

Proyecto educativo sobre energía en las escuelas y en los hogares

PLUGGING into the **SUN**® Renewable Energy Education

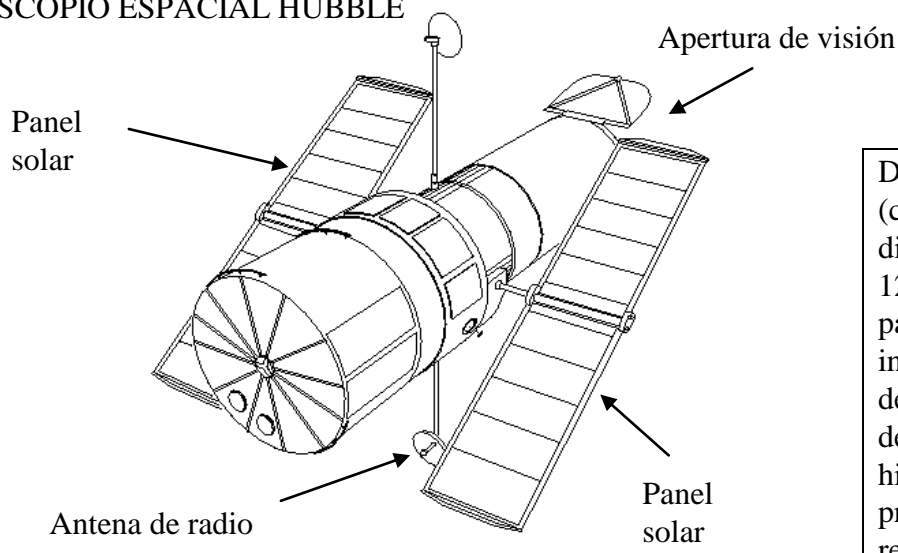
CÉLULAS SOLARES

Una célula solar es un dispositivo electrónico que produce electricidad cuando la luz incide sobre él. La luz es absorbida y la célula produce el voltaje y la corriente. El dispositivo tiene un contacto positivo y otro negativo, entre los cuales se genera el voltaje y a través del cual la corriente puede fluir. Deberá conectar estos contactos al lugar donde desea aplicar la energía. Las células solares no tienen piezas móviles. De forma efectiva, toman la energía de la luz y la convierten en energía eléctrica mediante un circuito eléctrico, sacando provecho de un proceso físico conocido como *efecto fotovoltaico*.

El descubrimiento del efecto fotovoltaico se le acreditó al físico francés, Edmond Becquerel, en 1839. Descubrió que al concentrar la luz solar en un lado de una batería, la corriente de salida de la batería se podía incrementar. Este descubrimiento revolucionario puso en marcha la idea de que uno podría producir energía a partir de la luz mediante un proceso artificial. En 1883, un inventor americano produjo una célula solar de un material llamado selenio, pero era muy ineficiente. El selenio comenzó a usarse en los medidores de exposición a la luz de las cámaras, pero no para la producción de energía.

No fue hasta la década de 1950 que se desarrollaron células solares prácticas. En 1948 se inventó el transistor en los laboratorios Bell de Estados Unidos y se descubrió que las mismas obleas de sílice de alta calidad, que se usaban para hacer transistores, podían usarse para construir células solares. Este trabajo se publicó en 1954. A partir de 1958 las células se emplearon en la carrera espacial. Las células solares son todavía la única fuente sensible de energía eléctrica para los satélites espaciales, porque son en realidad baterías que nunca se agotan.

