

CAPITULO 3

LA CELULA FOTOVOLTAICA

Fotovoltaico

La palabra fotovoltaico(a) está formada por la combinación de dos palabras, una de origen griego: *foto*, que significa luz, y la otra *voltaico* que significa eléctrico. El nombre resume la acción de estas células: transformar, directamente, la energía luminosa en energía eléctrica.

Fenómeno fotovoltaico

La transformación de la energía luminosa en eléctrica toma lugar en la naturaleza durante el proceso de fotosíntesis, pero desde el punto de vista práctico (menores pérdidas) sólo tiene valor comercial la que toma lugar dentro de un diodo semiconductor. Como el proceso de elaboración de estos diodos precede al de la manufactura de las células FVs, las unidades tienen un alto grado de repetibilidad.

Las células FVs son manufacturadas usando diferentes materiales y procesos para crear los diodos, ya que los fabricantes continúan explorando la manera de abaratar el costo o incrementar la eficiencia de conversión de las mismas.

Cuando la luz solar incidente tiene la energía y el espectro luminoso necesario para alterar el estado de equilibrio de la juntura N-P en estos diodos, se genera un exceso de cargas libres, las que pueden sostener una corriente, si se cierra el circuito externo.

Para aquellos lectores que quieren conocer el fenómeno con mayor detalle, paso a darles un resumen sobre el tema.

Conductores y aislantes

Dado que el fenómeno FV toma lugar dentro de un **semiconductor**, se hace necesario entender que hace que un material sea un buen conductor, un buen aislante (no-conductor) y, por último, un semiconductor.

La corriente eléctrica, por definición, es la cantidad de cargas que circulan por unidad de tiempo. Cuando se aplica un voltaje entre los extremos de un material, se crea un campo eléctrico dentro del mismo. Los electrones ubicados en la órbita exterior del átomo de este material, la más lejana del núcleo, estarán sometidos a una fuerza cuyo valor está dado por la expresión:

$$\mathbf{F} = q \times \mathbf{E} \quad (3.1)$$

Donde **q** es el valor de la carga (en Coulombs) y **E** es el valor del campo eléctrico en V/m. ¿Qué determina la conducción (o no-conducción) en un material? La respuesta es: **la estructura atómica de la substancia**.

En materiales **conductores**, como el cobre, el aluminio o el grafito, los electrones de la banda externa tienen mucha movilidad, ya que están saltando de átomo a átomo, aún a la temperatura ambiente.

Bajo la acción de un campo eléctrico (voltaje entre los extremos) la fuerza dada por la expresión 3.1 los pone en movimiento. El valor de la **conductividad** (inversa de la **resistividad**) es elevado en estos materiales .

En materiales **aislantes**, como el vidrio, el diamante o la porcelana, aún con elevados valores del campo eléctrico (altos voltajes) la fuerza que se ejerce sobre los electrones de la órbita externa no es suficiente para desplazarlos y establecer una corriente, ya que su movilidad es prácticamente nula.

Observe el lector que en los ejemplos he usado, a propósito, dos formas cristalinas distintas para el carbón: el **grafito** (conductor) y el **diamante** (aislante) para mostrar cómo la estructura interna de la sustancia determina la movilidad de las cargas en la misma.

Par negativo/ positivo

Cuando el átomo de una sustancia pierde un electrón, se transforma en una carga positiva. La pérdida de un electrón crea, en efecto, dos cargas dentro del material: una negativa (electrón libre) y otra positiva (resto del átomo).

Estructuras cristalinas

En sustancias como el germanio (**Ge**) y el silicio (**Si**) los electrones de la capa exterior de un átomo son **compartidos por átomos adyacentes** (Figura 3.1) formando una estructura fija rígida (cristalina) en donde los electrones carecen de movilidad. Por eso el germanio y el silicio puro son sustancias aislantes.

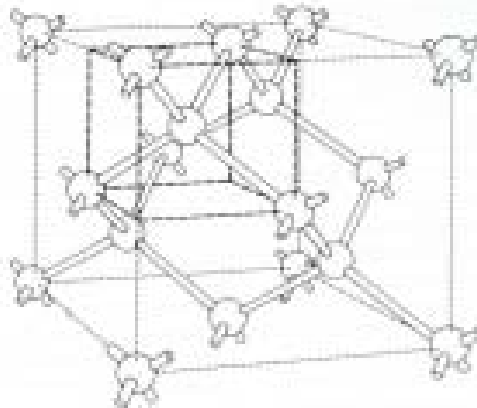


Figura 3.1- Estructura cristalina

Semi conductores

Si en un cristal de este tipo logramos incorporar átomos de otras sustancias, aún en proporciones muy pequeñas, la conductividad de estos materiales varía drásticamente, convirtiéndolos en **semiconductores**. Estos materiales tienen un valor de conductividad que los sitúan entre los aisladores y los conductores de corriente.

