada región.

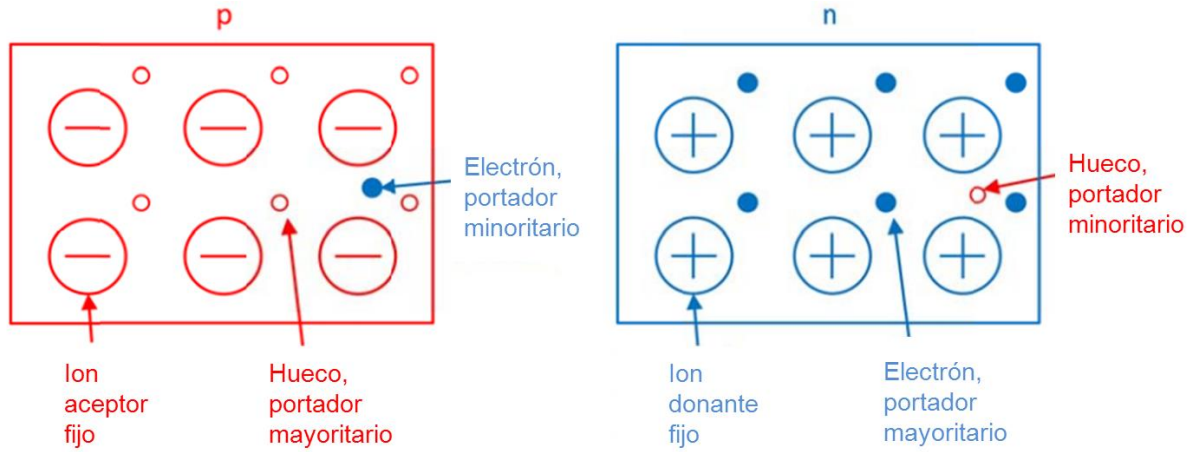


Figura 8: Representación esquemática de la región tipo P y de la región tipo N

Cada región es eléctricamente neutra, así que podemos escribir:

Para la región tipo P (con p : portador mayoritario, n : portador minoritario, N_A : impurezas ionizadas fijas):

$$p - n - N_A = 0$$

Para la región tipo N (con n : portador mayoritario, p : portador minoritario, N_D : impurezas ionizadas fijas):

$$p - n + N_D = 0$$

Ahora, supongamos que ambas regiones son puestas en contacto. Un enorme gradiente en la concentración de portadores de carga aparece en el límite entre las dos regiones. En consecuencia, un flujo enorme de electrones y huecos ocurre de tal manera que, los portadores de carga tienden a generar una distribución uniforme de la concentración de cada portador dentro de la estructura (Fig. 9).

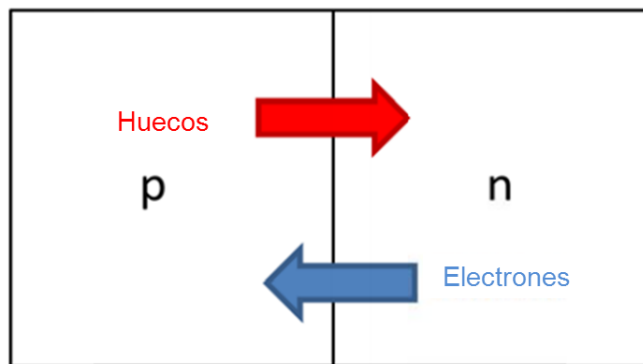


Figura 9: Representación esquemática del flujo de portadores

Sin embargo, la uniformidad nunca es alcanzada, porque otro fenómeno impide esta tendencia. De hecho, los huecos se difunden de la región tipo P a la región tipo N y los electrones se difunden de la región tipo N a la región tipo P; dejando atrás impurezas ionizadas fijas (de sus respectivos dopantes) cuya carga no es compensada más.

Así, una zona de carga espacial surge en cada lado de la unión (Fig. 10):

- Es positiva cerca de la unión en la región tipo N debido a los donantes positivos ionizados
- Es negativa cerca de la unión en la región tipo P debido a los aceptores negativos ionizados