TELESCOPIO ESPACIAL HUBBLE



Dos paneles solares (cada uno con unas dimensiones de 2,4 m x 12,1 m) generan energía para los ordenadores e instrumentos científicos de abordo y para la carga de las baterías de níquel-hidrógeno que proporcionan energía de reserva cuando el Hubble está en la zona de sombra de la Tierra

Inicialmente, las células solares eran demasiado caras para usarse en aplicaciones no relacionadas con el espacio (es decir, *terrestres*), aunque la empresa Bell Telephone hizo demostraciones de ellas para sistemas telefónicos rurales. Son una gran idea para las áreas rurales que no tienen una red de suministro eléctrico, de las cuales existen muchas en el mundo en vías de desarrollo, y para aplicaciones marítimas (por ejemplo, para suministrar electricidad a las luces destellantes de las boyas). Si se consiguen abaratar lo suficiente (y se están haciendo grandes esfuerzos para lograrlo), las células podrían incluso sustituir nuestros métodos normales de producción de electricidad, que son contaminantes o no renovables (la quema de combustibles fósiles) o residuos que constituyen un peligro medioambiental a largo plazo (el residuo radioactivo de las plantas de energía nuclear). Las células solares no producen emisiones y no contribuyen al efecto invernadero y la cantidad de energía disponible a partir de la luz solar en todo el mundo es mucho más de lo que jamás podamos necesitar.

Las células solares individuales son pequeñas y, por tanto, no muy potentes (aunque pueden alimentar calculadoras y relojes). Se pueden lograr suministros más potentes al conectar muchas células juntas en un *módulo* solar. Los módulos están conectados entre ellos para formar *paneles* solares y, a su vez, los paneles se conectan entre ellos para formar *redes de antenas* solares.

Eficiencia

La eficiencia de una célula solar es una medida de la proporción de luz que incide sobre ella y que se convierte realmente en electricidad. Si la célula fuera 100% eficiente, entonces convertiría toda la luz incidente en energía pero, lamentablemente, eso no es posible: lo máximo que permiten las leyes de la física es entre el 30% y el 40%. Las células solares prácticas, hechas de obleas de silicio (silicona monocristalina) pueden tener una eficiencia de un 16% aproximadamente. Estas células solares, delgadas como una película (por ejemplo, las células solares de silicio amorfo), tienen una eficiencia más baja, al menos las células comerciales, pero son mucho más baratas de producir.

Al mediodía, en un claro día de verano, la luz solar que cae sobre la Tierra tiene una densidad de potencia de aproximadamente 1 kW (1000 vatios) por cada metro cuadrado de superficie; esto es normalmente la potencia que produce un fuego eléctrico de una presión un bar). Un módulo solar que mida 0,30 m x 0,45 m tiene un área de 0,135 m² y, por consiguiente, cuando lo dirige hacia el sol, la luz que cae sobre él tendrá una potencia de 0,135 x 1000 vatios = 135 vatios. Si el módulo tuviera una eficiencia del 10%, la potencia disponible sería un 10% de la cantidad mencionada antes, es decir 13,5 vatios. Se dice que el módulo tiene una potencia de 13,5 vatios de pico, es decir cuando la luz solar está en su momento de mayor intensidad de 1000 vatios por metro cuadrado. La potencia será menor a otras horas del día, en condiciones de nubosidad o si el módulo está a la sombra o no está apuntando directamente al sol.

En el espacio, la potencia es más alta porque la radiación solar allí es más fuerte y no es afectada por la atmósfera de la tierra. Tiene una densidad de potencia de 1365 vatios por metro cuadrado.

¿Cómo afecta la intensidad de la luz a la célula solar?

A medida que decrece la intensidad de la luz, debido a la nubosidad o a la hora del día, también se reduce la potencia de la célula solar. La corriente de la célula es más sensible a la

intensidad de la luz que el voltaje. Por decirlo de alguna manera, si tiene la intensidad de luz tendrá la corriente; pero el voltaje sólo disminuye ligeramente.

La intensidad de luz también puede reducirse simplemente girando la célula. La potencia de una célula solar alcanza su valor máximo cuando está perpendicular a la luz incidente, por ejemplo, cuando está apuntando hacia el sol. Si ahora cambia el ángulo, la célula intercepta menos rayo de luz; sin embargo, esta cantidad más pequeña de luz todavía se esparce por el mismo área de la célula, por tanto la intensidad de luz sobre la célula se reduce.