Areas N y P

Si la sustancia que se introduce tiene la capacidad de **ceder electrones**, éstos se convierten en la carga mayoritaria en esa zona (semiconductor tipo **N**).

Si, por el contrario, los átomos de la sustancia que se introduce **son ávidos de electrones**, la mayoría de los átomos en esta zona tendrán cargas positivas libres (tipo **P**). A estas cargas se las denominan hoyos (**holes** en inglés) ya que el electrón tomado deja un vacío (hoyo) en el átomo que lo cedió. A las sustancias que se usan para alterar la conductividad del cristal puro se las conocen como **dopantes** (**dopants**, en inglés).

Difusión por implantación

El proceso de introducción de átomos que ceden o toman electrones, **difusión**, se ha convertido en un proceso robotizado, en donde los átomos de las sustancias dopantes se introducen usando cañones electrónicos que bombardean los cristales (proceso de **implantación**). La industria usa el cristal de silicio (**Si**) porque su comportamiento a altas temperaturas es superior al del germanio (**Ge**).

Quizá en el futuro haya células FVs hechas con diamantes, ya que se han descubierto varios procesos para fabricarlos en cantidad y a bajo precio, pero no se ha investigado como llevar adelante el proceso de difusión. Este material, carbón, es superior al silicio cuando la temperatura ambiente es elevada.

Juntura N-P

Juntura N-P

El proceso de difusión es **repetitivo**, de manera que pueden crearse zonas cuasi-conductoras, aisladoras o semiconductoras con diferentes cargas mayoritarias. Esto permite crear dos zonas cuasi-conductoras en los extremos del diodo, las que sirven para anclar los conectores externos, así como dos zonas **adyacentes**, una del tipo **N**; la otra del tipo **P**. La zona entre estas dos regiones se denomina **juntura** (*junction*, en inglés).

Nota:

Nota: Observe el lector que la letra **N** se correlaciona con negativo y la letra **P** con positivo, indicando cual es la carga mayoritaria en cada zona.

Estado de equilibrio

Estado de equilibrio

La teoría muestra que las cargas mayoritarias (electrones de un lado y hoyos del otro) no **permanecen inmóviles**, desplazándose hacia la zona adyacente, donde la concentración es baja. Este desplazamiento de cargas (corrientes de desplazamiento) acumula cargas positivas en la zona N y negativas en la zona P, creando una diferencia de potencial en la juntura, la que establece un campo eléctrico (**E**). El proceso migratorio continúa hasta que se vé **interrumpido** cuando el valor del potencial alcanza lo que se denomina el nivel de Fermi para esa substancia.

El campo eléctrico **E** (V/distancia) en esta zona tendrá un valor elevado, ya que la juntura tiene muy pequeño espesor, .

La Figura 3.2 muestra el estado de equilibrio para una juntura N-P.

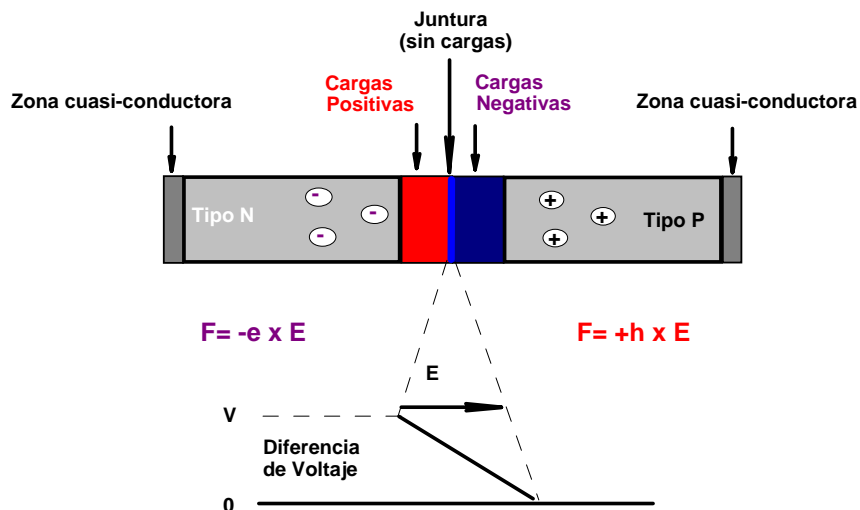


Fig. 3.2- Juntura N-P en Equilibrio

Nota: En la expresión (3.1) la **dirección** de la fuerza depende del signo de la carga, de manera que los electrones y los hoyos se desplazan en sentidos opuestos.

