



Energía Solar Fotovoltaica_ Fabricación

1 EL SILICIO

Elemento químico de número atómico 14, masa atómica 28,086 y símbolo Si ; es un no metal sólido, de color amarillento, que se extrae del cuarzo y otros minerales y es el segundo elemento más abundante en la Tierra después del oxígeno; se utiliza en la industria del acero como componente de las aleaciones de silicio y acero, en la fabricación de transistores y circuitos integrados, y sus silicatos, en la fabricación de vidrio, barnices, esmaltes, cemento, porcelana, etc

Sus propiedades son intermedias entre las del carbono el germanio. En forma cristalina es muy duro y poco soluble y presenta un brillo metálico y color grisáceo. Aunque es un elemento relativamente inerte y resiste la acción de la mayoría de los ácidos, reacciona con los halógenos y álcalis diluidos. El silicio transmite más del 95 % de las longitudes de onda de la radiación infrarroja.

14	28,086
	4
2688 1410 2,33	Si
	(Ne)3s ² 3p ²
	Silicio

Se prepara en forma de polvo amarillo pardo o de cristales negros-grisáceos. Se obtiene calentando sílice, o dióxido de silicio (SiO_2), con un agente reductor, como carbono o magnesio, en un horno eléctrico. El silicio cristalino tiene una dureza de 7, suficiente para rayar el vidrio, de dureza de 5 a 7. El silicio tiene un punto de fusión de 1.411 °C, un punto de ebullición de 2.355 °C y una densidad relativa de 2,33(g/ml). Su masa atómica es 28,086 u (unidad de masa atómica).



Se disuelve en ácido fluorhídrico formando el gastetrafluoruro de silicio, SiF_4 (ver flúor), y es atacado por los ácidos nítrico, clorhídrico y sulfúrico, aunque el dióxido de silicio formado inhibe la reacción. También se disuelve en hidróxido de sodio, formando silicato de sodio y gas hidrógeno. A temperaturas ordinarias el silicio no es atacado por el aire, pero a temperaturas elevadas reacciona con el oxígeno formando una capa de sílice que impide que continúe la reacción. A altas temperaturas reacciona también con nitrógeno y cloroformando nitruro de silicio y cloruro de silicio, respectivamente.

El silicio constituye un 28 % de la corteza terrestre. No existe en estado libre, sino que se encuentra en forma de dióxido de silicio y de silicatos complejos. Los minerales que

contienen silicio constituyen cerca del 40 % de todos los minerales comunes, incluyendo más del 90 % de los minerales que forman rocas volcánicas. El mineral cuarzo, sus variedades (cornalina, crisoprasa, ónice, pedernal y jaspe) y los minerales cristobalita y tridimita son las formas cristalinas del silicio existentes en la naturaleza. El dióxido de silicio es el componente principal de la arena. Los silicatos (en concreto los de aluminio, calcio y magnesio) son los componentes principales de las arcillas, el suelo y las rocas, en forma de feldespatos, anfíboles, piroxenos, micas y zeolitas, y de piedras semipreciosas como el olivino, granate, zircón, topacio y turmalina.

Ya antes, en 1787, el francés Antoine Lavoisier había identificado el silicio como una sustancia (aún no como un elemento) que formaba parte de la sílice. El nombre del elemento proviene precisamente de ahí: "silicio" es "el elemento de la sílice", que a su vez



proviene del latín *silex*, que aún utilizamos en castellano (sílex) para referirnos al pedernal. En 1800 Humphry Davy estaba convencido de que el silicio era un compuesto, aunque nunca consiguió obtener sus elementos constituyentes

Aunque en 1811 los franceses Joseph Louis Gay-Lussac y Louis Jacques Thénard probablemente lograron –por la descripción de sus experimentos y las propiedades de las sustancias obtenidas– aislar silicio a partir de tetrafluoruro de silicio, no fueron capaces de identificarlo como elemento. El honor de su

descubrimiento como tal pertenece al sueco Jöns Jakob Berzelius, que logró aislarlo e identificarlo en 1823, utilizando un método muy similar al de Gay-Lussac y Thénard.

¡Poco podía sospechar Berzelius lo importante que sería ese polvo de color metálico que había logrado obtener! El silicio tiene propiedades similares a las del carbono (al fin y al cabo tiene el mismo número de electrones en la última capa): al igual que él puede encontrarse en forma amorfa o formar cristales. Eso sí, los cristales de silicio puro no tienen nada que ver con los de carbono: la peculiar geometría y solidez de los enlaces del carbono cristalino no se reproducen en el silicio, de modo que los cristales de silicio no son, ni de lejos, tan resistentes como el diamante.

Sin embargo, a cambio el silicio tiene una ventaja fundamental respecto al carbono: los electrones de la última capa están más lejos del núcleo que los del carbono y, por lo tanto, están menos "atados" al átomo. Por eso, el silicio se comporta de una manera más metálica que el carbono.

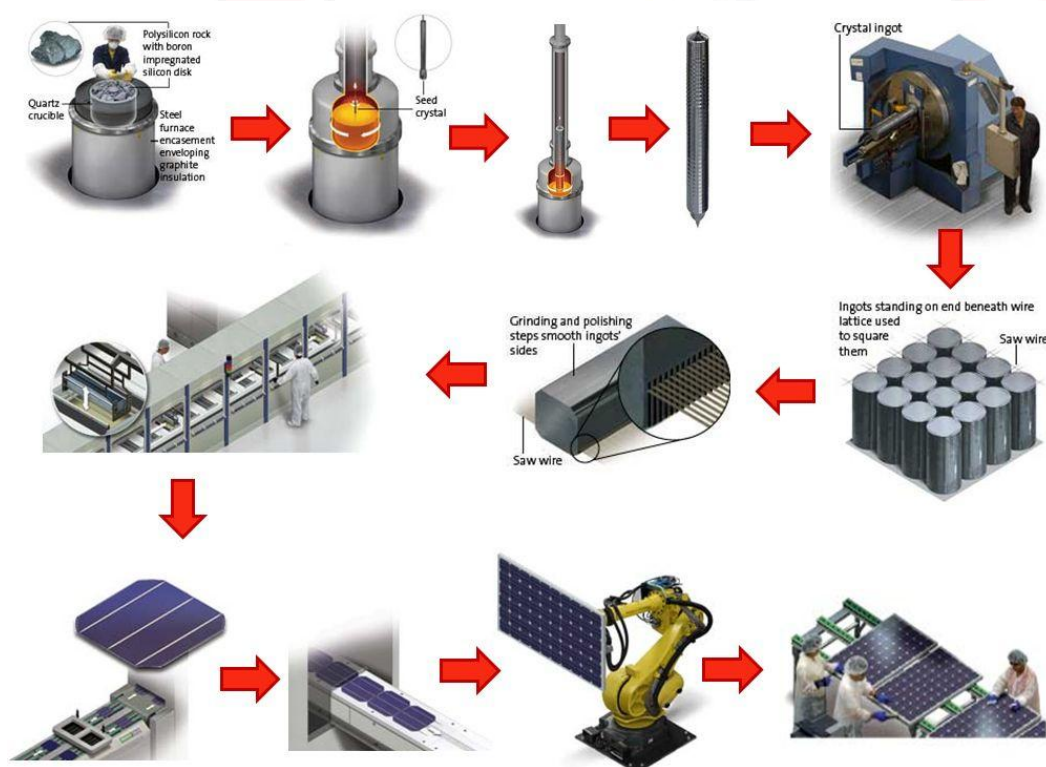
El silicio es un semiconductor; su resistividad a la corriente eléctrica a temperatura ambiente varía entre la de los metales y la de los aislantes. La conductividad del silicio se puede controlar añadiendo pequeñas cantidades de impurezas llamadas dopantes. La capacidad de controlar las propiedades eléctricas del silicio y su abundancia en la naturaleza han posibilitado el desarrollo y aplicación de los transistores y circuitos integrados que se utilizan en la industria electrónica.

Sus principales propiedades son:

- Densidad: $2,33 \text{ gr/cm}^3$
- Densidad atómica: $5 - 10^{22} \text{ atm/cm}^3$
- Concentración intrínseca de portadores a 300 K: $1,45 - 10^{10} \text{ cm}^{-3}$
- Ancho banda prohibida a 300 K (0 K): 1,1 eV (1,2 eV) Movilidad electrones a 300 K: $\mu_n = 1500 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ Movilidad huecos a 300 K: $\mu_p = 475 \text{ cm}^2/\text{Vs}$
- Cte difusión electrones a 300°K: $D_n = 34 \text{ cm}^2/\text{s}$ Cte difusión huecos a 300°K: $D_p = 13 \text{ cm}^2/\text{s}$ Punto de fusión: 1415°C
- Índice de refracción (633nm): 3,875

2 PROCESO DE FABRICACIÓN SILICIO GRADO SOLAR:

De forma muy resumida, el proceso de fabricación de una célula mono o policristalina se puede dividir en las siguientes fases:



2.1 Obtención del silicio grado metalúrgico

A partir de las rocas ricas en cuarzo (formadas principalmente por SiO_2 , muy abundantes en la naturaleza) y mediante el proceso de reducción con carbono, se obtiene Silicio con una pureza aproximada del 99%, que no resulta suficiente para usos electrónicos y que se suele denominar **Silicio de grado metalúrgico**. Esto se realiza en hornos de arco a 1800°C . Se produce una reducción del cuarzo utilizando carbón, dando lugar al mencionado silicio y monóxido de carbono.

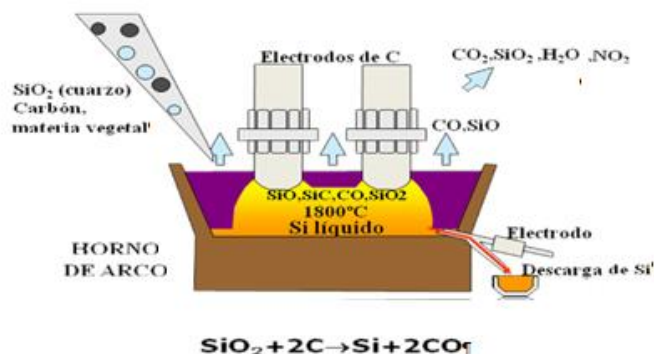


Figura Obtención del silicio de grado metalúrgico.

La producción anual y el coste se estiman en aproximadamente 1 millón de toneladas y 1 €/kg aproximadamente. De ellas, la industria microelectrónica emplea una pequeña fracción (aproximadamente el 3%), mientras que la mayor parte se emplea en metalurgia (aluminios, aceros, siliconas). En la figura se muestra un esquema de como se obtiene el silicio de grado electrónico

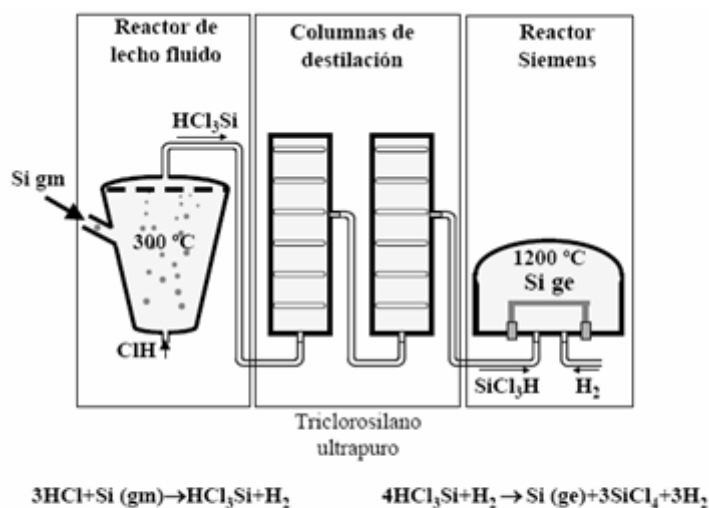


Figura Producción de silicio de grado electrónico

- Materia prima: Si gm
- Producto: Si grado electrónico (pureza 99.9999999%)
- Consumo de gran cantidad de energía

2.2 Obtención del silicio grado solar

El silicio de grado metalúrgico se hace reaccionar con ácido clorhídrico, obteniendo triclorosilano. Este pasa por columnas de destilación, donde se realizan procesos de purificación. Finalmente se hace reaccionar con hidrógeno, dando lugar a silicio de grado electrónico (Si ge) ultrapuro (polisilicio). Se trata de un proceso que consume mucha energía y costoso. Además, solo el 40% del silicio obtenido es apto para aplicaciones de la industria microelectrónica

La industria de semiconductores purifica este Silicio por procedimientos químicos, normalmente destilaciones de compuestos colorados de Silicio, hasta que la concentración de impurezas es inferior al 0.2 partes por millón. El material así obtenido suele ser llamado **Silicio grado semiconductor** y aunque tiene un grado de pureza superior al requerido en muchos casos por las células solares, ha constituido la base del abastecimiento de materia prima para aplicaciones solares, representando en la

actualidad casi las tres cuartas partes del abastecimiento de las industrias de fabricación de células.

Sin embargo, para usos específicamente solares, son suficientes (dependiendo del tipo de impureza y de la técnica de cristalización), concentraciones de impurezas del orden de una parte por millón. Al material de esta concentración se le suele denominar **Silicio grado solar**.

Existen actualmente tres posibles procedimientos en distintas fases de experimentación para la obtención del Silicio grado solar, que proporcionan un producto casi tan eficaz

como el del grado semiconductor a un coste sensiblemente menor.



Los primeros sistemas para obtener silicio, aunque sencillos, no permitían una gran pureza (no más de un 98%). Siguen utilizándose hoy en día para producirlo cuando no hace falta que sea muy puro, o para purificarlo posteriormente: se introduce sílice (SiO_2) en una caldera con algún tipo de carbono (por ejemplo, carbón) y se calienta hasta casi 2000°C . El carbono reemplaza entonces al silicio junto al oxígeno, formando dióxido de

carbono y liberando el silicio:



El silicio fundido se va depositando en el fondo de la caldera, se retira y se tiene silicio relativamente puro a un precio muy bajo (la sílice y el carbón son baratos, y el proceso no es complicado). Sin embargo, este silicio no puede utilizarse aún como semiconductor en

electrónica o como parte de un panel solar: aparte de tener impurezas es amorfo, es decir, los átomos de silicio están dispuestos de manera aleatoria.

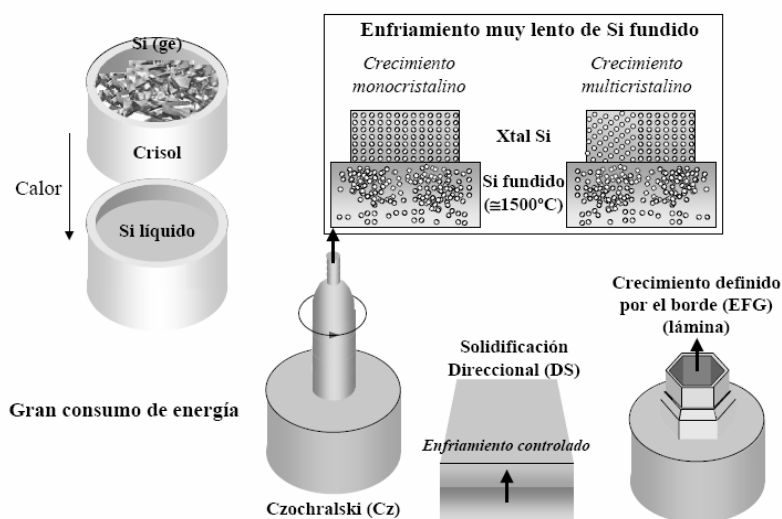


Figura Cristalización del silicio de grado electrónico.

Eso hace que los electrones que se mueven por el silicio lo hagan bastante mal: el silicio no es, al fin y al cabo, un metal, de modo que no conduce demasiado bien. Al ser además amorfo,

cuando un electrón empieza a moverse en una dirección determinada se encuentra muy

pronto con un átomo de frente, de modo que su movimiento se ve interrumpido. Para lograr un flujo de electrones sin interrupciones hace falta **silicio cristalino**, en el que los átomos estén ordenados más o menos perfectamente y haya pocos átomos de otros elementos –salvo los que se introduzcan a propósito cuando se dopa, por supuesto, e incluso entonces deben estar en posiciones determinadas–.

Atendiendo a su modo de cristalización, la figura muestra los principales tipos de silicio resultantes, y la Tabla I algunas características.