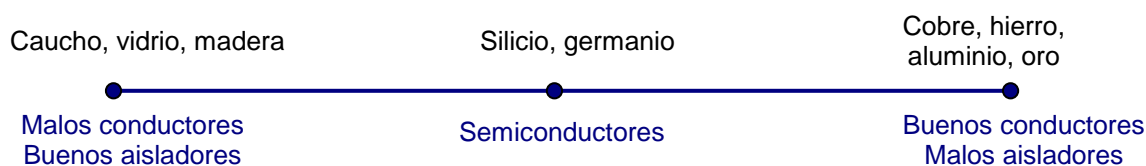
INTERIOR DE UNA CÉLULA SOLAR - ¿CÓMO FUNCIONA?

Fotones

Los fotones componen la luz que vemos. La luz es una onda electromagnética que se transmite en pequeños impulsos de energía. A estos pequeños impulsos de energía se les denomina fotones.

Semiconductores

Todas las sustancias pueden clasificarse por orden de su capacidad para conducir cargas eléctricas. A las que están en la parte superior de la lista se les llama conductores y a las que están en la parte inferior aisladores. Que una sustancia sea clasificada como conductor o como aislador dependerá de su unión inter atómica y de con qué fuerza retienen los átomos de la sustancia a sus electrones. La unión inter atómica en algunos materiales, como el silicio, es intermedia entre la de un buen conductor y la de un buen aislador.



La mayoría de los metales son buenos conductores, la mayoría de los no metales son pobres conductores.

El silicio y el germanio pertenecen a un grupo de materiales denominados semiconductores. Son buenos aisladores en su forma pura cristalina a muy baja temperatura. La conductividad se incrementa con la temperatura o, cuando están expuestos a la conductividad de la luz, se puede incrementar enormemente, incluso cuando un átomo de entre diez millones es sustituido por una impureza que agrega o quita un electrón a la estructura de cristal. Los chips que se utilizan en electrónica están hechos de materiales semiconductores y también las células fotovoltaicas. El semiconductor más común es el silicio. Los materiales semiconductores también interactúan con la luz (véase la figura 1). Un fotón, al golpear un átomo de silicio puede dar al electrón que está dentro del átomo la suficiente energía para abandonarlo y desplazarse a través de la estructura. El electrón con carga negativa deja en su lugar un orificio cargado positivamente (una posición que antes la ocupaba un electrón); por tanto, el fotón ha creado un par electrón/orificio. Un electrón que orbita alrededor de un átomo cercano a un orificio, puede desplazarse hasta el orificio dejando un orificio en su lugar; de este modo los orificios con carga positiva también pueden desplazarse a través de la estructura. En presencia de un campo eléctrico, los electrones se desplazan en una dirección y los orificios en la otra, porque tiene cargas eléctricas opuestas y los orificios se comportan en casi todo como partículas positivas. En los materiales semiconductores, la corriente eléctrica es el flujo de electrones y orificios cargados positivamente.

El efecto fotovoltaico (PV)

Sin un campo eléctrico que separe los electrones y orificios creados por la luz, éstos pronto se volverían a combinar y no habría corriente en la red. Para evitar esto, una célula fotovoltaica

(PV cell) es una oblea o película fina de material semiconductor que está organizada para tener un campo eléctrico interno, dirigido desde la superficie superior de la oblea o película hacia la superficie inferior (o *viceversa*). Un contacto eléctrico, generalmente de aluminio, cubre la superficie inferior. La superficie superior también tiene un contacto eléctrico, pero éste es transparente para dejar pasar la luz. Cuando el silicio (u otro material semiconductor) de la célula fotovoltaica absorbe la luz, se generan pares de electrones/orificios. Debido al campo eléctrico interno, los electrones se desplazan hacia un contacto y los orificios hacia el otro, acumulando así un voltaje. La célula actúa como fuente de voltaje. Si se conectan los dos contactos mediante un cable, habrá una corriente que fluye por el cable; a ésta se la conoce como "*corriente de cortacircuito*" de la célula fotovoltaica; se puede medir con un amperímetro. Si no se conectan los contactos, los electrones y los orificios se acumularán en las superficies opuestas de la célula y producirán un voltaje entre los contactos que se podrá medir con un voltímetro; a esto se le llama el "*voltaje de circuito abierto*" de la célula fotovoltaica.