Célula fotovoltaica

Cuando la luz solar que incide sobre la zona adyacente a la juntura tiene el **espectro y nivel de energía** requerido por el material (Si), el bombardeo de los fotones crea **pares de cargas libres** (Figura 3.3), los que se mueven libremente. Algunos de estos pares se **recombinan** (neutralizan) antes de migrar a la zona de juntura, pero un elevado porcentaje de electrones del lado P y de hoyos del lado N serán impulsados a través de la juntura. La dirección del campo eléctrico **E** (Figura 3.2) hace que estas cargas **no puedan volver**, alterándose el estado de equilibrio. Las cargas libres están listas para sostener una corriente cuando se conecten el lado N y P a una carga eléctrica externa.

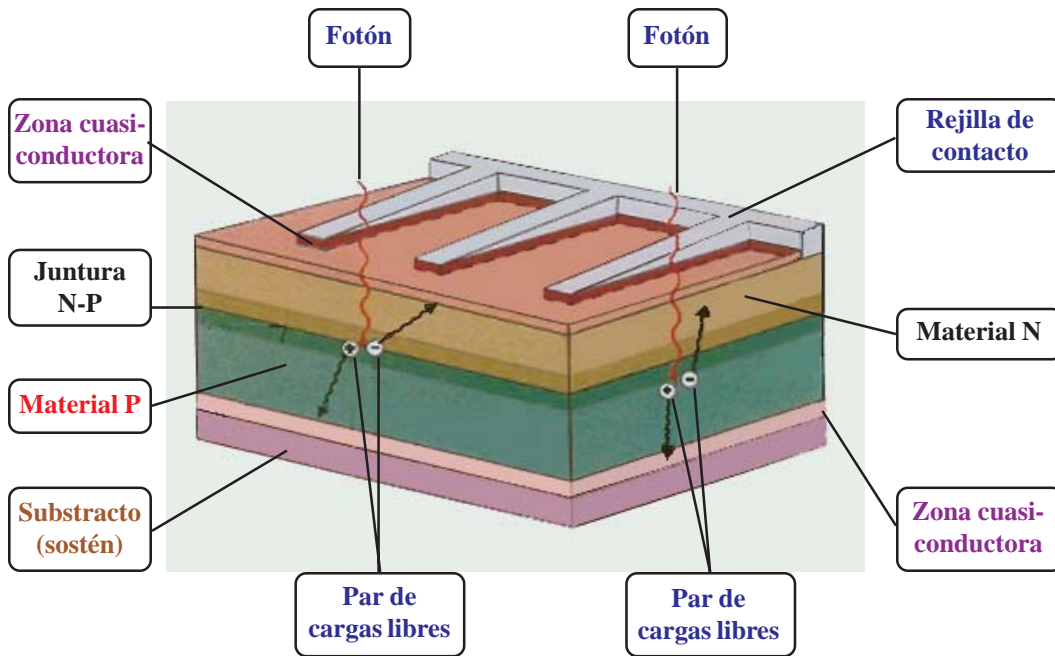


Figura 3.3- Corte de una célula FV

Eficiencia

La eficiencia de conversión (energía luminosa en eléctrica) está dada, en forma porcentual, por la expresión:

$$\eta\% = \left(\frac{\text{Energía eléctrica de salida}}{\text{Energía luminosa de entrada}} \right) \times 100 \quad (3.2)$$

Donde η (nu) es el valor porcentual de la eficiencia.

Tipos de células FVs

El mercado ofrece numerosos tipos de células FVs. Algunas gozan de más difusión que otras debido a que fueron introducidas hace largo tiempo atrás. Todas las células pertenecen a uno de los grupos mencionados a continuación:

- ◆ **Mono-cristalinas.**
- ◆ **Poli-cristalinas.**
- ◆ **Amorfas.**

El orden dado es el mismo cuando se considera el costo o la eficiencia de conversión.