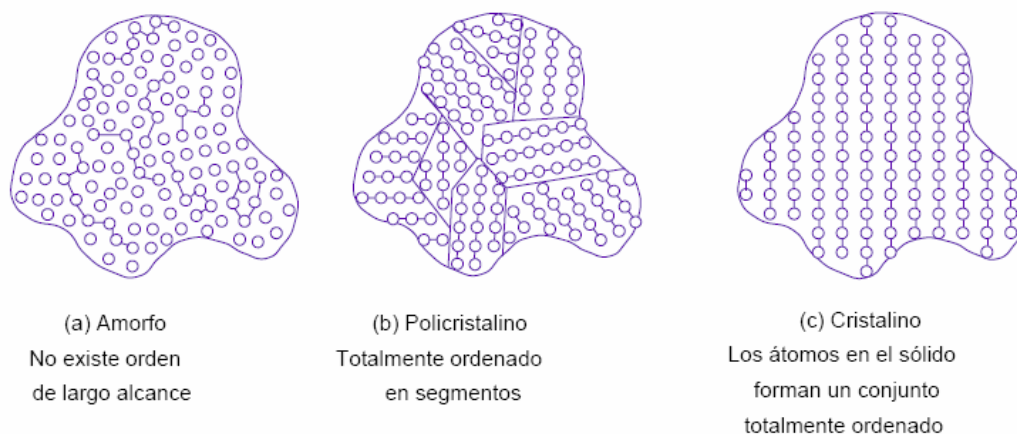
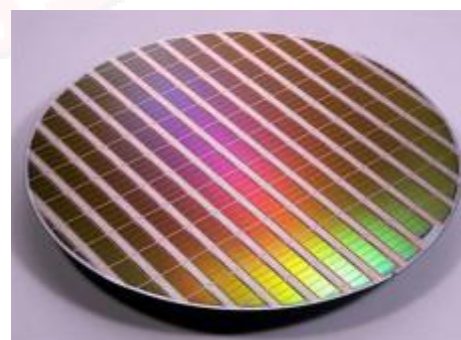


Figura : Tipos de silicio resultantes tras el paso de cristalización.

Tipo	Tamaño de grano	Técnicas de crecimiento
Monocristalino	> 10 cm	Czochralski, zona flotante
Multicristalino	1 mm – 10 cm	Cubas, cinta
Policristalino	1 mm – 1 mm	CVD
Amorfo	< 1 mm	Plasma

Tabla : Tamaño de grano y técnicas de crecimiento de los principales tipos de silicio

Para lograr esto se han utilizado distintos métodos a lo largo del siglo XX. Al principio se utilizaban métodos físicos: cuando el silicio fundido se solidifica, las impurezas ralentizan el proceso, de modo que la parte que se solidifica antes es más pura. Si se solidifica silicio fundido en una barra, por ejemplo, la “corteza” de la barra será más impura que el centro. Si se lima y se descarta la parte más externa, lo que queda (el centro de la barra) tiene mayor pureza. A continuación se puede volver a fundir la barra, solidificarla y “pelar la corteza” de nuevo, etc. Al final se tiene una menor cantidad de silicio, pero de una pureza mayor en cada iteración del proceso.



Hoy en día se emplean, sin embargo, métodos químicos, que son más baratos: aunque parezca extraño, se mezcla el silicio impuro con otros elementos para formar compuestos, como el triclorosilano (HSiCl_3) que son gases a temperaturas relativamente bajas (de unos

1200 °C). A continuación se cogen barras de silicio y se introducen en el gas: poco a poco, el triclorosilano se va descomponiendo y depositando silicio, átomo a átomo, sobre la barra, que se va haciendo más gruesa. Al depositarse poco a poco, los átomos lo hacen de forma relativamente ordenada, formando pequeños cristales. Este proceso, denominado **proceso Siemens**, produce silicio de una enorme pureza (una parte entre mil millones de impurezas). El silicio de este tipo, producido por el proceso Siemens y otros diferentes, se denomina **silicio policristalino**, pues está formado por multitud de pequeños cristales de silicio:

Estos cristales tienen un tamaño de unos nanómetros hasta unas micras, pero eso es suficiente para que sus propiedades eléctricas sean muy diferentes del silicio amorfo: para un electrón, recorrer una micra por un cristal ordenado es un verdadero viaje comparado con el silicio amorfo. El silicio policristalino se usa en paneles solares y electrónica, industrias que consumen enormes cantidades de este elemento.

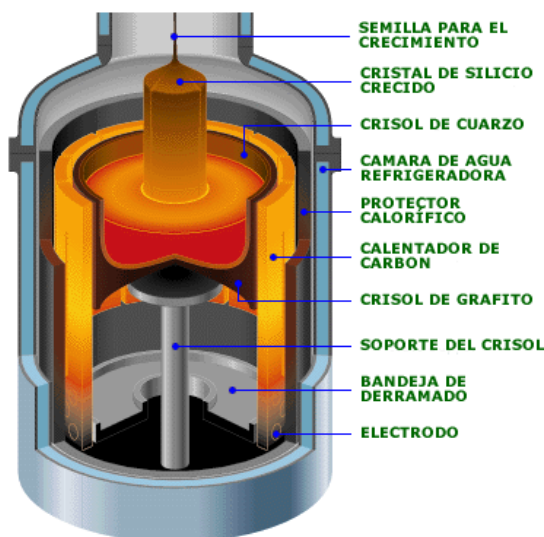
Eso sí, a veces ni siquiera el silicio policristalino es suficiente: los pasos de un pequeño cristal al siguiente siguen interrumpiendo el flujo de los electrones y modificando las propiedades eléctricas del material

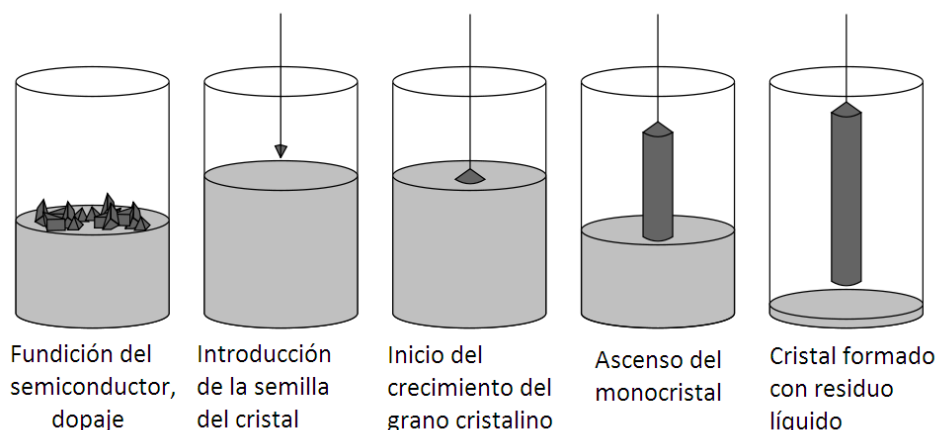
2.3 Crecimiento por proceso de Czochralski

Es posible entonces, si se desea mayor perfección, obtener **silicio monocristalino**, en el que el bloque entero de silicio es un único cristal perfecto de tamaño macroscópico. Para ello se emplean procesos como el de Czochralski (que también sirve para producir cristales de otros semiconductores, metales e incluso producir gemas artificiales).

En el **proceso de Czochralski** se utiliza un crisol hecho de cuarzo, en el que se hace una especie de "sopa": silicio de gran pureza fundido, al que se añaden otros elementos para doparlo, como boro o fósforo dependiendo de qué tipo de semiconductor se quiere obtener. A continuación se introduce en la "sopa", colgando de un hilo metálico, un minúsculo cristal de silicio que actúa de semilla del cristal mayor. Se va rotando este pequeño cristal en el silicio fundido mientras se va subiendo poco a poco. El silicio, junto con las impurezas que se han añadido y algunos átomos de oxígeno de las paredes de cuarzo, se va depositando muy, muy lentamente sobre el cristal, formando capa tras capa de átomos perfectamente ordenados:

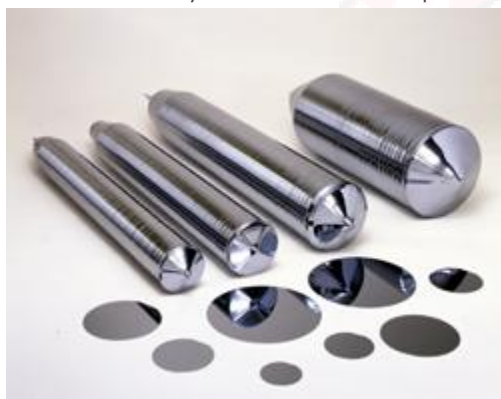
CRISTALIZACIÓN POR EL METODO "CZOCHEWSKI"





La temperatura se controla para que esté justamente por encima del punto de fusión y no empiece a solidificarse.

Al controlar con precisión los gradientes de temperatura, velocidad de tracción y de rotación, es posible extraer un solo cristal en forma de lingote cilíndrico. Con el control de estas propiedades se puede regular el grosor de los lingotes.



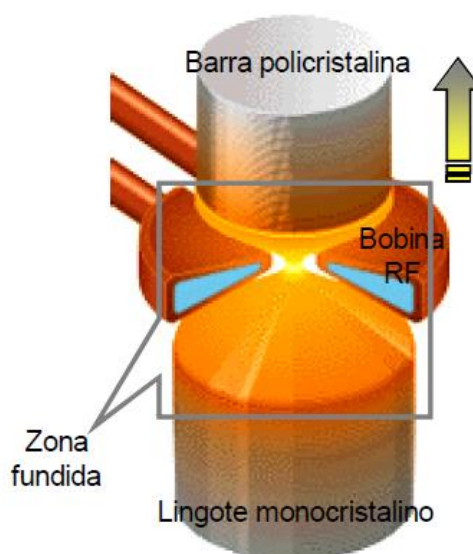
Cuando se acaba, se tiene una barra que es un cristal único de silicio, de uno o dos metros de largo y hasta 40 cm de grosor: una especie de "salchicha de cristal de silicio":



2.4 Crecimiento por el método de la zona flotante (FZ)

Parte de una columna vertical de silicio policristalino sujeta en sus extremos por dos soportes. Una bobina por la que circula una corriente de radiofrecuencia rodea dicha columna y produce una fusión localizada del silicio en la sección de la bobina.

Esta bobina se puede desplazar verticalmente a lo largo de la columna de silicio. La bobina empieza a fundir el silicio del extremo inferior, donde hay una semilla de silicio monocristalino similar a la comentada en el apartado anterior. Al subir lentamente hace que la zona fundida del centro de la bobina se desplace hacia la parte superior. La zona fundida que queda debajo se recrystaliza siguiendo una estructura monocristalina. La zona fundida queda por lo tanto flotante entre dos zonas solidas.



Debido a que en el silicio las impurezas en general y las metálicas en particular tienden a ir a la fase líquida, este proceso sirve además de purificación. Los lingotes obtenidos con este método poseen así menos impurezas que los crecidos con el método Czochralsky.

Como el lingote no está en contacto con ningún crisol, el contenido en carbono y oxígeno es muy bajo. En cuanto a las impurezas metálicas, tenderán a acumularse en la parte superior del lingote, el cuál no será rechazado. A mayor número de pasadas de la bobina de radiofrecuencia menor será el contenido de impurezas del lingote

2.5 Silicio multicristalino (mc-Si)

Se trata de una técnica de crecimiento más simple, y por lo tanto más barata que las anteriores. Sin embargo, la calidad del material es menor debido a la presencia de numerosos defectos en la red cristalina (fronteras de grano y dislocaciones), así como impurezas, los cuales hacen que sean menores los tiempos de vida de los portadores minoritarios. Además, las fronteras entre los distintos granos actúan como barreras para el

flujo de portadores minoritarios. A pesar de esto, como se muestra en la figura 2, la mayor parte de las células solares que se producen en la actualidad utilizan este tipo de sustrato debido a su buena relación coste – eficiencia.

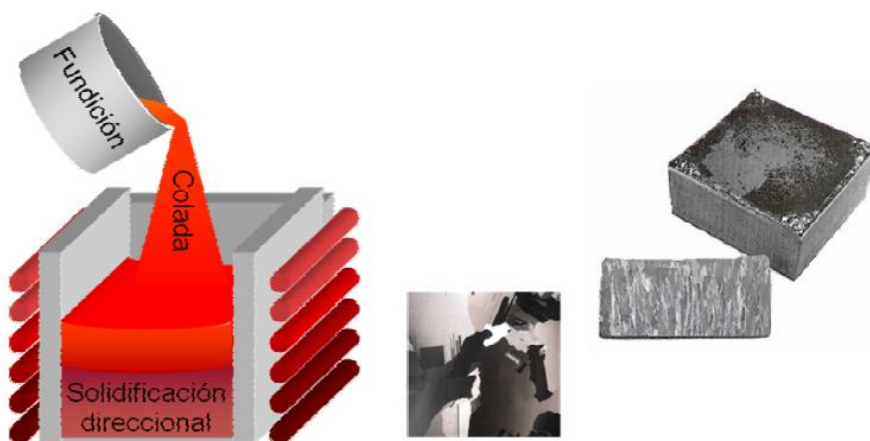
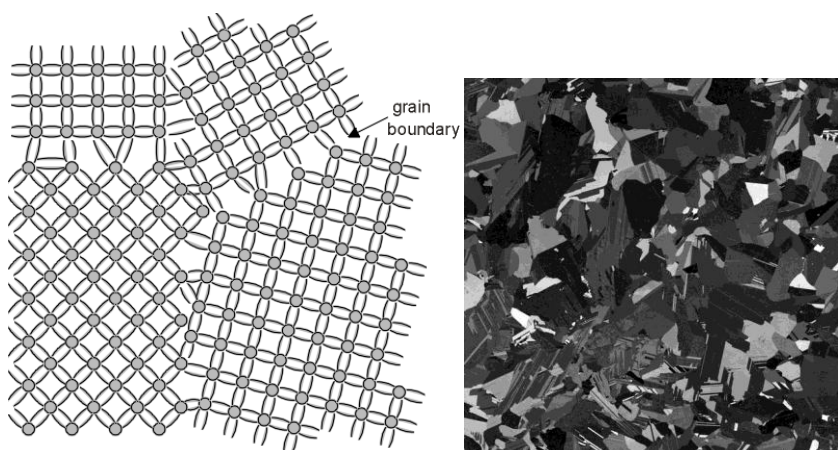


Figura Cristalización del silicio multicristalino

Tal y como aparece en la tabla I, esta estructura posee granos con un tamaño comprendido entre 1 mm y 10 cm.

El polisilicio se funde en un crisol de grafito o cuarzo y posteriormente se deja enfriar de forma controlada. Los bloques tienen tamaños en torno a los 690 x 690 mm y un peso de unos 240 kg, para lo que se requieren unas 56 horas de proceso. El throughput es un 30% superior al obtenido con el crecimiento Cz, y aún mayor si se compara con el método FZ. El contenido de impurezas de los bloques es más elevado que en los casos anteriores, y mayormente en los extremos de los mismos. Esto obliga a cortar y rechazar los primeros centímetros, situados en los bordes de todo el bloque. Con posterioridad, este bloque se divide en lingotes cuadrados de tamaño determinado.

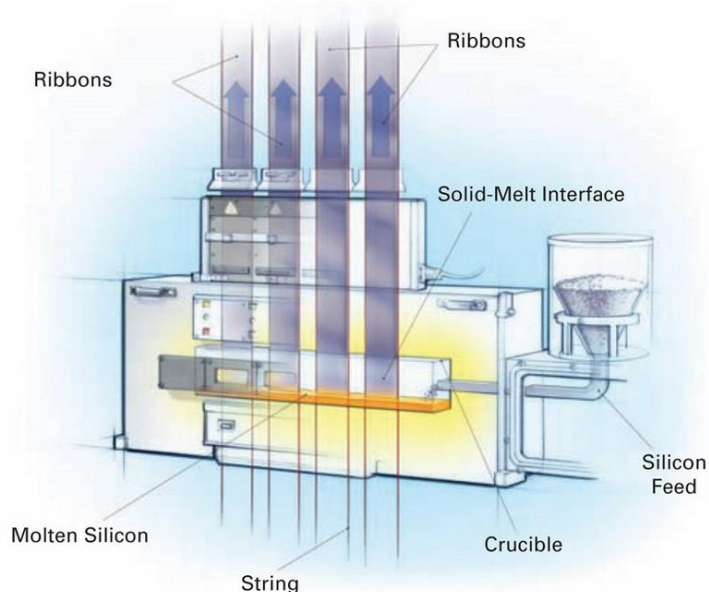




2.6 Células solares Ribbon

Las células solares fotoeléctricas de silicio Ribbon (en cinta) fabricadas con tecnología RST finalizadas o en alguno de sus pasos intermedios.