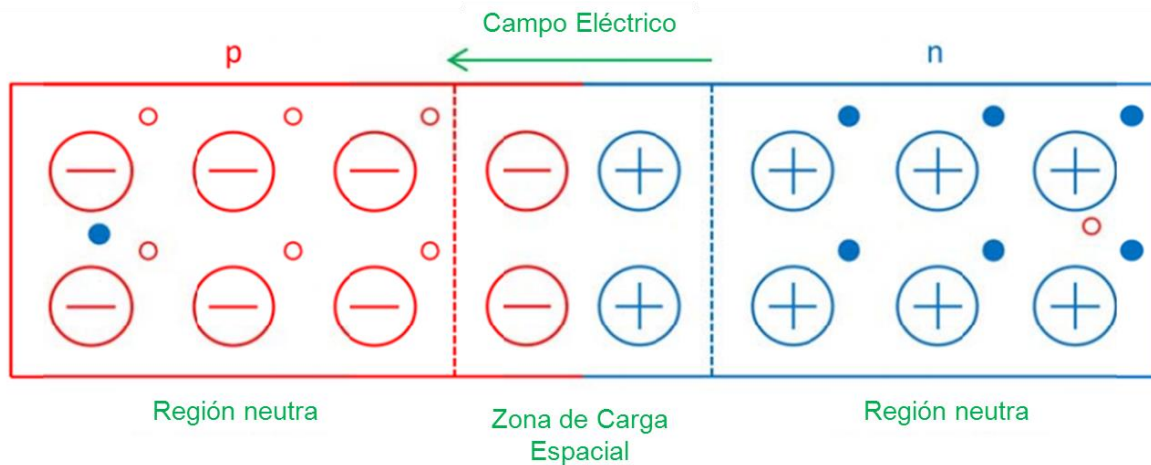


Figura 10: Representación esquemática de la zona de carga espacial dentro de la unión PN

Debido a la zona de carga espacial, un campo eléctrico se crea orientado de la región N a la región tipo P. el campo eléctrico resulta en una distribución de potencial interna, también llamada potencial interno. El campo eléctrico tiende a repeler a los huecos de la región tipo P and y los electrones de la región tipo N. Atenúa el proceso de difusión de ambos tipos de portadores mayoritarios. Al mismo tiempo, provoca el movimiento de los portadores minoritarios por conducción; los huecos se desplazan de la región tipo N a la región tipo P, los electrones en el sentido inverso.

El equilibrio térmico es alcanzado cuando la tendencia de los electrones y los huecos para continuar difundiéndose hacia sus respectivos gradientes de concentración es anulada por el campo eléctrico repeliendo la difusión de los portadores mayoritarios. Bajo esta condición, no hay más cargas libres cerca del límite de la unión y se crea una región de depleción.

Polarización de la Unión PN

Ahora al aplicar un voltaje positivo externo a la región tipo P y un voltaje negativo a la región tipo N (Fig. 11):

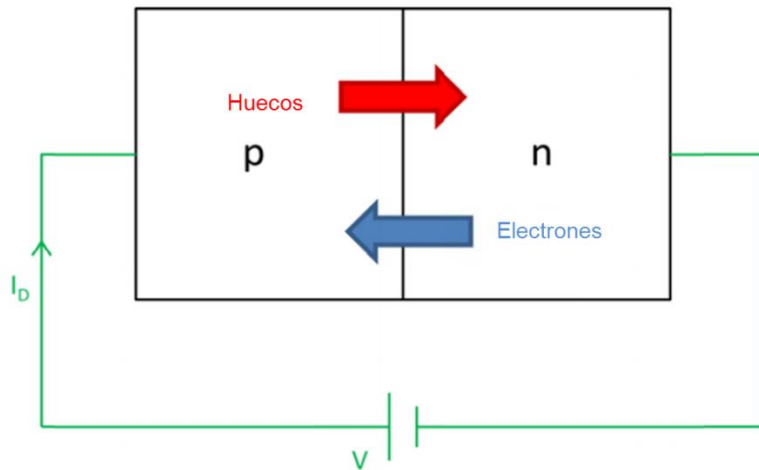


Figura 11: Esquemático de la fuente de voltaje aplicada a la unión PN

Este voltaje externo, también llamado polarización directa, reduce el campo eléctrico interno y, en consecuencia, el potencial interno. Por lo tanto, los portadores mayoritarios pueden difundir a través de la unión resultando en un flujo de corriente directa.

Por otro lado, cuando se invierte la polarización externa, la barrera de potencial interna aumenta, el voltaje interno y la corriente de difusión dejan de fluir. Sólo los portadores minoritarios que están presentes en cada región contribuyen a la corriente de conducción. El número de estos portadores minoritarios es muy pequeño; ellos se deben a que pares electrón/hueco son generados térmicamente y resultan en un flujo de corriente casi siempre insignificante. De esta manera la unión PN es un diodo, un dispositivo electrónico que conduce la corriente en un solo sentido.