Estructura mono-cristalina

Las células de estructura mono-cristalina fueron las primeras en ser manufacturadas, ya que se podían emplear las mismas técnicas usadas previamente en la fabricación de diodos y transistores. A este tipo de células, conocidas simplemente como **cristalinas**, se le asigna la abreviatura (**cSi**). El proceso de fabricación del cristal de silicio requiere un alto consumo de energía eléctrica, lo que eleva el costo de estas células, las que proporcionan los más altos valores de eficiencia. Recientemente, la compañía Sun-Power ha anunciado la introducción de una célula de cSi, sin rejilla de contacto frontal, la que tendría una eficiencia del 20% (*máximo teórico: aprox. 25%*).

Estructura poli-cristalina

Estructura poli-cristalina

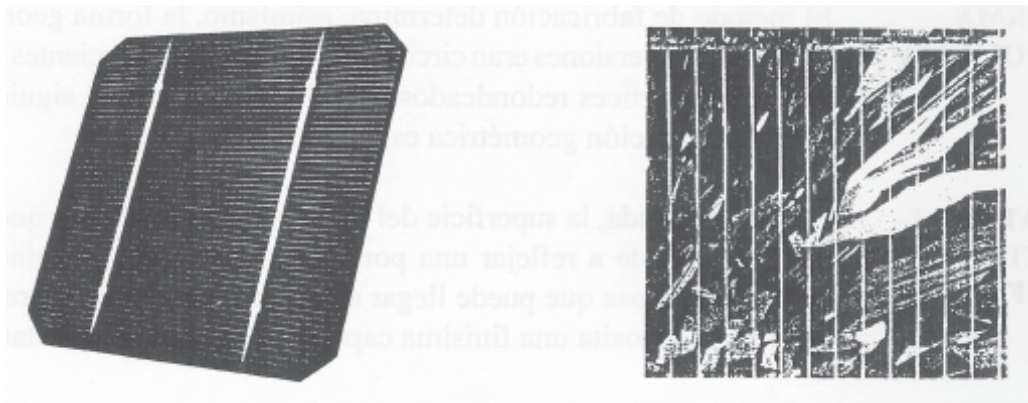
La versión poli-cristalina (**pSi**) se obtiene fundiendo silicio de grado industrial, el que se vierte en moldes rectangulares, de sección cuadrada. Como el costo del material y el procesado se simplifican, las células amorfas alcanzan un valor intermedio entre las cristalinas y las amorfas. La eficiencia ha ido creciendo, llegando a ofrecerse (Kyocera) células de pSi con eficiencia de conversión del 15%, un valor reservado pocos años atrás para las células de cSi.

Identificación visual

Identificación visual

Las células de **cSi** se reconocen a simple vista, ya que su superficie es uniforme. Expuestas a la luz actúan como un espejo grisáceo. Las células poli-cristalinas reflejan la luz en forma no uniforme, pudiéndose observar las imperfecciones en el cristal. Tienen, asimismo, una coloración azulada.

La Figura 3.4 ilustra estos dos tipos, ambos con rejilla frontal de conexión.



Cristalina (cSi)

Poli-cristalina (pSi)

Figura 3.4- Células FVs

Estructura amorfa

El otro tipo corresponde a las células **amorfas** (a=sin; morfo=forma). Como su nombre lo indica estas células no poseen una estructura cristalina. Precisamente esa simplificación en la estructura conduce a un abaratamiento drástico de las mismas.

Es un hecho que cuando más se aleja la técnica de fabricación de una célula FV de la estructura cristalina pura, más defectos estructurales aparecerán en la substancia semiconductor, los que aumentan el atrapamiento de las cargas libres, disminuyendo la eficiencia de conversión. Para reducir este efecto, el espesor del material activo en estas células es diez (10) veces menor que el de una célula de cSi. Esto, a su vez, contribuye a bajar el costo.

Multi junturas

Para compensar el bajo nivel de conversión los fabricantes adicionan junturas, las que responden a diferentes frecuencias del espectro luminoso. La compañía UNISOLAR apila tres junturas. La primera responde a la zona del azul, la segunda al verde y la tercera al rojo, la de menor energía en el espectro. Los depósitos activos se hacen sobre una lámina continua de acero inoxidable de bajo espesor que permite que las células sean flexibles. Si se requiere una estructura rígida se les agrega un marco metálico.

La compañía British Petroleum (BP) ofrece un modelo similar que usa dos capas conversoras en su línea Millennium™. La Figura 3.6 muestra como las células de aSi pueden ser ofrecidas como paneles flexibles o rígidos.