La tecnología RST utiliza como sustrato una cinta flexible de carbono producida para otras aplicaciones. Esta cinta se purifica y se impregna con carbón pirolítico. A continuación se le hace pasar a través de un horno con silicio purificado en estado líquido que se adhiere al sustrato de carbono por ambos lados y se tira de la cinta de carbono. Una vez ha solidificado se corta al tamaño adecuado. Entonces se introduce de nuevo en un horno donde el sustrato se quema hasta ser eliminado. A continuación se somete a procesos químicos de dopado y atacado por el que se añade algunas impurezas deseables como el fósforo y se eliminan otras indeseables como el cobre, níquel, cobalto, oro, hierro y cromo. Finalmente se hidrogena, se crea una capa anti-reflectante para atrapar mejor la luz y se colocan los contactos.



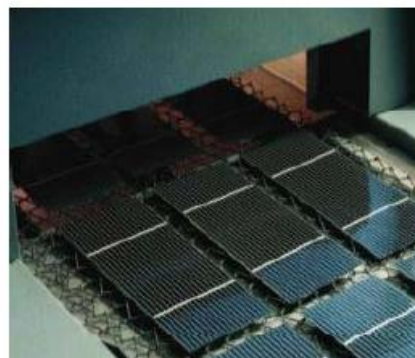
En la Figura se muestra en un diagrama los pasos necesarios para fabricar las células solares Ribbon con tecnología RST a partir de una cinta de carbono y silicio fundido. Las células solares con tecnología RST son ligeramente menos eficientes que las de mc-Si de lingote

pero en contrapartida se desperdicia menos energía y material ya que no es necesario cortar las obleas y se consiguen espesores menores.

Representación esquemática de la producción



Eficiencia: 13 -14%
Forma: rectangular
Tamaño : 8 x 15 cm²
Grosor: aprox. 0,3 mm
Estructura: ligeramente homogénea, desigual
Color: azul oscuro
Fabricantes: Sovello, Evergreen Solar



2.7 Silicio amorfo

Su coste de producción es aún más barato que el del silicio multicristalino. Posee una estructura cristalina no definida con numerosos enlaces insaturados. Por este motivo se requerirá de una pasivación del volumen de las obleas así producidas antes de realizar el proceso de fabricación de la célula solar. Esta pasivación puede hacerse con hidrógeno, mejorándose así la calidad del sustrato.

Las propiedades del silicio amorfo son diferentes a las del silicio cristalino. Por ejemplo, el ancho de banda prohibida aumenta de 1,1 eV para el silicio cristalino a 1,7 eV para el amorfo y el coeficiente de absorción también es mayor. Por el contrario, la alta densidad de defectos presentes en la red cristalina hace que la longitud de difusión de los

portadores minoritarios sea muy pequeña. Por ello, los sustratos realizados serán muy finos (láminas delgadas), y se depositan sobre cristal o sobre un sustrato de bajo coste

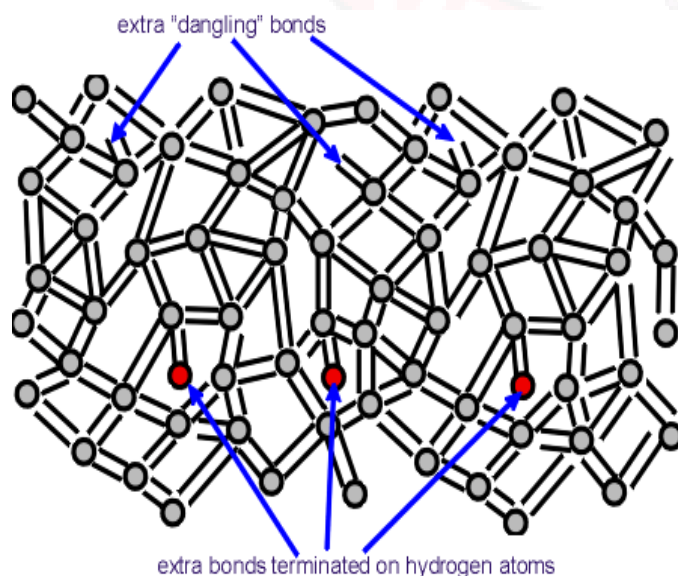


Figura Distribución atómica del silicio amorfo.

3 OBTENCIÓN DE OBLEAS

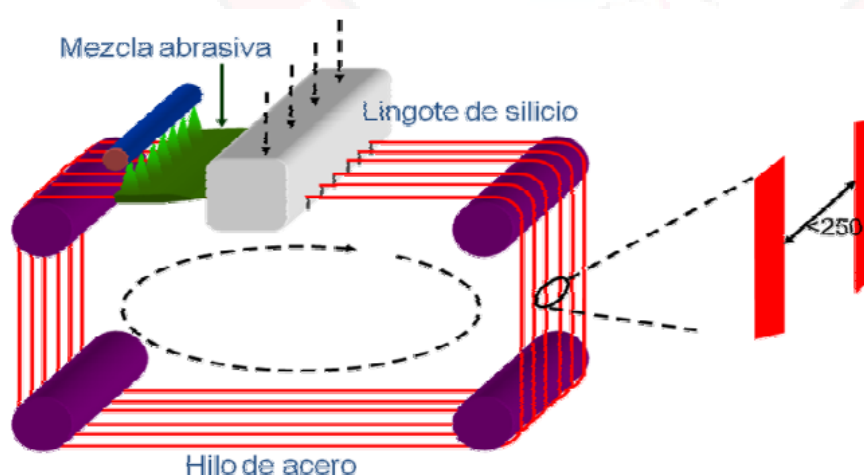
El proceso de corte tiene gran importancia en la producción de las láminas obleas a partir del lingote, ya que supone una importante pérdida de material (que puede alcanzar el 50%). Los lingotes son cortados en láminas delgadas cuadradas (si es necesario) de 200 micrómetros de espesor, que se llaman «obleas». Después del tratamiento para la inyección del enriquecido con dopante (P, As, Sb o B) y obtener así los semiconductores de silicio tipo P o N.

Después del corte de las obleas, las mismas presentan irregularidades superficiales y



defectos de corte, además de la posibilidad de que estén sucias de polvo o virutas del proceso de fabricación.

Esta situación puede disminuir considerablemente el rendimiento del panel fotovoltaico así que se realizan un conjunto de procesos para mejorar las condiciones superficiales de las obleas tales como un lavado preliminar, la eliminación de defectos por ultrasonidos, el decapado, el pulido o la limpieza con productos químicos. Para las celdas con más calidad (monocristal) se realiza un tratado de texturizado para hacer que la oblea absorba con más eficiencia la radiación solar incidente.



El método más extendido en la actualidad es el uso de sierras multihilo. En este proceso se pierde hasta un 40% del lingote. Las obleas resultantes tendrán un espesor comprendido entre las 230 y las 250 μm .

Figura Corte de los lingotes en una sierra multihilo

Las células monocristalinas han pasado de 300 micras de espesor a 200 y se piensa que llegarán rápidamente a las 180 y 150 micras, reduciendo la cantidad de silicio y la energía requerida, así como también el precio.

La producción de células fotovoltaicas requiere energía, y se estima que un módulo fotovoltaico debe trabajar alrededor de 2 a 3 años según su tecnología para producir la energía que fue necesaria para su producción (módulo de retorno de energía).



4 FABRICACIÓN DE LA CÉLULA

Una vez obtenida la oblea, es necesario mejorar su superficie, que presenta irregularidades y defectos debidos al corte, además de retirar de la misma los restos que puedan llevar (polvo, virutas), mediante el proceso denominado decapado.

4.1 Texturizado

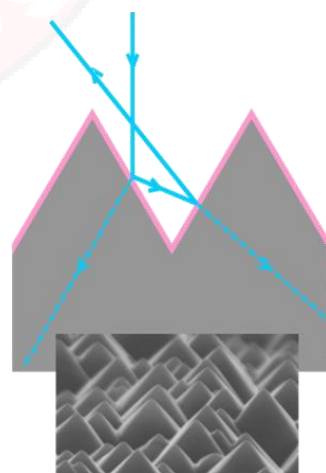
Con la oblea limpia, se procede al **texturizado** de la misma (siempre para células monocristalinas, ya que las células policristalinas no admiten este tipo de procesos), aprovechando las propiedades cristalinas del Silicio para obtener una superficie que absorba con más eficiencia la radiación solar incidente.

En primer lugar se realiza un ataque de las superficies para eliminar impurezas presentes en dicha zona de las obleas tras el corte de las mismas, minimizar el daño superficial introducido por el corte, minimizar la reflexión de la luz incidente y aumentar la superficie de contacto, consiguiéndose así reducir la resistencia serie de la célula solar.

Con ello se consigue aumentar la densidad de corriente de cortocircuito (J_{sc}) en aproximadamente un 6%, la tensión de circuito abierto en aproximadamente un 1% y la eficiencia final de la célula solar en aproximadamente un 1 – 2% absoluto.

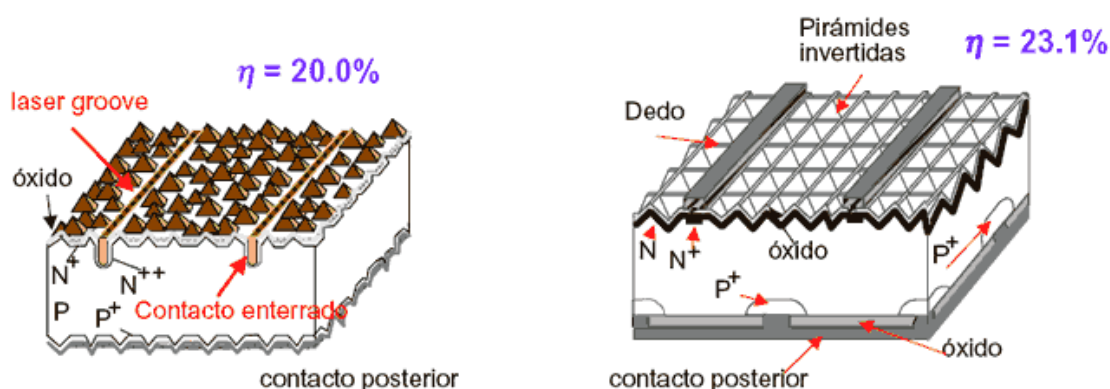
En la actualidad existen distintos tipos de texturados los cuales, de acuerdo con su complejidad, se realizan a nivel industrial y/o en laboratorios.

Figura Superficie de una oblea de silicio monocristalino tras la realización un texturado alcalino



Mecánicos: por fricción de la oblea contra una superficie con forma determinada En disolución acuosa: son los más comunes. Podemos distinguir entre texturados alcalinos, que son más o menos efectivos según sea la orientación cristalina de la oblea de silicio y dan lugar a pirámides en las superficies de las mismas, y texturados ácidos, los cuales son anisotrópicos (no dependen de la orientación cristalina del grano

donde se realiza el ataque) y que, por lo tanto, es más apropiado para ser utilizado con substratos de silicio multicristalino.



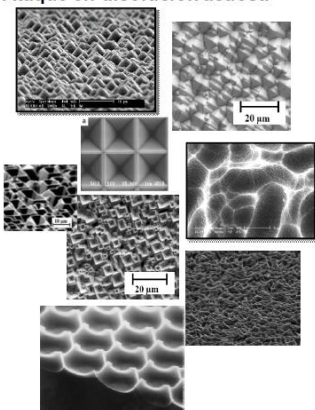
Mediante el bombardeo de la superficie con plasma.

En laboratorios también se utilizan técnicas de fotolitografía para obtener pirámides invertidas en la superficie de la oblea o granos esféricos que constituyen el llamado texturado de panel de abeja

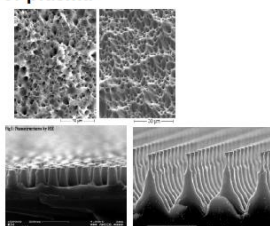
● Mecánicos



● Ataque en disolución acuosa



● Por plasma

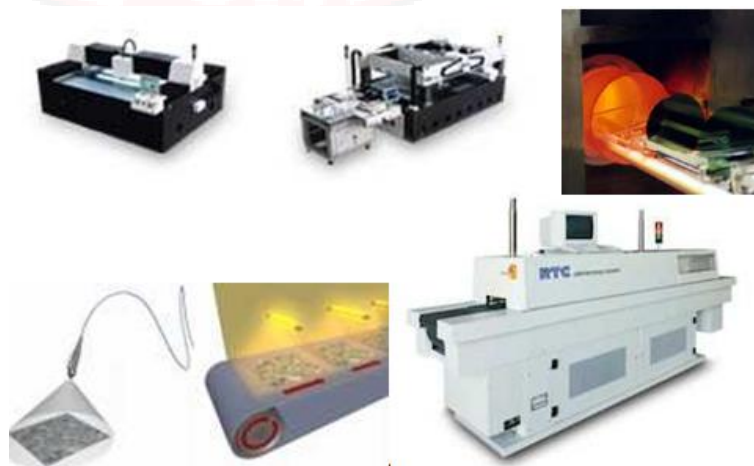


Fotografías de distintos tipos de texturado

4.2 formación de un unión PN

Posteriormente se procede a la **formación de un unión PN** mediante deposición de distintos materiales (compuestos de fósforo para las partes N y compuestos de boro para las partes P, aunque normalmente, las obleas ya están dopadas con boro), y su integración en la estructura del silicio cristalino.

Figura Distintas formas de obtener el emisor en una célula solar de silicio



En la actualidad, la gran mayoría de las células solares de silicio que se comercializan tienen una base tipo p (que actúa como terminal positivo) y un

emisor tipo n (que será el terminal negativo). Este emisor suele situarse en la cara frontal de la célula solar. Existen distintas técnicas para obtenerlo:

- Screen printing y Spin on: distribuyendo una pasta pseudo-líquida de fósforo mezclada con disolventes para facilitar la distribución y uniformización del dopante en la cara de la oblea donde es depositado.
- Spray on y Fog: el fósforo se deposita haciendo pasar las muestras por una atmósfera líquida rica en fósforo. Este fósforo se encuentra mezclado con disolventes, cuya función es la misma que la comentada en el caso anterior.
- En estos casos, tras quedar las muestras impregnadas en la solución que contiene el fósforo, estas pasan por un paso de horno a unos 300 °C para evaporar los disolventes mencionados con anterioridad. A continuación tiene lugar el paso de difusión propiamente dicho, en hornos en línea equipados con lámparas de infrarrojos. La temperatura de este paso suele estar en torno a los 800 °C.
- En este sentido, aparecen los denominados hornos "RTP" (rapid thermal processing), que realizan el proceso de difusión en poco tiempo y con una carga térmica baja. Las desventajas de este paso es que el emisor será muy superficial, aumentando las posibilidades de cortocircuitar la célula tras la metalización de dicha cara haciendo uso del método de screen printing. Además, se incrementan los defectos en la estructura cristalina del substrato debido a las altas rampas térmicas asociadas al proceso.
- Existen también los hornos de infrarrojos, que poseen la ventaja de que proporcionan emisores más profundos (ya que el proceso tiene una mayor carga térmica). Las rampas de temperatura son más suaves, por lo que no se afecta a la estructura cristalina del material.



En ambos casos, se utilizan hornos en línea, por lo que resulta fácil realizar su automatización. Como desventaja se tiene el riesgo de introducir impurezas procedentes de las lámparas de calentamiento y/o de la cinta metálica donde se transportan las muestras. Además, no permite el uso de fuentes de fósforo de alta pureza.

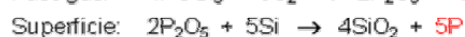
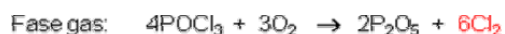
Otra forma de obtener el emisor de fósforo es a partir de hornos de tubo y de una fuente líquida de POCl_3 . En este proceso, con mayor carga térmica que los anteriores, se pueden programar las rampas de temperatura y afectar así mínimamente a la estructura cristalina de las muestras de silicio. Dentro del horno, estas quedan separadas de las resistencias por un tubo de cuarzo, reduciéndose la contaminación debida a factores externos al proceso de difusión propiamente dicho. Otra ventaja es que se pueden utilizar fuentes de fósforo de alta pureza. Además, gracias a que durante la disociación del POCl_3 se genera cloro,

se mantiene el interior del horno libre de impurezas metálicas. Como contrapartida, se trata de procesos de larga duración y más difíciles de automatizar que los vistos con anterioridad.