El campo interno; conexiones *p-n*

Para producir el campo eléctrico interno necesario, utilizamos dos tipos de material semiconductor "adulterado"; se les denomina materiales "*n-type*" y "*p-type*".

El silicio *n-type* contiene un pequeño porcentaje de átomos de fósforo. Éstos encajan muy bien en la estructura del silicio, excepto que cada uno tiene un electrón más que cada átomo de silicio. Los electrones sobrantes se escapan del fósforo y quedan libres para desplazarse por la estructura; lo que dejan atrás son iones de fósforo con carga positiva (que están fijos en la estructura y no se pueden mover). Al fósforo se le llama dopante *n-type* porque agrega electrones negativos al silicio; al material resultante se le denomina silicio *n-type* debido a los electrones que contiene (aunque debe recordar que contiene el mismo número de cargas fijas positivas).

El silicio *p-type* contiene átomos de boro. Éstos encajan muy bien en la estructura del silicio, excepto que cada uno tiene un electrón menos que cada átomo de silicio. Por tanto, capturan electrones del silicio y crean orificios que quedan libres para desplazarse por la estructura. Lo que los orificios dejan atrás son iones de boro con carga negativa (debido a los electrones sobrantes que han capturado); los iones de boro está fijos en la estructura y no pueden moverse. Al material se le denomina *p-type* debido a los orificios positivos que contiene; también contiene el mismo número de cargas fijas negativas. Se dice del boro que es un dopante *p-type* en el silicio.

Ahora considere una oblea de silicio que tiene exceso de boro en la mitad superior (silicio *p-type*) y exceso de fósforo en la mitad inferior (silicio *n-type*). En el medio hay lo que se llama una conexión *pn*, donde el material cambia de *p-type* a *n-type*. En el lado *n-type* de la conexión habrá electrones y cargas fijas positivas (iones de fósforo); en el lado *p-type* habrá orificios y cargas fijas negativas (iones de boro). Debido a que hay muchos electrones en el material *n-type* y muy pocos en el material *p-type*, los electrones del lado *n* tenderán a extenderse hacia el lado *p*, dejando alguna carga neta positiva en el lado *n* (a causa de los iones de fósforo positivos); esta carga positiva impedirá que los electrones se extiendan demasiado hacia el material *p-type*, que se incrementa aún más cuando los orificios se expanden desde el lado *p* (que también deja carga negativa en el lado *p*, debido a los iones de boro negativos). El resultado son cargas eléctricas fijas positivas en el lado *n-type* de la conexión y cargas fijas negativas en el lado *p-type*. Esto produce un campo eléctrico interno

que apunta a través de la conexión, que es precisamente lo que se necesita para una célula fotovoltaica.

De este modo se aceleran los electrones de los pares electrón-orificio, separados por la luz del material *p-type*, hacia el material *n-type*, donde hay muchos electrones y pocos orificios y no hay tanta posibilidad de que se recombinen. De forma similar, la conexión acelera los orificios de los pares electrón-orificio que están en el material *n-type*, hacia el material *p-type* donde es también improbable que se recombinen.

Células solares

Una célula solar es una célula fotovoltaica diseñada para convertir la luz solar en electricidad. Las células más simples (Figura 1a) consisten en una oblea circular de silicio con una conexión *pn* aplastada en el medio, un contacto inferior metálico (por ejemplo, de aluminio) y un contacto superior transparente (o bien un óxido conductor transparente o una estructura metálica en forma de rejilla). Los paneles solares con células de este tipo han jugado un papel vital en la tecnología espacial desde finales de los años 50, suministrando energía a los satélites espaciales. Son demasiado caros de producir, porque la producción de obleas de silicio es costosa (debido principalmente a que son cristales únicos de alta pureza) pero su coste no era importante en la época de la carrera espacial.