Fig. 12 muestra la característica de un diodo. La corriente I_D aumenta cuando una tensión positiva es aplicada, especialmente cuando el voltaje interno es de aproximadamente 0.6 V – pero bajo una tensión negativa la corriente inversa es insignificante e igual a la corriente de saturación I_S .

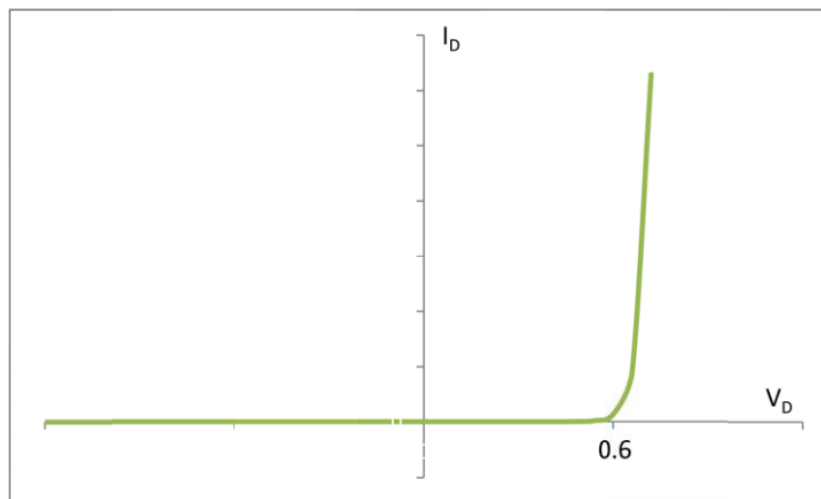


Figura 12: Característica corriente-voltaje del diodo

La aplicación de la física de semiconductores nos da la siguiente relación para la característica corriente-voltaje de la unión PN:

$$I_D = I_S \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right)$$

donde q es la carga de un electrón, k es la constante de Boltzmann, T es la temperatura absoluta e I_S la corriente de saturación.

En la siguiente sección veremos por qué esta teoría sobre los portadores mayoritarios y minoritarios, electrones y huecos, la zona de carga espacial y el potencial interno es esencial para revelar los secretos de la energía fotovoltaica.

La unión PN bajo la luz solar

Ya hemos discutido la creación de pares electrón-hueco en el cristal por excitación térmica. También es posible crear pares electrón-hueco cuando un cristal interactúa con fotones. Estos mecanismos se ilustran en la Fig. 13.

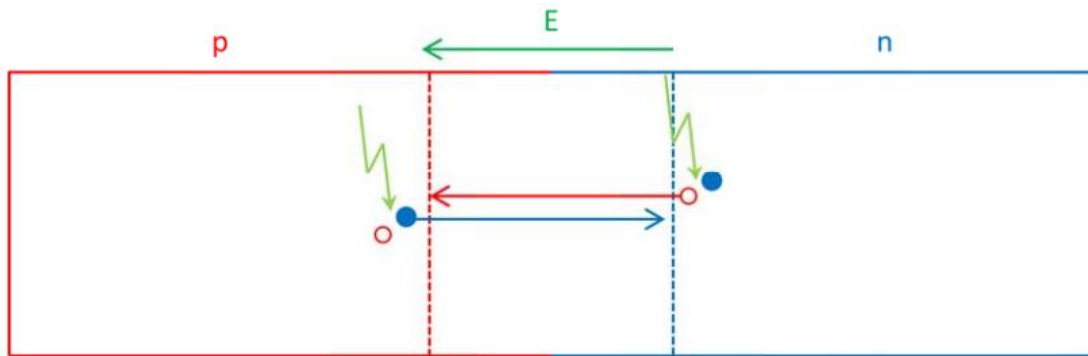


Figura 13: Representación esquemática de la creación por fotones de pares electrón-hueco

De hecho, si la energía de un fotón es lo suficientemente alta (mayor a la banda prohibida), esta energía puede ser absorbida a través de la creación de un par electrón-hueco: un electrón de la banda de valencia salta a la banda de conducción dejando atrás un hueco. Ambos portadores de carga tienen ahora suficiente energía para ser considerados libres y pueden desplazarse (tienen un tiempo de vida de alrededor de $1 \mu s$, y después se recombinan). Si los electrones creados se acercan a la región de depleción en la región tipo p donde son portadores minoritarios, son acelerados por el campo eléctrico interno y barridos del región de depleción; lo mismo ocurre para los huecos acercándose a la región tipo N de la región de depleción. Ambos portadores de carga contribuyen al transporte de carga y este mecanismo puede considerarse como un generador de corriente eléctrica y es eléctricamente representado como una fuente de corriente.