Vamos a tratar a continuación este último proceso, pues es el que da lugar a mejores eficiencias.

4.2.1 Difusión de fósforo a partir de una fuente líquida de POCl_3

Tal y como se ha comentado con anterioridad, la difusión tiene lugar en hornos de tubo y se utiliza POCl_3 como fuente de fósforo. A grandes rasgos, las reacciones que tienen lugar son:



Inicialmente, el oxígeno reacciona con la fuente de fósforo, dando lugar a pentaóxido de fósforo y a cloro (agente extractor de posibles impurezas metálicas presentes en el horno). Una vez en la superficie, el pentaóxido de fósforo reacciona con el silicio, dando lugar a óxido de silicio y a fósforo. Así tras este proceso tendremos:

Una capa tipo n (emisor) cuya profundidad es de unos $0,3 \mu\text{m}$ (la profundidad depende del dopado del sustrato y de la carga térmica asociada al proceso).

Una capa de óxido fino, de unos 80 nm , que será necesario eliminar.



Figura: Difusión de fósforo en un horno de tubo

Un punto muy importante es que durante el paso de difusión de fósforo se puede conseguir extraer impurezas del volumen (gettering), mejorando el tiempo de vida del volumen de la célula solar.

La técnica de la extracción de impurezas por fósforo consiste en la formación de una capa sumidero superficial n^+ , también denominado capa muerta. Dicha extracción se basa principalmente en dos mecanismos:

Segregación de impurezas contaminantes y difusión hacia la capa de fósforo superficial debido a un aumento de su solubilidad comparada con la que tienen en el volumen de silicio. Además, se reduce la difusión de impurezas una vez que se incorporan a dicha capa.

Inyección de autointersticiales que acompañan a la difusión del fósforo, los cuales desplazan a impurezas sustitucionales hacia posiciones intersticiales, desde las que se difunden hacia la capa sumidero superficial con mayor rapidez.

4.2.2 Emisores selectivos

Una mejora importante consiste en utilizar emisores selectivos. Esta técnica ya ha sido utilizada en la célula record del mundo, así como en líneas de fabricación de células de alta eficiencia.

La tecnología actual de P/Al utilizada en muchas empresas posee las siguientes limitaciones relacionadas con el emisor: utilizando la técnica de metalización por screen-printed, las células requieren de un alto dopado del emisor (zona n++) para conseguir un buen contacto. Esto repercute en la absorción de la luz con longitudes de onda bajas (ultra- violeta) y en una superficie difícil de pasivar (con velocidades de recombinación superficiales superiores a los 10000 cm/s). Este tema cobra cada vez más importancia a medida que se trabaja con sustratos más delgados, lo cual es la tendencia en la actualidad.



Tratando de paliar este problema se está introduciendo el llamado “emisor selectivo”. Consiste en disponer de una capa de fósforo muy dopada solo en la zona situada bajo los contactos ($5 - 10 \Omega/\square$) con la que se tendrá una baja resistencia serie, mientras que para el resto de la superficie se tiene un emisor poco dopado ($100 - 150 \Omega/\square$) consiguiendo así disminuir la velocidad de recombinación superficial

4.2.3 Pasivación superficial

En el proceso estándar utilizado a nivel industrial, el siguiente paso consiste en el depósito de una capa pasivadora y antirreflectante.

La superficie del semiconductor presenta numerosos defectos causados por la interrupción de la periodicidad de la red cristalina, lo que hace que aparezcan enlaces insaturados, que son centros de recombinación. Esta recombinación cobra cada vez más importancia a medida que se utilizan sustratos más delgados y con mayor tiempo de vida. Presenta un notable impacto en la corriente de cortocircuito y en la tensión de circuito abierto. Por ello, uno de los aspectos relevantes a la hora de conseguir altas eficiencias de conversión en los dispositivos fotovoltaicos es la reducción de la velocidad de recombinación Superficial

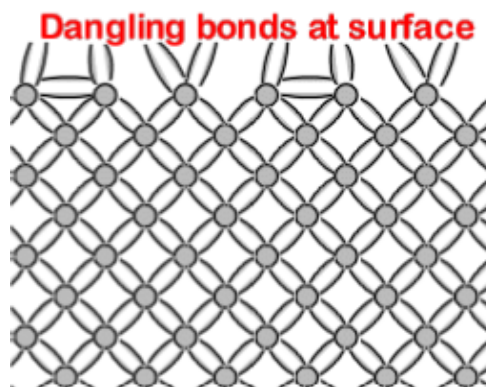
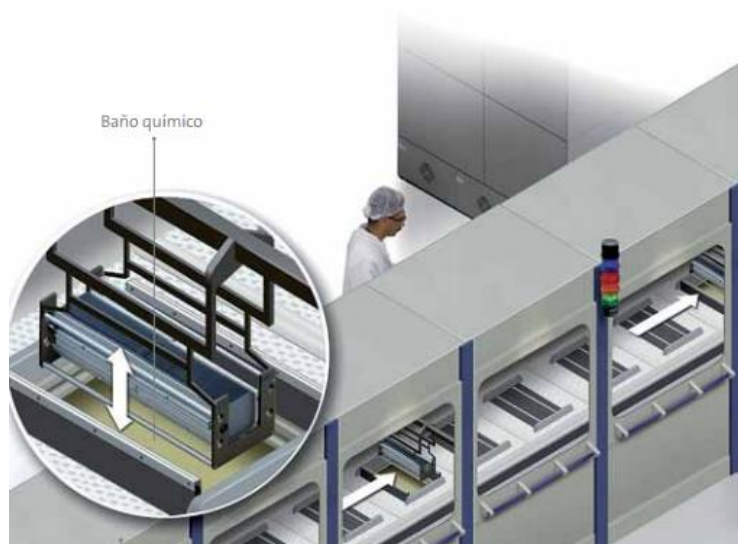


Figura Red cristalina y enlaces superficiales insaturados.

Para reducir el número de enlaces insaturados se crecen o depositan unas capas en la superficie con las que se consiguen cerrar dichos enlaces. A la reducción del número de enlaces insaturados se denomina pasivación.

Históricamente, en los laboratorios se han utilizado capas de óxido de silicio (SiO_2) para realizar la pasivación del emisor de las células solares de silicio, dando lugar a



velocidades de recombinación superficiales inferiores a los 10 cm/s en obleas de silicio tipo p de alta calidad. Así se han obtenido células con altas eficiencias, destacando la que a día de hoy es record del mundo, con un 24,7% de eficiencia.

Como contrapartida este proceso requiere de pasos de horno con una alta carga térmica asociada, lo que conlleva a una degradación del tiempo de vida del volumen, principalmente si las muestras son de baja calidad, así como un alto coste

asociado al proceso ($T > 850\text{ }^{\circ}\text{C}$; tiempo > 30 minutos).

Con el fin de dar solución a este problema se han realizado numerosos estudios para conseguir capas que pasiven bien las superficies de las muestras de silicio mediante procesos de corta duración y a baja temperatura. Excelentes resultados se han conseguido mediante el depósito de capas de nitruro de silicio (SiN_x). Se caracterizan porque:

- Se trata de procesos con una baja carga térmica asociada.
- Las capas se pueden utilizar como antirreflectantes: variando las características de los procesos podemos conseguir índices de refracción entre 1,8 y 3,0 y distintos espesores, lo que nos permite optimizar capas tanto para células encapsuladas como no encapsuladas.
- Dan lugar a buenas pasivaciones superficiales, con velocidades de recombinación superficiales inferiores a 10 cm/s en muestras de silicio tipo p de alta calidad.

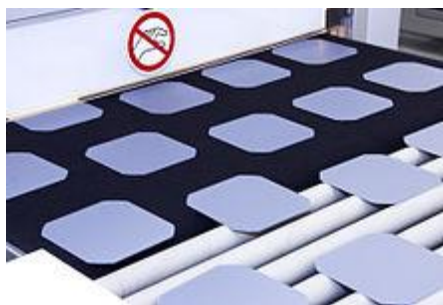
Por su contenido en hidrógeno, las capas pueden pasivar el volumen de las células solares tras un paso de "firing" (recocido). Esto es muy importante principalmente en muestras de silicio multicristalino, ya que consigue disminuir los centros de recombinación presentes en las fronteras de grano y en las dislocaciones.

Por otro lado, este proceso también presenta algunos inconvenientes:

Se utiliza gas silano, que es tremendamente tóxico y pirofórico (arde en contacto con el aire).

Las capas con índice de refracción mayor que 2,2 presentan absorción de la luz ultravioleta, lo que puede ocasionar pérdidas de corriente en las células solares.

Utilizando sistemas de depósito similares a los de las capas de nitruro de silicio, pero cambiando los gases empleados durante el proceso, otra capa de interés es la de carburo de silicio. Por sus características, está especialmente indicada para pasivar sustratos tipo p. Por ello, y aún en laboratorios, se utiliza para pasivar la cara trasera de las células solares realizadas con dicho tipo de sustrato. Se han publicado velocidades de recombinación superficial inferiores a los 5 cm/s. Además, sus características son estables tras los pasos de horno.



Otra forma de pasivar las superficies de las células solares es depositando capas de silicio amorfo ($\alpha\text{-Si:H}$). Este proceso también tiene una baja carga térmica asociada. Se utiliza en las denominadas células HIT (Hetero-junction with Intrinsic Thin layer), alcanzándose eficiencias de conversión del orden del 21,5% en laboratorios y del 19,5% en producción industrial. Por el contrario, estas capas son poco estables térmicamente.

Con independencia del tipo de capa que se utilice para realizar la pasivación del emisor, es importante conocer el dopado del mismo. Este se relaciona con la resistencia de capa del emisor, de forma que una menor resistencia de capa está asociada con un mayor dopado y viceversa. Un mayor dopado también suele implicar emisores más profundos. En esta capa tiene lugar una pequeña absorción de la luz incidente, por lo que la corriente fotogenerada será inferior. Además, tal y como se presenta en la figura 30, un emisor más dopado lleva asociado mayores velocidades de recombinación superficiales. A modo de ejemplo, para un dopado en la superficie de 10^{20} cm^{-3} ($\approx 40 \Omega/\square$), tendremos una velocidad de recombinación superficial superior a los 10000 cm/s. Con un dopado de emisor de entorno a 10^{19} cm^{-3} ($\approx 65 \Omega/\square$), la velocidad de recombinación superficial disminuye aproximadamente en un orden de magnitud.

Como nota también cabe destacar que, en pruebas realizadas en la fábrica variando únicamente las características de la capa pasivadora, podemos conseguir mejorar la clasificación de las células solares en al menos una clase. Por lo tanto, queda demostrada la importancia de tener células solares bien pasivadas. Este efecto aumenta a medida que se utilizan sustratos más delgados, por el hecho de que hay más portadores minoritarios que llegan a la superficie.

4.3 Capa antirreflectante

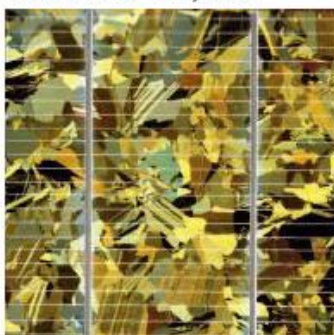
La oblea de silicio, inicialmente, posee una reflectividad media en torno al 30%, lo que supone que aproximadamente 1/3 de la luz que llega a la superficie no podrá ser aprovechada. Tras el comentado paso de texturado, a nivel industrial, dicha reflectividad disminuye hasta valores del 12% aproximadamente, lo que supone una mejora importante de cara a las características eléctricas de la célula solar. Tratando de disminuir la reflectividad (hasta valores inferiores al 3%, ponderado con el espectro AM 1,5G), y con ello incrementar aún más la densidad de corriente de cortocircuito, lo que se asocia a un aumento de la potencia de las células solares, se realiza el depósito sobre la cara frontal una capa antirreflectante (AR). Para hacernos una idea de en qué se traduce la mejora

introducida, en condiciones óptimas, con una capa AR sencilla se puede aumentar la mencionada densidad de corriente de una célula solar de silicio hasta en un 42%

verde: 11,8%

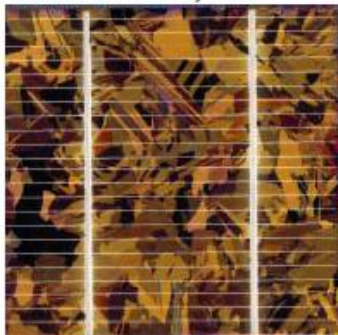


dorado: 12,0%

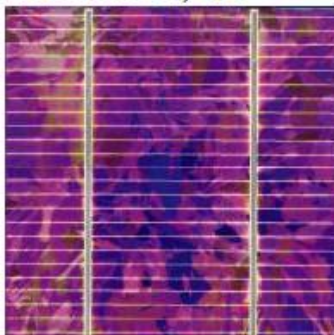


La capa de grosor determina el comportamiento del fenómeno de reflexión y el color

marrón: 12,5%



violeta: 13,2%



sin AR: 13,2%



La capa AR debe poseer un índice de refracción tal que haga mínima las pérdidas de luz por reflexión. Para ello, debe estar acoplado entre el índice del silicio y el del aire. En una célula no encapsulada y con una capa antirreflectante sencilla, el índice de refracción óptimo está en torno a 1,94. En cambio, si la célula va a estar encapsulada, cosa que sucede a nivel industrial, el índice necesario para disminuir las pérdidas por reflectividad se sitúa en torno a 2,1, ya que estará cubierta por una lámina de vidrio, cuyo índice de refracción es de 1,45.

Existe una relación entre el índice de refracción (n), el espesor (d) y la longitud de onda para la cual se tiene el mínimo de reflectividad (λ_m) de la capa depositada:

$$n \cdot d = \lambda_m / 4$$

En las células solares, se intenta que el mínimo de la reflectividad esté para una longitud de onda de 600 nm ya que, tal y como se muestra en la figura 32, para ella el espectro del sol posee un flujo de fotones máximo. Por lo tanto, sustituyendo en la ecuación anterior, el espesor de la capa deberá estar en torno a los 78 nm si la célula no va a ser encapsulada, y de 72 nm si es industrial

En los laboratorios, tratando de disminuir aún más la reflectividad de la célula solar, se depositan capas AR dobles e incluso triples. En la siguiente tabla se muestra el aumento



que se puede experimentar en la densidad de corriente por el uso de estas múltiples capas AR.

Capa AR	Incremento en la J_{sc} (mA/cm ²)
Sencilla	10,7
Doble	+ 2,3
Triple	+ 0,6

Tabla: Incremento en la densidad de corriente de cortocircuito en función del número de capas AR utilizadas.

Por lo tanto, atendiendo a los datos de la tabla III, el pequeño aumento en la densidad de corriente asociado al uso de capas AR múltiples hace que, a día de hoy, estas no sean utilizadas a nivel industrial.

En la actualidad, por sus propiedades y su versatilidad, a nivel industrial se utilizan principalmente capas de nitruro de silicio a modo de pasivadoras y antirreflectantes, ya que variando su composición podemos obtener el índice de refracción deseado. Asimismo, variando la duración del proceso de depósito tendremos el espesor óptimo.