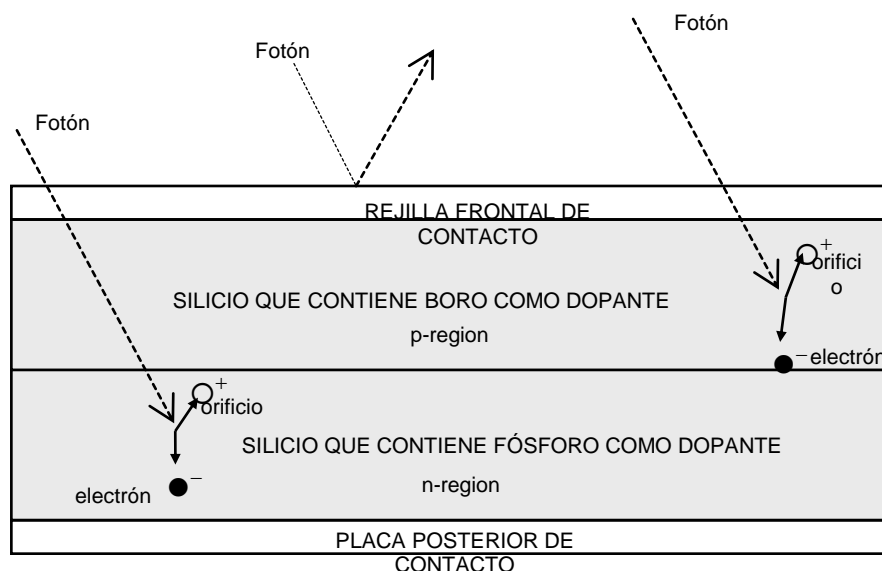


Figura 1a. Célula fotovoltaica de silicio cristalino

En años recientes ha habido una continua búsqueda de formas más baratas de producción de células fotovoltaicas, que sean lo suficientemente económicas para usarse en aplicaciones aquí en la tierra (aplicaciones *terrestres*). Se han realizado intentos de usar formas más baratas de silicio, de más baja calidad que el que se usa en los microprocesadores, a pesar de la baja eficiencia que resulta en las células. Una posibilidad ha sido la de sustituir la oblea de un solo cristal por cuadrados policristalinos (que consisten en muchos granos pequeños de material cristalino). Un enfoque más radical es utilizar silicio amorfo, que no tiene estructura cristalina en absoluto. Este material tiene la ventaja de absorber la luz mucho más que el silicio cristalino: Una película fina sobre un sustrato adecuado de sólo unas pocas micras de grosor (una micra es una milésima de milímetro) absorbe la mayoría de la luz solar que cae sobre él; por el contrario, las células cristalinas tienen que ser de un grosor de unas 100 micras y en la práctica tienen un grosor de 0,5 mm. Esto significa que se necesita mucho menos silicio amorfo para hacer las células y, además, éstas pueden hacerse flexibles mientras que las células cristalinas son muy frágiles. Los electrones y los orificios no se mueven con tanta facilidad en el silicio amorfo, pero esto se compensa parcialmente por el hecho de que no se tienen que mover tanto (porque la célula es tan fina). La eficiencia de la célula es tal vez sólo la mitad de la del silicio cristalino, pero el coste de las células amorfas es potencialmente

mucho menor de la mitad para la misma área de superficie, de modo que parecen ser la opción más económica del momento.

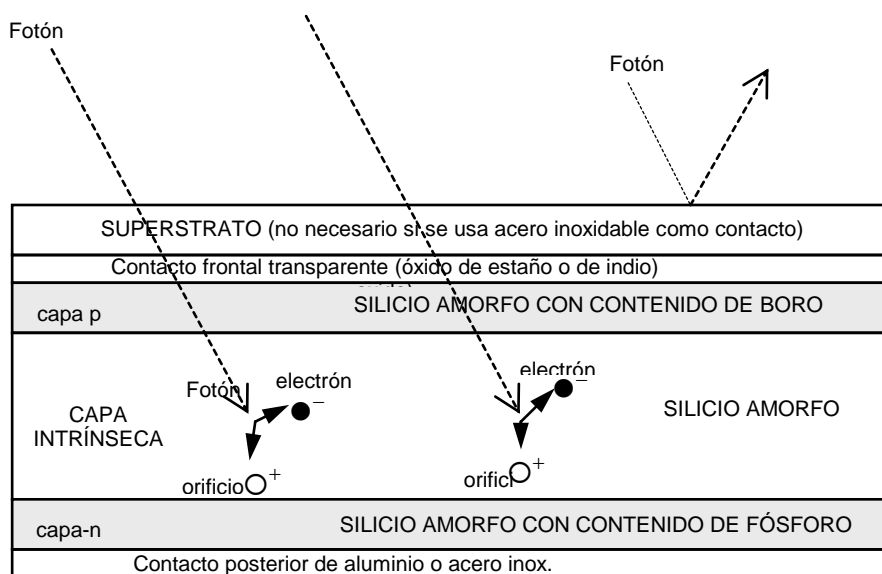
Fabricación de células solares de silicio amorfo