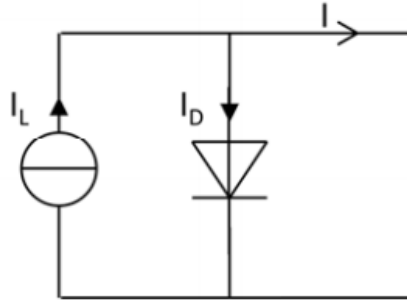


Figura 14: Circuito equivalente de unión PN bajo luz solar

Fig. 14 muestra un circuito equivalente que resume el comportamiento de la celda solar. Podemos ver un símbolo de diodo que representa la característica corriente-voltaje sin luz solar; hemos añadido una fuente de corriente que representa la corriente eléctrica generado por la luz solar I_L .

En ausencia de luz solar y bajo un polarización externa, la celda solar se comporta como cualquier diodo semiconductor y la corriente I_D fluye de ánodo a cátodo. Bajo la luz solar, pares electrón-hueco son creados y generan una corriente I_L como se indica por la flecha. A temperatura/insolación constante, I_L es constante.

Podemos calcular la corriente I , fluyendo fuera de la celda solar, usando la ley de corriente de Kirchhoff:

$$I = I_L - I_D$$

y usando la expresión más arriba:

$$I = I_L - I_S \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right)$$

Finalmente, un bosquejo de la característica corriente-voltaje de la celda solar se muestra en Fig. 15.

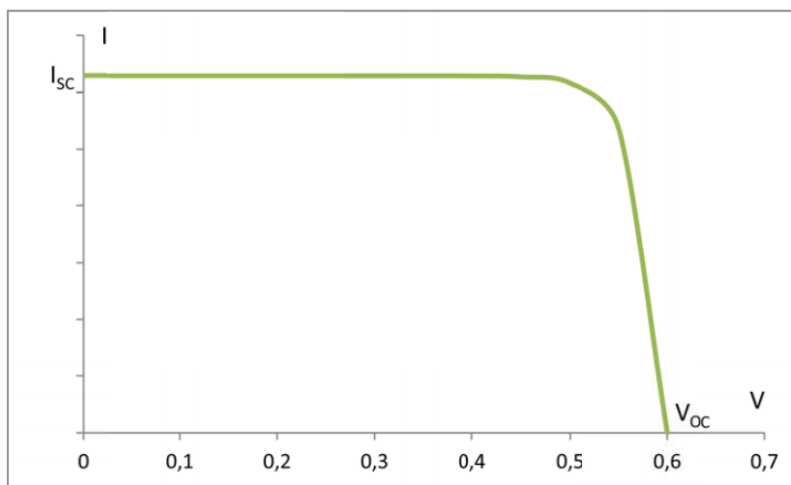


Figura 15: Característica corriente-voltaje de la celda solar

A partir de la Fig. 15, podemos determinar dos cantidades características fundamentales de importancia para la función de una celda solar:

- i. El voltaje máximo (o tensión de circuito abierto, V_{OC}) producido por la celda solar de silicio es de 0.7 V; esto implica que muchas celdas solares deben ser conectadas en serie para proporcionar voltajes lo suficientemente altos requeridos para la mayoría de las aplicaciones.
- ii. Bajo insolación constante, la corriente es constante sobre un amplio rango: la celda solar puede ser considerada como una fuente de corriente. Además, la corriente máxima de la celda solar también definida como su corriente de corto circuito (I_{SC}) y es dada por la intersección con el eje de corriente. I_{SC} depende de la temperatura y la fuerza de insolación.

Un estudio detallado de las características eléctricas de las celdas solares y sus módulos son dados en el capítulo 7.

Referencias Bibliográficas

[1] Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, “Photovoltaics Report”, 24 October 2014, , <http://www.ise.fraunhofer.de/de/downloads/pdf-files/aktuelles/photovoltaics-report-in-englischer-sprache.pdf>

[2] Philippe Cazenave, “Physique des matériaux semiconducteurs”, Fascicule de cours, Université de Bordeaux 1, filière EEA – Licence, 1998

[3] Philippe Cazenave, “La jonction pn”, Fascicule de cours, Université de Bordeaux 1, filière EEA – Licence, 1997

[4] Paul A. Lynn, Electricity from Sunlight: “ An Introduction to Photovoltaics”, John Wiley & Sons, 2010

[5] Hans K. Köthe, “Stromversorgung mit Solarzellen”, Franzis-Verlag GmbH, Feldkirchen, 1996