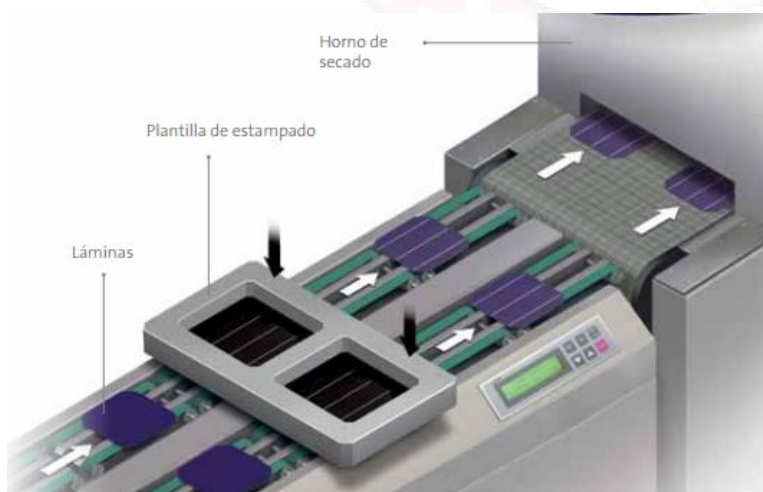
4.4 Metalización

Necesitamos unos contactos por donde extraer los portadores minoritarios generados. Esto se realiza a través de unas mallas de metalización situadas en la cara posterior y/o frontal de la célula solar

4.4.1 Contacto frontal

A la hora de diseñar el contacto frontal se requiere principalmente que posea una baja resistencia con el emisor, una baja resistencia del contacto, un bajo factor de sombra (hay que llegar a un compromiso entre el número de dedos y la sombra ocasionada por los mismos: mayor número de dedos implica una menor resistencia de contacto, pero un mayor factor de sombra; por otro lado, una malla con pocos dedos tendría asociada una resistencia serie elevada y un bajo factor de sombra), y que permita ser soldada

para facilitar su posterior interconexión con otras células dentro del módulo.



A nivel industrial, los contactos se obtienen principalmente con técnicas de serigrafía (screen printing). En ellas se hace uso de pastas líquidas que contienen plata junto a disolventes. Esta pasta se sitúa sobre una pantalla y cae sobre la célula a través de unos huecos definidos en la misma. Una vez dibujada la malla de metalización,

la célula pasa a un horno de secado en el que los disolventes se evaporan de la superficie. La temperatura utilizada para ello es de unos 300 °C

Frente a la facilidad de su integración en la línea de producción a nivel industrial, la metalización frontal por serigrafía tiene las siguientes desventajas:

- Resistencia de contacto alta (debido a la presencia de elementos no metálicos).
- Baja relación de aspecto (alto factor de sombra: La anchura de los dedos obtenidos con esta técnica se sitúa entre las 80 y las 120 μm).
- Impone un alto dopaje en el emisor (lo que conlleva, según se ha visto, a una mayor recombinación en la superficie así como a una menor respuesta ante la luz ultravioleta).

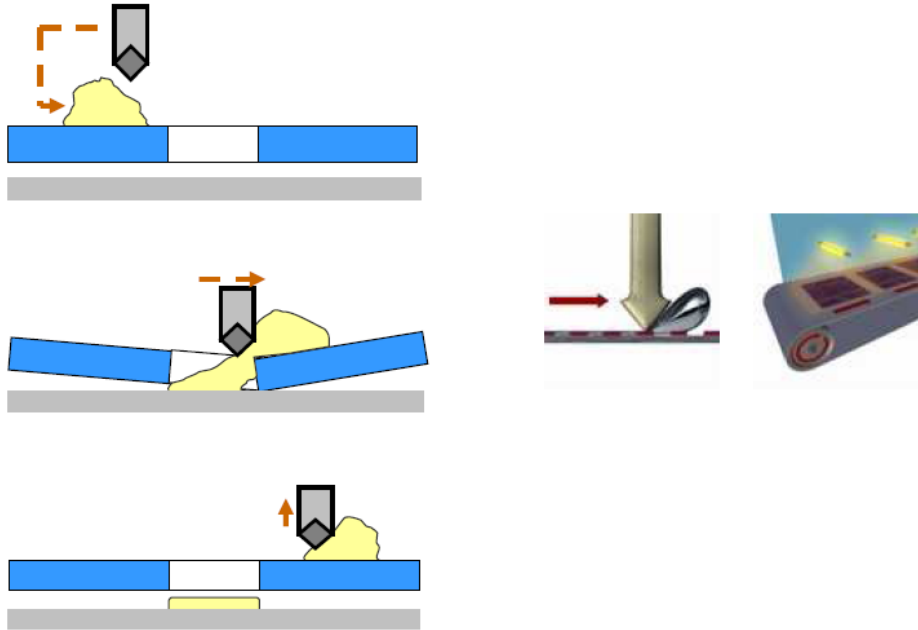


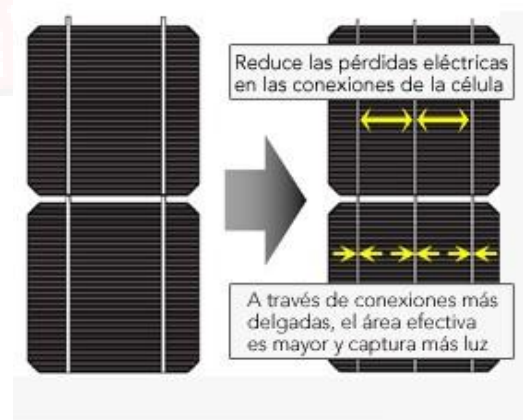
Figura: Definición de los contactos. Proceso serigráfico

4.4.2 Contacto posterior

Al igual que el frontal, el contacto posterior también se realiza a nivel industrial principalmente mediante un proceso serigráfico. En este caso se utiliza una pasta de aluminio, ya que la plata no hace un buen contacto óhmico con el silicio del sustrato (tipo p). Además, esta capa de aluminio posee otras ventajas que detallaremos más adelante. Los buses a través de los cuales se contactarán unas células con otras se realizan con una pasta de plata, ya que este metal permite ser soldado fácilmente.

4.4.3 Recocido

Tras el secado de ambas pastas por separado, se procede a realizar un paso de recocido (firing) para que el metal del contacto frontal atraviese la capa AR y haga un buen contacto con el emisor. Hay que tener cuidado para que el contacto no llegue a la base, pues en este caso tendríamos la célula cortocircuitada. Además, durante este



paso el metal de la parte trasera profundiza y realiza un buen contacto con la base. La figura muestra esquemáticamente este proceso

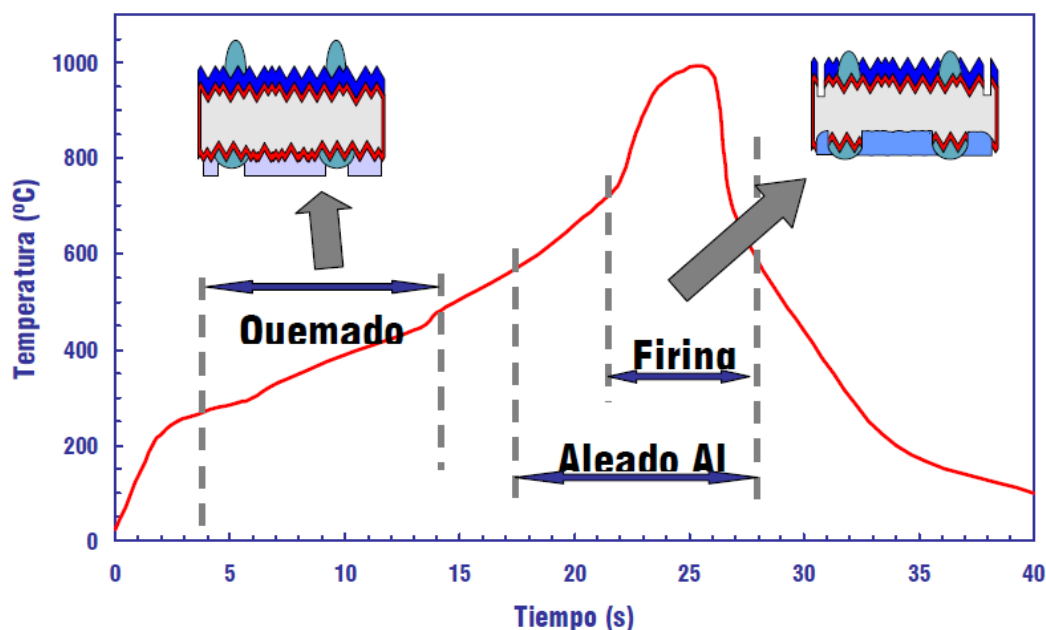


Figura: Recocido (firing) del contacto metálico.

4.4.4 Efecto del aluminio en la cara trasera de la célula solar

La capa de aluminio en la cara trasera de una célula solar, tras un paso de recocido, además de mejorar el contacto óhmico posee las siguientes ventajas:

Realiza la extracción efectiva de impurezas metálicas presentes en el volumen. Estas tienden a difundirse hacia la capa de aluminio/silicio líquida que se forma para temperaturas superiores a los 577 °C. La eficiencia de este paso depende del tipo de impurezas presentes, de la temperatura y duración del proceso y del espesor de la capa de aluminio utilizada.

Disminuye la recombinación en la cara trasera de la célula solar mediante un campo eléctrico repulsivo de los portadores minoritarios de la base (en inglés back surface field, BSF).

En el lado negativo tenemos que esta capa de aluminio, dependiendo de su espesor, puede producir un arqueo (bowing) de la célula solar, pudiendo llegar a fracturarla si se trabaja con células muy delgadas

4.4.5 Otras formas de obtener los contactos

Aunque la forma comentada es la más extendida a nivel industrial, existen más métodos para realizar la metalización de las células solares.

En laboratorios, haciendo uso de técnicas fotolitográficas, los contactos se obtienen mediante la evaporación en alto vacío de metales de alta pureza (titanio, paladio, aluminio y plata). Así se consiguen dedos cuya anchura se sitúa en torno a las 15 µm en la cara frontal, disminuyéndose el factor de sombra y la resistencia serie, y un control preciso

del espesor de aluminio en la cara trasera, evitando los efectos negativos del arqueo ya comentados.

A nivel industrial, existe otra técnica de metalización que está dando lugar a mayores eficiencias en las células solares. Se trata de la tecnología de contactos enterrados (LGBG: Laser-Grooved Buried-Grid).

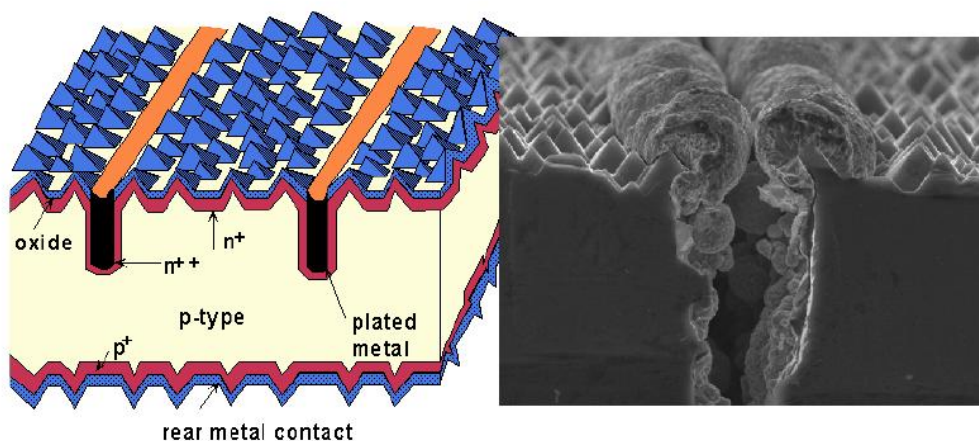


Figura Sección de una célula con contactos enterrados. A la derecha podemos ver un dedo de la malla de metalización frontal.

El contacto de plata "se entierra" en un surco abierto por un láser. Así, con esta técnica se superan muchos de los problemas encontrados con el contacto serigráfico:

Menores pérdidas por sombra al tratarse de dedos más finos. Resistencia serie menores, ya que el grueso del metal se sitúa en el surco abierto por el láser.

Optimización independiente del dopaje de emisor bajo el metal y bajo la zona iluminada, ya que al ser los dedos más finos y estar más próximos unos de otros, hacen que se reduzcan las pérdidas asociadas a la resistencia presente en el emisor.

4.5 Aislamiento de bordes

El siguiente paso consiste en realizar un aislamiento entre el emisor y el sustrato, evitando así posibles cortocircuitos en la célula solar. Para ello, y a nivel industrial, existen principalmente dos técnicas:

- Aislamiento con plasma: las primeras micras de los bordes de las células solares son eliminadas mediante un ataque con plasma. En este caso, el aislamiento se realiza tras el paso de difusión de fósforo
- Aislamiento con láser: definiendo un surco paralelo al borde de la cara frontal de la célula solar. Su profundidad ha de ser mayor que la del emisor.

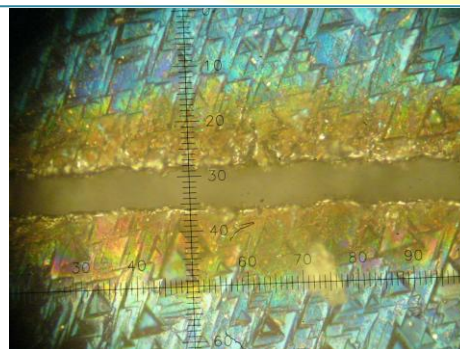
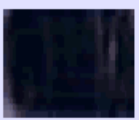


Figura: Aislamiento de bordes. Izquierda: plasma; Derecha: láser.

Una vez concluidos los procesos sobre la célula, se procede a su comprobación, previamente a su encapsulado, interconexión y montaje en los módulos.

CÉLULAS		RENDIMIENTO LABORATORIO	RENDIMIENTO DIRECTO	CARACTERÍSTICAS	FABRICACIÓN
	MONOCRISTALINO	24 %	15 - 18 %	Es típico los azules homogéneos y la conexión de las células individuales entre sí (Czochralsky).	Se obtiene de silicio puro fundido y dopado con boro.
	POLICRISTALINO	19 - 20 %	12 - 14 %	La superficie está estructurada en cristales y contiene distintos tonos azules.	Igual que el del monocristalino, pero se disminuye el número de fases de cristalización.
	AMORFO	16 %	< 10 %	Tiene un color homogéneo (marrón), pero no existe conexión visible entre las células.	Tiene la ventaja de depositarse en forma de lámina delgada y sobre un sustrato como vidrio o plástico.

En cuanto a la eficiencia de las diferentes tecnologías fotovoltaicas se pueden indicar ciertos valores aproximados. Para el caso del Silicio monocristalino ésta se sitúa en, aproximadamente entre un 16 y un 25% mientras que en el policristalino actualmente es del 12-13% siendo posible que se eleve a corto plazo en un nivel similar al alcanzado ya para el monocristalino.

5 MODULO FOTOVOLTAICO (FV)

Una célula solar típica posee en la actualidad una superficie de 243 centímetros cuadrados y produce aproximadamente una potencia cercana a los 4 vatios y una intensidad de entre 7 y 8 amperios. El escaso valor de la tensión y la potencia hace necesaria la conexión de varias células en serie. Para ello, se suelda el conector superior (negativo) de una célula con el conector inferior (positivo) de la siguiente. Entre las células individuales se introduce un pequeño espacio de unos 2mm, tal como muestra la figura.

La mayor parte de los módulos o paneles fotovoltaicos posee entre 36 y 96 células conectadas en serie para aumentar su tensión hasta los 12V o 24V (tensiones más utilizadas) y estas uniones en serie conectarlas en paralelo para aumentar la intensidad del panel fotovoltaico.

Para asegurar un proceso de carga óptimo se empleaba una asociación en serie de entre 36 y 40 células, que proporcionaba una tensión de salida de 17 voltios. En la actualidad, los módulos estándar llegan a entregar una potencia de hasta 300 vatios, con unos valores de tensión que rondan habitualmente los 30 voltios en el punto de máxima potencia.



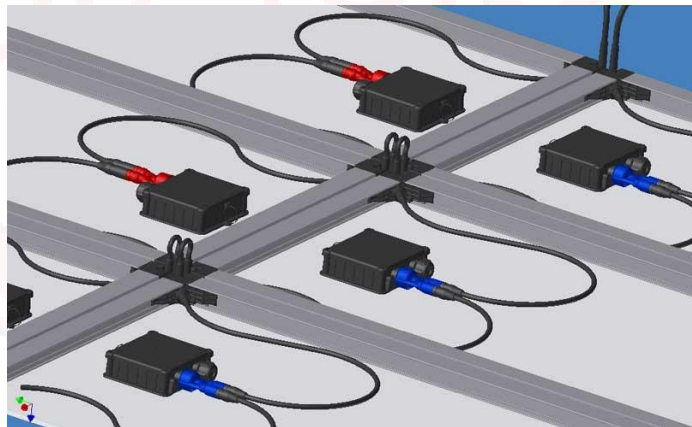
Una vez realizadas estas uniones mediante soldaduras especiales, se encapsula toda la superficie captadora mediante una estructura tipo "sandwich" formada por:

Cubierta frontal. Fabricada con vidrio templado y con un grosor de tres o cuatro milímetros, debe ser buen trasmisor de la radiación solar y proteger contra los agentes atmosféricos. La superficie exterior de esta cubierta es antirreflexiva y antiadherente.