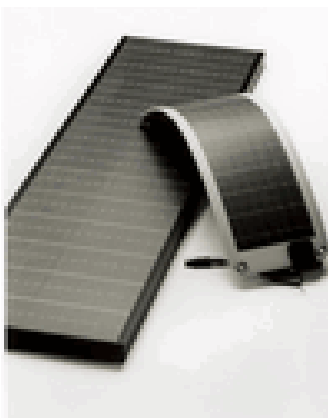


Figura 3.5- Paneles hechos con células de aSi

Pérdidas de energía luminosa

Estas pérdidas ocurren fuera del material semiconductor. Su mención y análisis ayudarán al lector a entender algunos detalles auxiliares contenidos en las hojas de especificaciones. Consideraremos:

- ❖ La reflectancia de la superficie colectora.
 - El “sombreado” de los contactos.
- ❖ La superficie colectora de una célula de cSi actúa como un espejo, reflejando hasta el 30% de la luz incidente. Para disminuir la **reflectancia**, la superficie de colección recibe una capa antireflectiva de monóxido de silicio (**SiO**), la que disminuye la reflectancia a un 10%. Una segunda capa baja la reflectancia a un 4%, pero incrementa el costo. La necesidad de una capa antireflectiva se extiende a todo tipo de células, si bien el tratamiento es diferente.
 - El contacto ubicado sobre la superficie colectora utiliza una rejilla metálica, de trazos finos, la que contribuye a disminuir el área activa de la célula. A este problema se lo conoce como el “sombreado” de los contactos y no debe confundirse con el sombreado externo sobre el área colectora. Esta reducción, en células modernas, varía entre un 3 y un 5% de la superficie activa. Un fabricante ha anunciado la producción de células sin rejillas frontales (Sun Power).

Voltaje, Corriente y Potencia

El voltaje de juntura depende **exclusivamente** del material usado (nivel de Fermi para el cristal usado). Para las células de silicio este valor es de alrededor de 0,5 V. Como las cargas son impulsadas por un campo eléctrico fijo, el voltaje de una celda FV es de corriente continua (CC). Por lo tanto, hay un lado positivo (lado P) y otro negativo (lado N), asumiendo que la corriente circula en sentido opuesto al de los electrones.

El valor de la corriente dependerá del valor de la carga, la irradiación solar, **la superficie de la celda** y el valor de su resistencia interna (Capítulo 4).

En un instante determinado, la potencia eléctrica proporcionada por la célula FV está dada por el producto de los valores instantáneos del voltaje y la corriente de salida.

Forma geométrica

Forma geométrica

El método de fabricación determina, en gran parte, la forma geométrica de la célula FV. Las primeras versiones de cSi eran redondas, pues el cristal puro tenía una sección circular. Versiones más recientes tienen forma cuadrada, o casi-cuadrada, donde las esquinas tienen vértices a 45°.

Las células de pSi son cuadradas porque el molde donde se vierte el semiconductor fundido tiene esta forma.

La forma cuadrada permite un mayor compactado de las mismas dentro del panel FV, disminuyendo la superficie que se necesita para colocar un determinado número de células (Figura 3.6).

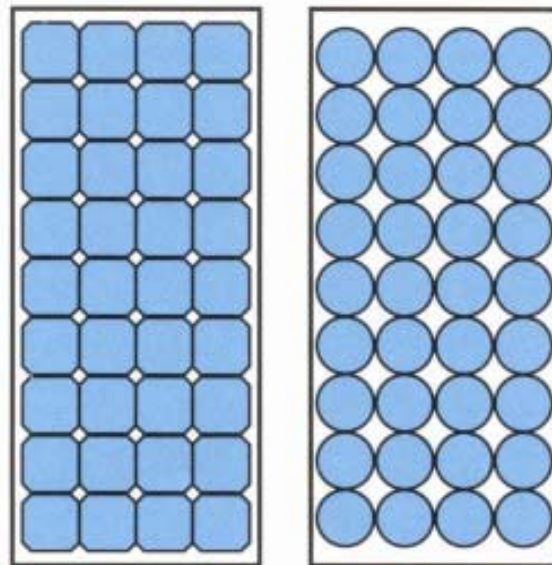


Figura 3.6- Eficiencia de empaque

ESTA PAGINA HA SIDO DEJADA EN BLANCO A PROPOSITO