La fabricación de células de silicio amorfo (por ejemplo, por la empresa UNI-SOLAR®) es muy diferente de la fabricación de células cristalinas. No se utilizan obleas. En vez de eso, se deposita el silicio en forma de fina película sobre un sustrato, generalmente acero inoxidable o una lámina de cristal cubierta por una capa de estaño que actúa como contacto transparente.

Como se muestra en la figura 2, el sustrato se coloca en una cámara de acero que es evacuada (es decir, se bombea todo el aire hacia el exterior) y una pequeña cantidad de gas silano (un compuesto gaseoso de silicio e hidrógeno) es introducido mediante una válvula. Dos placas metálicas dentro de la cámara se conectan a una fuente de alimentación por radio frecuencia, que inicia una descarga luminiscente de color púrpura (a veces se le llama plasma) en el gas silano; los electrones colisionan con las moléculas de silano y alejan los átomos de hidrógeno, lo cual causa que los átomos de silicio se depositen en forma de película fina amorfa sobre el sustrato (mezclados con algunos de los átomos de hidrógeno, que en realidad resultan ser beneficiosos para la célula). Los sustratos que se usan tienen a menudo 300 mm de anchura, pero en principio podrían ser más grandes, limitados solamente por el tamaño de la cámara de deposición.

Para hacer silicio amorfo *n-type* se sigue el mismo procedimiento, excepto que el silano se mezcla con uno o dos por ciento de la fosfina de gas, un compuesto de fósforo e hidrógeno. Para hacer silicio amorfo *p-type*, el silano se mezcla con diborane, un compuesto de boro e hidrógeno. Para hacer cada tipo se utilizan cámaras separadas o chorros secuenciales de gas.

Figura 1b: Célula fotovoltaica de silicio amorfo



Lamentablemente, la recombinación de electrones y orificios en el silicio amorfo *n-type* o *p-type*, cuando es expuesto a la luz, es muy alta. Para evitar este problema, la célula se fabrica en su mayor parte de silicio amorfo no dopado (por ejemplo, se usa simplemente silano): La fina capa de silicio amorfo no dopado es compactada entre capas mucho más delgadas de silicio amorfo *n-type* y *p-type*, como se muestra en la figura 1b. Las capas *n* y *p* sirven para producir el campo interno que atraviesa la capa no dopada, pero casi toda la luz es absorbida en la capa no dopada. (Al material no dopado se le denomina *intrínseco* y se dice que la célula tiene una estructura *p-i-n*, en contraste con la estructura *p-n* de las células de silicio cristalino).