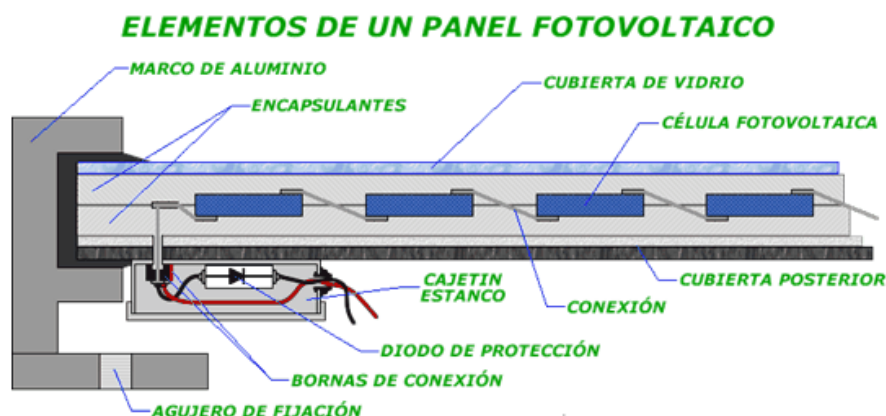
Encapsulado. Para proporcionar solidez a las células, estas se insertan en un material transparente que las aísla eléctricamente. Se emplean cuatro métodos de encapsulado: el de etileno vinil acetato (EVA), el de butil de polivinilo (PVB), el de teflón y el de resina. El encapsulado debe permitir – al igual que la cubierta frontal – la transmisión de la radiación solar y no degradarse con la luz ultravioleta.

Cubierta posterior. Suele estar fabricada con polifluoruro de vinilo (PVF) o poliéster. Al igual que la cubierta frontal, sirve para proteger al módulo frente a los agentes atmosféricos y para aislarlo eléctricamente.

Marco. Fabricado en aluminio anodizado por la mayor parte de fabricantes, sirve para proporcionar rigidez y resistencia al módulo, proporcionando además un sistema de fijación. En la actualidad hay muchos modelos de paneles que no poseen marco, principalmente los de capa fina.



Conexiones. Se sitúan en la parte posterior del módulo, en una caja que los protege del polvo. Estas cajas deben tener como mínimo una protección IP 54. En el momento del montaje, se debe evitar totalmente que entre agua en la caja, lo que se logra mediante el uso de prensaestopas. En la actualidad, lo más común es que los módulos, como los que muestra la fotografía de la derecha, vengán provistos con cables y conectores, diferentes para cada polo, para hacer la instalación más fácil y rápida. De este modo, la conexión entre los módulos se puede efectuar de forma directa.



El último proceso en la formación del panel fotovoltaico es el sellado al vacío en un horno para conseguir estanqueidad.

En función del tipo de células de silicio que utilizan los paneles se pueden clasificar en monocristalinos, policristalinos y amorfos (veremos más adelante que ya se están comercializando nuevos paneles con materiales distintos al silicio). El número de células suele oscilar entre las 30 y 36 y la superficie de captación varía entre 0,1 y 2 m².

6 GENERACIONES DE CELDAS FOTOVOLTAICAS

6.1 Primera Generación:

Consistían en una gran superficie de cristal simple. Una capa de unión P-N (similar a un diodo), capaces de generar energía eléctrica a partir de energía luminosa proveniente del sol. Se fabrican mediante un proceso de difusión con obleas de silicio, es por esto que también se lo conoce como celdas solares basadas en oblea.

Corresponde a la tecnología que predomina en el mercado actual, abarcando aproximadamente el 86% del total de paneles fotovoltaicos.

6.1.1 Silicio Monocristalino:

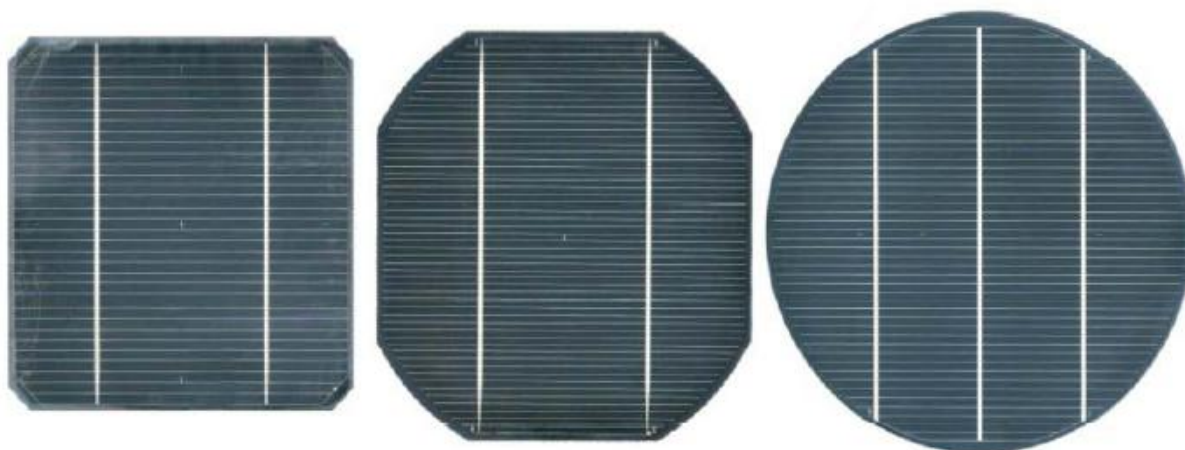
Estas celdas están fabricadas en base a láminas de un único cristal de muy alta pureza y estructura cristalina casi perfecta. El espesor aproximado de las láminas es de 1/3 a 1/2 milímetro, las cuales son cortadas de una gran barra o lingote.

Foto Aspecto del Panel Solar de Silicio Monocristalino

La eficiencia de estas celdas ha llegado hasta el 24,7% en laboratorio y a un 16% en paneles comerciales. Los paneles contruidos con este tipo de tecnología son los más desarrollados del mercado, siendo garantizados por algunos fabricantes por hasta 25 años.

A continuación se muestran unas imágenes y características de las celdas solares de silicio monocristalino





Eficiencia:	15 -18%
Forma:	redonda, semi-cuadrada, cuadrada
Tamaño en cm x cm:	d=10; 12,5; 15; mayormente (10x10) cm ² ó (12,5x12,5) cm ²
Grosor:	de 0,14 hasta 0,3 mm
Estructura:	homogénea
Color:	azul oscuro hasta negro

6.1.2 Silicio Policristalino:

Las láminas policristalinas son fabricadas a través de un proceso de moldeo, para esto se funde el silicio y luego se vierte sobre moldes. Una vez que el material se ha secado, se corta en delgadas láminas. El proceso de moldeo es menos costoso de producir que el silicio monocristalino, pero son menos eficientes, debido a que el proceso deja imperfecciones en la superficie de la lámina. La eficiencia de conversión alcanza valores alrededor del 19,8% en laboratorio y de 14% en paneles comerciales. En la Figura 3.3.7 se puede apreciar un panel de estas características.



Las características del silicio cristalizado, hacen que los paneles de silicio policristalino posean un grosor considerable. Empleando silicio con otros materiales semiconductores, es posible obtener paneles más finos e incluso flexibles.

Figura Panel Solar de Silicio Policristalino

A continuación se muestran unas imágenes y características de las celdas solares de silicio policristalino

Obleas („wafer“) ..



... con AR



... con AR y contactos



Eficiencia: 13 -16%

Forma: redonda, semi-cuadrada, cuadrada

Tamaño : d=10; 12,5; 15; 20 cm; mayormente (12,5x12,5); (15,6x15,6); (20x20) cm²

Grosor: de 0,14 bis 0,3 mm

Estructura: de flor de escarcha

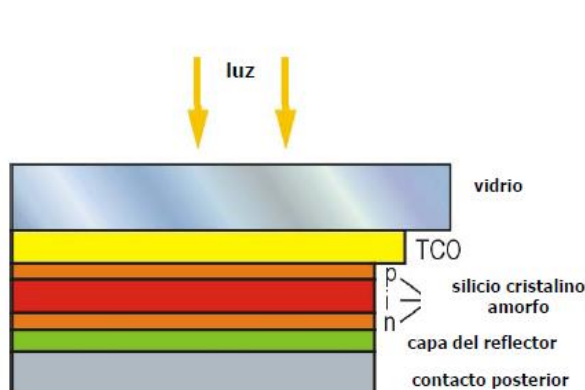
Color: azul (con AR), gris plata (sin AR)

6.1.3 Silicio Amorfo:

Las células fotovoltaicas de silicio amorfo son una de las tecnologías más mejoradas dentro de la tecnología fotovoltaica. El punto más importante que podemos destacar en ellas es el aprovechamiento que se hace del silicio durante su diseño. Con las placas monocristalinas, compuestas por un cristal entero, y policristalinas, compuestas por varios cristales pequeños, por lo general durante su confección se pierde casi la mitad del silicio en forma de polvo al cortar las placas, lo cual no ocurre con las células fotovoltaicas de silicio amorfo.

La tecnología de silicio amorfo consiste en una tecnología de lámina delgada que es creada depositando silicio sobre un sustrato de vidrio de un gas reactivo, como por ejemplo puede ser el silano (SiH₄). Podemos agrupar a las células fotovoltaicas de silicio amorfo dentro de las tecnologías de lámina delgada. Este tipo de célula solar es posible de ser aplicada como película a sustratos de bajo costo como el cristal o el plástico.

Lógicamente aquí será como si imprimiésemos los paneles solares, pudiendo adaptarlos a superficies económicas. Una de las principales consecuencias que se desprenden de esto es que los costos de los paneles solares tendrían que bajar. Lógicamente que un contenedor del panel que sea de plástico será mucho más barato que hacer un panel solar tradicional, sin embargo en la realidad los precios de las células fotovoltaicas de silicio amorfo realmente no se reducen mucho. ¿Por qué es esto?



Eficiencia del panel: 4 hasta 6 %

La tecnología de fabricación ha cambiado rápidamente, lo que ha generado un aumento de su eficiencia, llegando a valores entre 5 y 10% para paneles comerciales y de 13% en laboratorios. Existen tecnologías de lámina delgada que incluyen láminas de silicio multicristalino, seleniuro de cobre e indio/sulfuro de cadmio, telurio de cadmio/sulfuro del cadmio y arseniuro de galio. Este tipo de tecnología ofrece una serie de ventajas como: deposición y un ensamblado más fácil, la capacidad de ser depositadas en sustratos o materiales de construcción baratos, los que incluso pueden ser flexibles, producción en masa, y conveniencia para grandes aplicaciones. Sus costos son inferiores a las dos tecnologías anteriores.

6.2 Segunda Generación:

Se basan en el uso de depósitos epitaxiales muy delgados de semiconductores sobre obleas con concentradores. Existen dos clases de celdas fotovoltaicas epitaxiales: las espaciales y las terrestres. Las celdas espaciales, generalmente poseen eficiencias AM0 (Air Mass Zero) más altas, cercanas al 28 o 30%, aunque su costo por Watt más alto. En las terrestres en cambio, la película delgada se ha desarrollado usando procesos de bajo costo, pero su eficiencia AM0 es menor que la anterior, alcanzando valores en 7 y 9%.

La tecnología de celdas solares de película delgada considera un ahorro notable en los costos de producción, que junto a su reducida masa, apropiada para aplicaciones sobre materiales flexibles y livianos, incluso en materiales de origen textil, representan grandes ventajas de la tecnología.

La aparición de paneles de película delgada de Ga y As para aplicaciones espaciales, con eficiencia AM0 sobre el 37%, se encuentran en estado de desarrollo para aplicaciones de elevada potencia. Esta tecnología representa un pequeño segmento del mercado fotovoltaico terrestre, siendo aproximadamente un 90% del mercado espacial.

6.3 Tercera Generación:

Propuesta desde el año 2007, representa una tecnología muy diferente a las dos anteriores, ya no utiliza la unión P-N. Para aplicaciones espaciales se estudian dispositivos de huecos cuánticos y dispositivos que incorporen nanotubos de carbono, los que pueden alcanzar una eficiencia AM0 superior al 45%. En cambio para aplicaciones terrestres, se están

investigando dispositivos que incluyan celdas electroquímicas, polímeros, nanocristales y tintas sensibilizadas, de las cuales ya es posible ver algunos modelos

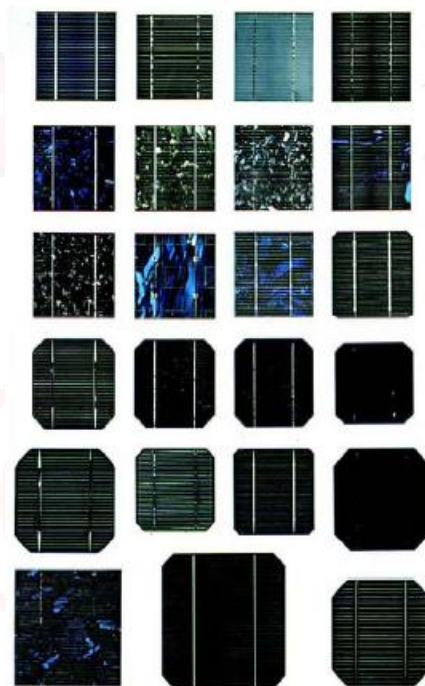
Una célula fotovoltaica de tercera generación es una célula solar que es potencialmente capaz de superar el límite de Shockley–Queisser de eficiencia energética del 31-41% para células solares individuales de banda prohibida.

Los sistemas de tercera generación comunes incluyen células hechas de múltiples capas ("tándem") de silicio amorfo o arseniuro de galio, mientras que los desarrollos más teóricos incluyen la conversión de frecuencia, efectos de portadora caliente y otras eyecciones de portadora múltiple.

6.4 Cuarta Generación:

La siguiente generación de células solares está basada en inorgánica-en-orgánica ofrecen una eficiencia de conversión de energía mejorada respecto a las actuales células solares de tercera generación (3Gen), a la vez que incrementan su base de bajo costo. Combinan - dentro de una misma capa- el bajo costo y flexibilidad de las películas poliméricas conductoras (orgánicas) con la estabilidad de tiempo de vida de las nanoestructuras (inorgánica) y aprovechando las propiedades de estos nuevos materiales activos híbridos (orgánico/inorgánico) para el rendimiento más allá de los dispositivos 3Gen

Si bien es cierto no es una tecnología desarrollada, se estima que esta generación consistiría en una mezcla de nanopartículas con polímeros para formar una capa simple multiespectral. Luego se monta una capa sobre otra para fabricar celdas solares multiespectrales definitivas. Este tipo de celdas serán más eficientes y baratas.

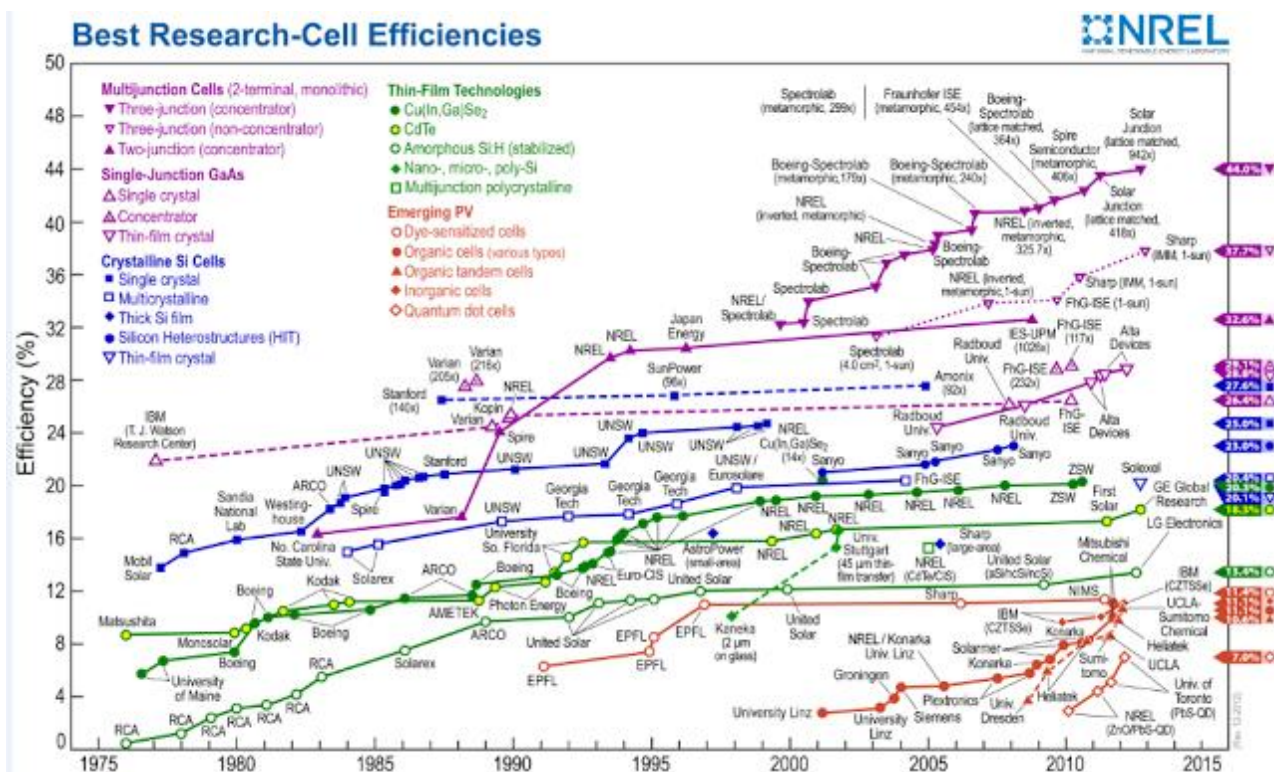


La NASA ha utilizado la idea junto a la tecnología multiunión para sus misiones a Marte. Dentro de esta celda solar compuesta, la primera capa convierte los diferentes tipos de luz, la segunda es para la conversión de energía y la última capa es para el espectro infrarrojo, la cual permite utilizar parte del calor para generar energía aprovechable. La DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) es la encargada de dirigir y supervisar la investigación que busca determinar la viabilidad de esta tecnología. Xsunx, Konarka Technologies, Inc., Nanosolar, Dyesol y Nanosys, son algunas de las compañías que trabajan en el proyecto.

Según un estudio del MIT (Instituto de Tecnología de Massachusetts) se afirma que se está desarrollando la tecnología para conseguir placas a un coste de $0,52\$/W_p = 0,39\ €/W_p$, esto haría que la generación fotovoltaica, en determinadas zonas de los USA, sería competitivo con la generación eléctrica usando carbón o "shale gas", incluso sin captura de CO_2 , y por supuesto aún más rentable en el caso de Europa, pues los precios de los combustibles fósiles son más altos que en USA.

Quizás en la actualidad, parte del efecto de la bajada del precio de las placas solares FV no es sólo debido a las mejoras en eficiencia, de tecnología y a la economía de escala, sino que hay un exceso de oferta de las mismas respecto a la demanda, no obstante la tendencia parece que va a seguir a la baja y no se espera, que haya una subida del precio de las mismas, ya que se trata de un mercado maduro, con muchos participantes y que no se deja de invertir en nuevos desarrollos tecnológicos que lo hacen aún más interesante.

En la siguiente figura se puede ver la evolución de la eficacia energética de las placas; se aprecia la misma tendencia creciente de sus rendimiento por unidad de radiación solar incidente. Fuente: National Renewable Energy Laboratory.



En la actualidad existen células fotoeléctricas de laboratorio que llegan al 44 % de eficiencia, aunque de momento y debido a su coste prohibitivo, no son las que están actualmente en uso de forma generalizada, cuya eficiencia están en el entorno del 11%-17%, no obstante los desarrollos continúan, tanto del lado del abaratamiento del coste como en el de la mejora de la eficiencia de las mismas.

Así pues el desarrollo y la mejora, tanto de la eficiencia como de los costes, de las células fotovoltaicas, no va a dejar de mejorar en los próximos años, y forma parte de la adaptación necesaria de nuestra sociedad a un futuro de mucho menor consumo de combustibles fósiles, tanto por su progresivo agotamiento y precio cada vez más elevado, como por que es imprescindible bajar las emisiones de CO₂ si queremos evitar una catástrofe climática a escala global.

6.5 Otras Tecnologías de Fabricación de celdas fotovoltaicas

6.5.1 Paneles Tándem:

Estos combinan dos tipos de materiales semiconductores distintos. Esto se debe a que cada tipo de material trabaja en una parte del espectro electromagnético de la radiación solar y con la utilización de dos o tres tipos de materiales se pueden aprovechar desde la radiación ultravioleta a las ondas visibles e infrarrojas del espectro. Con este tipo de paneles se ha alcanzado rendimientos del 35% y en teoría, con la unión de tres se podría alcanzar un 50% de rendimiento.

6.5.2 Paneles Fotovoltaicos Orgánicos (OPV):

Se trata de polímeros orgánicos capaces de reaccionar y liberar electrones en presencia de luz solar. La particularidad de estos paneles es que se pueden elaborar por medio de procesos de impresión y de recubrimiento a alta velocidad y escalables, como las pinturas en spray (ver Figura) y la impresión de inyección de tinta para cubrir áreas más extensas. Lo que facilita su aplicación sobre superficies metálicas, paredes exteriores de un edificio o

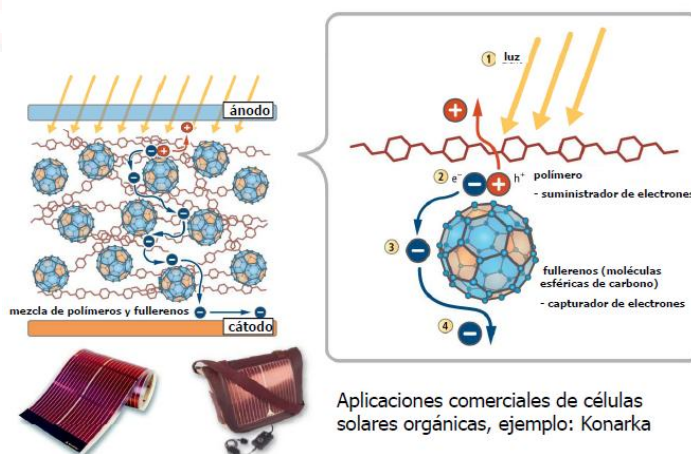


techo. De esta manera, es posible conseguirlos a costos mucho más bajos que los tradicionales de silicio.

Figura Celda Fotovoltaica Orgánica

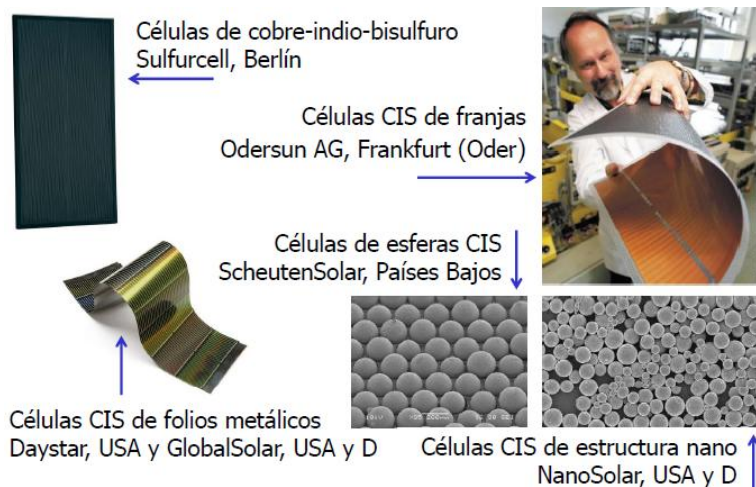
Los expertos aseguran que gracias a los avances de la nanotecnología se están mejorando sus propiedades de eficiencia y grosor. En el caso de las celdas solares sensibilizadas por tinta, corresponden a unas películas coloreadas o transparentes que pueden instalarse en ventanas. Además poseen baja dependencia a la temperatura y al ángulo de luz, con lo que se puede conseguir la máxima potencia energética durante todo el año.

Los compuestos orgánicos de (materias plásticas) también pueden ser usadas para hacer células fotovoltaicas de polímeros, y podría llegar a hacerse paneles flexibles y ligeros, azulejos, tejidos o velas solares, es de esperar que de fabricación a bajo coste. En la actualidad los rendimientos son bajos (5 % como máximo), así como su vida, y aún quedan muchos problemas técnicos por resolver. A principios de 2008, el grupo japonés *Fujikura* anunciaba haber puesto a prueba (1000 horas a 85 °C y con una humedad del 85 %) unas células fotovoltaicas orgánicas de tipo Grätzel no solo más resistente, sino que su rendimiento mejoró del 50 al 70 % con una superficie rugosa que distribuye al azar la luz reflejada dentro de la célula donde se liberan de nuevo las cargas eléctricas mediante la activación de otros pigmentos fotosensibles.



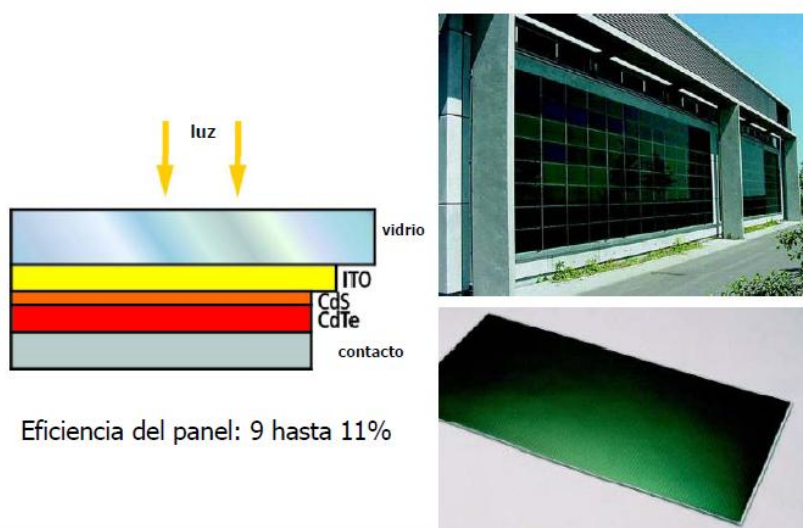
6.5.3 El semiconductor fbi

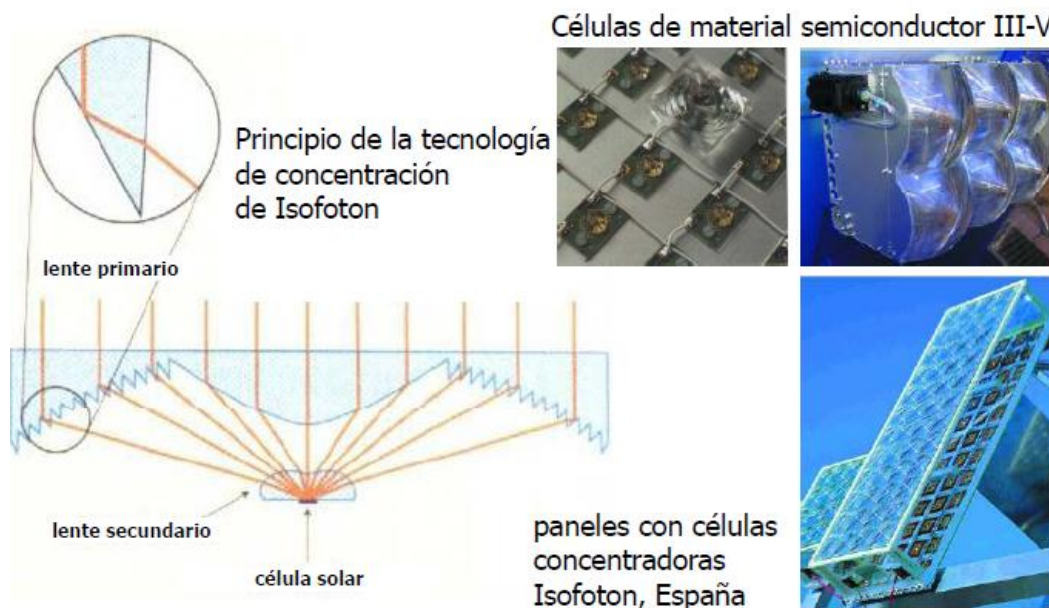
La técnica consiste en depositar un material semiconductor que contiene cobre, galio, indio y selenio sobre un soporte. Sin embargo la utilización de esta tecnología tiene un hándicap que es el uso de los recursos de materias primas. Estas nuevas técnicas utilizan



metales raros, como indio, cuya producción mundial es de 25 toneladas por año y el precio a fecha de abril de 2007 es de 1000 dólares por kg; el telurio, cuya producción mundial es de 250 toneladas al año; el galio con una producción de 55 toneladas al año y el germanio con una producción de 90 toneladas al año. Aunque las cantidades de estas materias primas necesarias para la fabricación de células solares son

infinitesimales, un desarrollo masivo de paneles fotovoltaicos solares debería tener en cuenta esta disponibilidad limitada.





Eficiencia del panel: hasta 28%

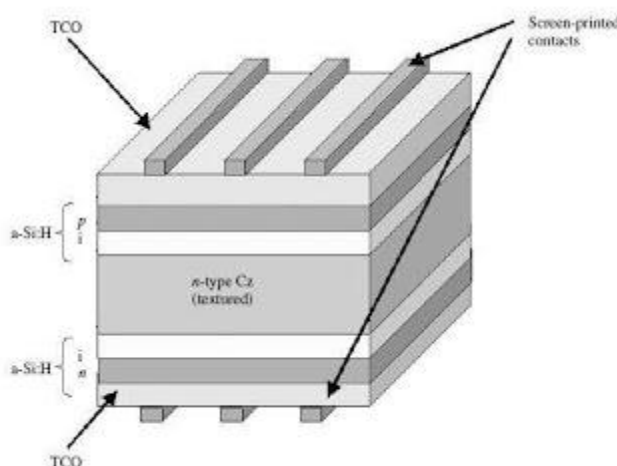
6.5.4 Paneles solares fotovoltaicos de Heterojuntura con Capa Fina Intrínseca

6.5.4.1 Panel de Heterojuntura con Capa Fina Intrínseca HIT

Los paneles fotovoltaicos HIT (Heterojunction with Intrinsic Thin Layer) están fabricados con células solares híbridas de silicio monocristalino recubiertas con finas capas de silicio amorfo depositadas mediante el proceso PECVD que proporciona al silicio cristalino una excelente superficie de pasivación gracias a la baja temperatura de este proceso de deposición que es de unos 200 °C.

El espesor de las finas capas de silicio amorfo ronda los 10 a 20 nm y sobre las dos caras de la células recubiertas de las capas dopadas de tipo n y p de silicio amorfo se recubren las mismas mediante una capa de un óxido conductor transparente (TCO) y luego sobre este se colocan las parrillas metálicas para la recolección de la corriente de la célula solar.

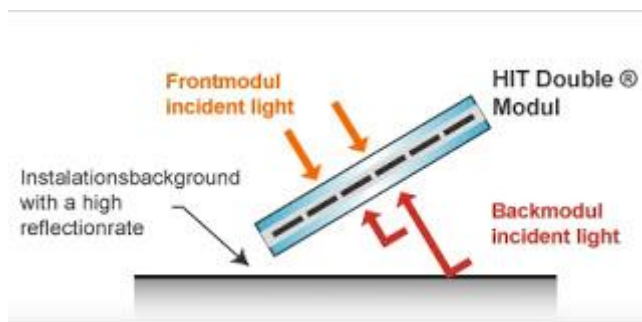
Estos paneles solares con obleas monocristalinas logran en la actualidad eficiencias del orden del 23%, las mas altas eficiencias de células solares de silicio que se comercializan en el momento, gracias entre otras cosas a que por la utilización del silicio amorfo en estas finas capas sobre el sustrato de silicio monocristalino se logren tensiones de la célula en circuito abierto del orden de los $V_{co} = 730$ mV, respecto de los 680 mV de tensión de circuito abierto que generalmente se generan en la células solares convencionales de silicio cristalino.



La célula solar se fabrica como lo muestra la siguiente figura:

Como se puede ver en la figura la célula solar está formada por un sustrato monocristalino del Tipo N y por capas de silicio amorfo en su parte superior e inferior de forma simétrica, lo que permite que los contactos en la parte trasera se puedan fabricar con una parrilla metálica como en la superficie frontal y hacer que esta célula pueda funcionar de forma bifacial o sea que absorba la luz de la parte frontal y de la parte trasera al mismo tiempo, logrando así que los paneles fotovoltaicos contruidos de esta manera logren una mejora en el rendimiento total de un 1 o 2 % superior al panel si trabajaría de la forma tradicional.

Un ejemplo de panel solar bifacial puede verse en la siguiente figura:



Estos paneles también tienen la ventaja de conservar su alta eficiencia de conversión trabajando a altas temperaturas logrando así una producción anual de energía superior a los paneles solares tradicionales policristalinos en la relación de Wp de panel sobre los Wh anuales generados.

6.5.4.2 Panel de Heterojuntura con Capa Fina Intrínseca con Contacto Posterior SHJ-IBC

Las células solares SHJ-IBC (Silicon-Heterojunction Interdigitated-Back-Contact) están siendo desarrolladas por diversas empresas ya que tiene el potencial de llegar a una eficiencia del 26% utilizando como sustrato obleas de silicio monocristalino y las capas de silicio amorfo se colocan de forma de evitar el contacto superior de la célula solar HIT para aumentar la eficiencia fotovoltaica ya que evita las pérdidas por sombreado de la parrilla del contacto superior.

Si bien estos paneles fotovoltaicos no están en el mercado hasta el momento serían los paneles fotovoltaicos fabricados con células solares de silicio del mayor rendimiento que se ha logrado hasta el momento, lo cual, por utilizarse como material semiconductor solamente silicio, por las ventajas de abundancia y bajo costo que tiene este semiconductor, presenta un gran interés en su fabricación gracias a la alta eficiencia que se puede obtener de ellos.

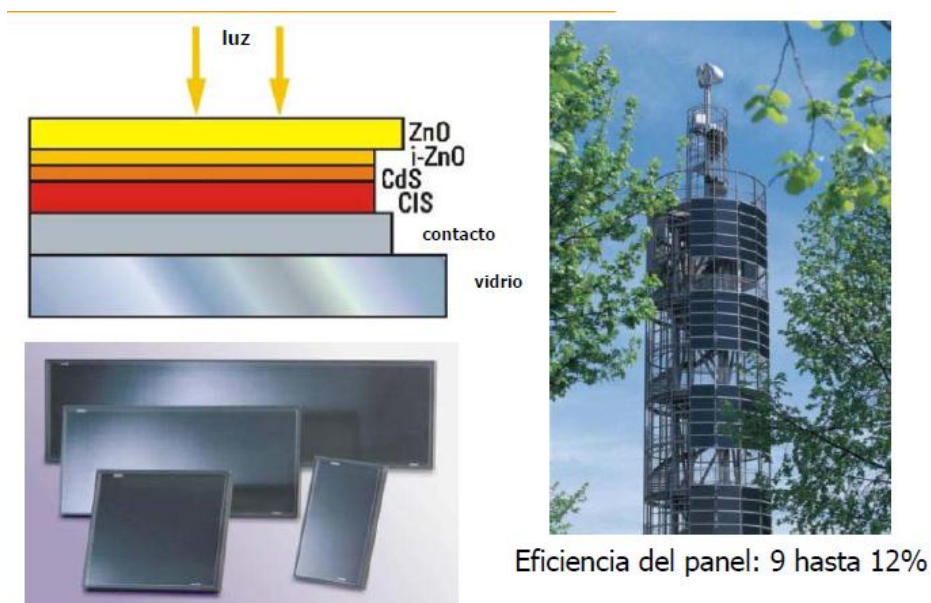
Estas células solares también se podrían fabricar utilizando como sustrato obleas de silicio poli cristalino que aunque tuvieran un rendimiento final del panel algo menor que el monocristalino serían más baratos y simples de fabricar y también tendrían una alta eficiencia lo que los hace muy interesante para su aplicación por su economía de fabricación y su alta eficiencia energética de conversión fotovoltaica.

6.5.5 Células de lámina delgada

6.5.5.1 Paneles Fotovoltaicos de película delgada (thin-film):

Se construyen en base a microestructuras CIGS (Cobre Indio Galio Selenio), o CIS en caso de no incluir al Galio, alojadas sobre un soporte flexible y liviano, aptas para ser instaladas

sobre techos, fachadas de edificios, ventanas, teléfonos móviles, ordenadores portátiles y automóviles. La Figura muestra dos tipos de láminas de esta tecnología.



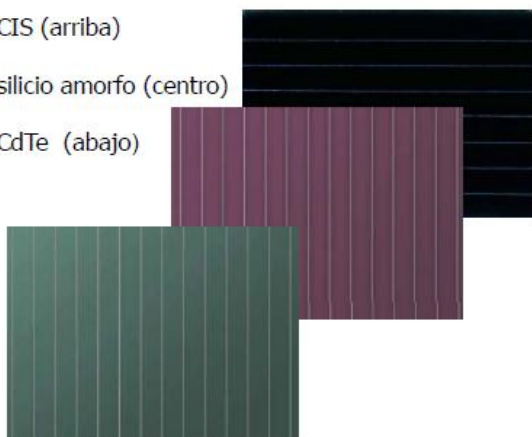
Respecto a la energía consumida durante su fabricación, las temperaturas son mucho más bajas, al igual que el impacto ambiental. Según un estudio de Nanosolar, empresa especializada en el desarrollo de este tipo de tecnología, indica que un kilo de CIS integrado en una celda solar produce cinco veces más electricidad que un kilo de uranio enriquecido integrado en una central nuclear.

Figura Láminas Fotovoltaicas de Película Delgada (thin-film)



Diferentes células de capa fina:

- CIS (arriba)
- silicio amorfo (centro)
- CdTe (abajo)



6.5.5.2 Células de silicio de lámina delgada

La tecnología de la célula solar de silicio es bastante estándar, y la mayor parte de la investigación tecnológica se centra en la película fina. La mayoría de la película fina o delgada consiste en una sustancia absorbente solar rociada sobre una capa, o aplicada

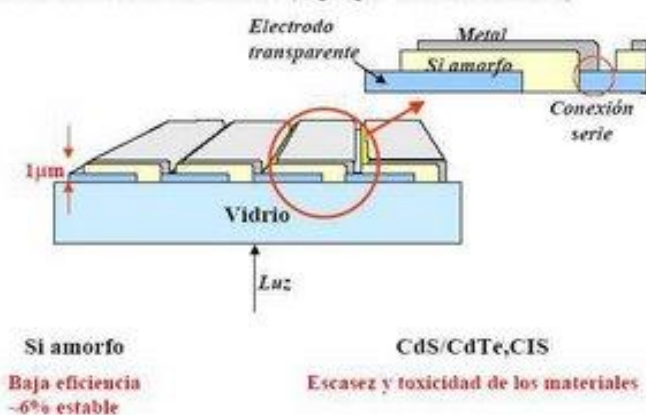
con gas a una capa, o, más recientemente, de una tinta solar impresa sobre una capa. Las tecnologías de la película fina se diferencian sobre todo en el material que utilizan. La película fina utiliza típicamente el 1%, o menos, del silicio de la células standard, es más barata, y es también a veces flexible, pero es menos eficiente. La película fina se imprime a menudo sobre una lámina, haciéndola flexible. Una película delgada se puede rociar sobre una capa para hacer película fina del silicio amorfo. Es más barata, pero menos eficiente, que el silicio normal, y absorbe solamente el espectro visible de la luz.

Existen dos clases de tecnología fotovoltaica de silicio de lámina delgada que están en

Capas delgadas

La mayor parte de la luz se absorbe en una capa de unas pocas micras (dependiendo del material): posibilidad de AHORRO

Fabricación integral del módulo: las capas se depositan e interconectan sobre un sustrato (el propio vidrio, a menudo)

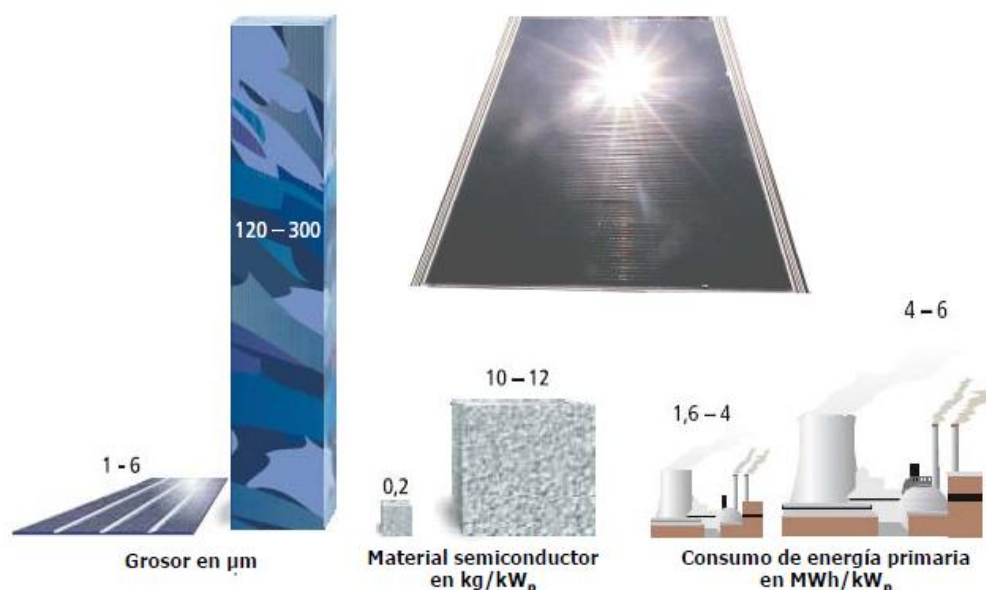


investigación y son más una modificación de la tecnología existente que un nuevo tipo de tecnología. La primera es la fotovoltaica transparente, prevista para el uso en ventanas o en techos de invernaderos, como por ejemplo son las fabricadas con silicio amorfo que se explican detalladamente mas adelante. La fotovoltaica transparente se está desarrollando en los laboratorios con prototipos que hasta ahora no han mostrado una buena calidad. La segunda es el silicio 'negro' supuesto, en el cual las abolladuras y los topetones microscópicos a través de la

superficie del fotovoltaica crean un área superficial más grande que se pueda exponer a la luz. Se cree que éste aumentará la eficacia, pero también está en proceso de desarrollo.

6.5.5.3 Otros tipos de células de película delgada

Las tres principales clases de película fina son: CIGS, CIS y Telurio de Cadmio. Los CIGS están basados en el cobre, el indio, el galio y el selenio. Los productos químicos se mezclan para formar una película delgada con hasta el 14% de eficiencia, y en laboratorios han llegado a 16.5% de eficiencia de conversión fotovoltaica. Utiliza una clase más complicada de reacción química que el silicio. Se utilizan los CIGS para conseguir una eficacia mejor al concentrar la luz con espejos. Las células CIS son similares a las anteriores pero utilizan Cobre Indio y Selenio y como no usan Galio deben usar mayor cantidad de Indio y Selenio que como son elementos poco abundantes son caros y por lo tanto la célula solar es mas cara que la anterior, llegan a tener una eficiencia del 11%. El telurio de cadmio, conocido como CdTe, es otra clase de película fina, tiene cualidades útiles, pero tiene el problema que la sustancia es tóxica, el CdTe es también menos eficiente que el silicio, aunque es más barato de fabricar.



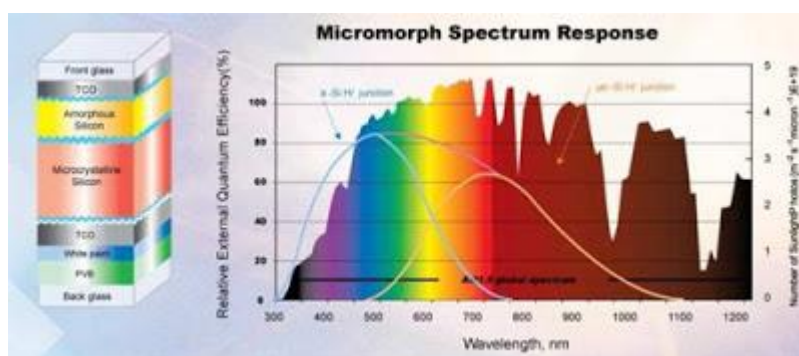
Comparación del grosor de las células, el consumo de material y el gasto de energía para la producción de células de silicio de capa fina (izquierda) y células cristalinas (derecha)

Dos áreas de la investigación de la película fina que han recibido mucha atención son las células solares de tinte y las células solares orgánicas o de polímeros. El tinte sensibilizado usa un electrolito de yoduro entre dos electrodos, uno de los cuales tiene el dióxido de titanio y tinte, donde el tinte trabaja de modo semejante a la fotosíntesis de las plantas, y crea una corriente eléctrica a partir de la luz, es barato y simple de fabricar pero se desgasta rápidamente, pues se degrada por efecto de la luz. Las células solares orgánicas se hacen con polímeros semiconductores y compuestos orgánicos nanomoleculares en donde se han llegado a obtener eficiencias del orden del 6% son baratas de fabricar pero tienen el inconveniente que también se degradan rápidamente por efecto de la luz del sol.

6.5.6 Paneles solares fotovoltaicos de silicio micromorfo

El silicio nano-cristalino, también llamado microcristalino, es una clase de silicio amorfo pero contiene cristales pequeños. Es más fácil de hacer que el silicio normal, absorbe un espectro más amplio de la luz que el amorfo, es flexible y se puede combinar con el silicio amorfo formando paneles solares tipo tandem de células de lámina delgada con estos dos tipos de silicio.

En el caso de los paneles de silicio micromorfo el objetivo es hacer células dobles o células en tandem. La parte superior está formada por silicio amorfo, que reacciona ante una determinada longitud de onda de la luz que recibe. Y la parte inferior estaría constituida por una capa de silicio microcristalino que capta otra parte del espectro de luz, en este caso la radiación infrarroja. Esta célula doble actúa como un tandem. Sumando la eficiencia de la capa superior de silicio amorfo y la inferior de silicio micromorfo el módulo llega al 10% frente al 6,8% de las células de silicio amorfo inicial. En la siguiente figuras se pueden ver el espesor y el espectro de absorción de cada una de las capas de esta célula de silicio micromorfo.



Con el futuro desarrollo de estas células de dos capas activas, se estipula que es posible llegar a una eficiencia del 13%. Así, partiendo de la base del 6,8% inicial se llega a casi un aumento del 100%.

Este tipo de células tiene una proporción de producción de kWh generados por kWp instalados mayor que las células de silicio tradicionales ya que tiene un coeficiente de disminución de la eficiencia de la célula solar por la temperatura que es aproximadamente la mitad que el de las células de silicio policristalino y por lo tanto las pérdidas producida por este efecto son el 50% a las anteriores, y además su comportamiento ante la luz difusa mejora también la proporción de producción, estimándose que estos paneles pueden producir hasta un 10% más de kWh por kWp instalado que los paneles solares de silicio cristalino.

Otra de las ventajas de estos paneles solares es que las instalaciones se pueden hacer con un menor ángulo de inclinación que los otros paneles como se ve en la figura anterior y con esto disminuir la altura de las estructuras que se utilizan como soporte de los paneles solares en las instalaciones y así disminuir los costos finales de instalación de dichos paneles.

Table 2.1: Efficiencies, area specific yields, and temperature coefficients¹ of PV market technologies, for power applications (data at STC).

Technology	Best efficiency in laboratory (cells) ²	Efficiency in industry (modules) ³	Area specific power yield (modules)	Temperature coefficient of output power at MPP ⁴	Remarks
Mono-Si	25.0%	14-21.5%	140-215 W/m ²	-0.38%/°C	Pseudo-square wafers (125 mm)
Multi-Si	20.4%	14-18%	140-180 W/m ²	-0.40%/°C	Square wafers (156 mm)
CIS (CIGS)	20.3%	11-15%	110-150 W/m ²	-0.31%/°C	Uses indium (scarce)
CdTe	18.7%	12-13%	120-130 W/m ²	-0.25%/°C	Uses tellurium (scarce) and cadmium (toxic)
Micromorph Si	11.9%	8-10%	80-100 W/m ²	-0.28%/°C	Tandem cell (a-Si/μc-Si)
Amorphous Si	10.1%	5-7%	50-70 W/m ²	-0.27%/°C	Very thin cells (Si~300 nm)