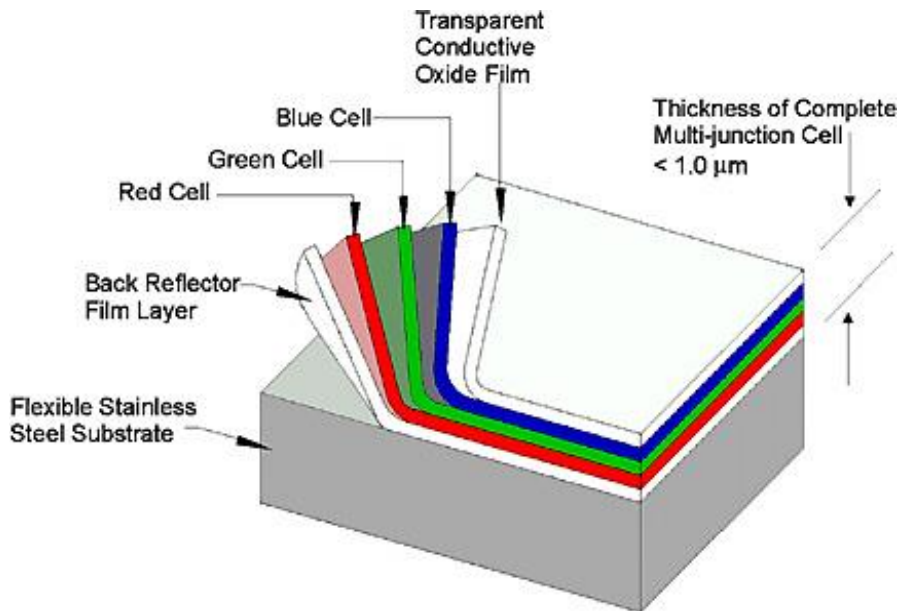
El proceso que se utiliza para depositar el silicio amorfo se presta muy bien a las técnicas de producción en masa. El sustrato (con su capa de contacto eléctrico si es necesario) pasa a una cámara y recibe la deposición *n-type*, luego a una cámara donde recibe la deposición no dopada y finalmente a la cámara en la que recibe la deposición *p-type*. (Es más fácil automatizar esto que cortar y pulir obleas).

La industria de las células fotovoltaicas se beneficia de los desarrollos tecnológicos en otros campos. El desarrollo de rodillos revestidos de silicio para las fotocopiadoras a color se aplica ahora a la producción de bandas de metal continuas revestidas de silicio amorfo. Si el sustrato es acero inoxidable flexible (como las láminas de *Plugging into the Sun*) que puede enrollarse en un gran rodillo, es posible tener un proceso de producción continuo de rodillo a rodillo para las células solares de silicio (Figura 3). La lámina de acero inoxidable se desenrolla de su rodillo y pasa a través de procedimientos de limpieza y a través de las cámaras para la deposición de *n-type*, *intrínseco* y *p-type*, antes de llegar al rodillo de recogida. Las células resultantes tienen la ventaja adicional de ser flexibles.

Muchos fabricantes basan sus células en sustratos de vidrio. Normalmente, se usa vidrio revestido de estaño ya que el estaño sirve como contacto transparente. Se deposita la capa *p*, seguida de la capa *i* y luego la capa *n*. El aluminio se deposita para formar el contacto posterior. En esta forma de estructura, la célula es iluminada a través del cristal y es protegida por éste (por tanto, se le conoce como súper estrato).

Una sola célula solar de silicio produce un voltaje de circuito abierto de unos 0,5 voltios. Hay módulos solares de silicio amorfo que en realidad son células únicas, que producen un bajo voltaje y una alta corriente correspondiente. Sin embargo, es mucho más común que el módulo se divida en células individuales que tienen forma de tira y que son ordenadas para conectarse en serie con el fin de producir un voltaje operativo de alrededor de 14 voltios, adecuado para cargar las baterías de 12 voltios.

Hemos tratado los principios más importantes de la producción de células solares de silicio amorfo. Hay un volumen considerable de detalles secundarios que es demasiado extenso para tratarlo aquí. La eficiencia de las células puede incrementarse hasta cierto punto si se incluye una segunda estructura *p-i-n* por debajo de la primera, utilizando una aleación de silicio amorfo y germanio. De este modo se absorbe una parte del espectro solar con longitud de onda más larga. Se le llama célula en tándem o célula multifunción.



Célula separadora del espectro, fabricada con tres subcélulas de semiconductor amorfo *p-i-n* type, cada una con una respuesta espectral diferente. De este modo, la célula puede convertir las diferentes longitudes de onda de la luz solar, visibles y casi infrarrojas, con una eficiencia óptima.

Figura 3a: Cómo se hace una célula fotovoltaica en tándem (dos capas) de silicio amorfo.

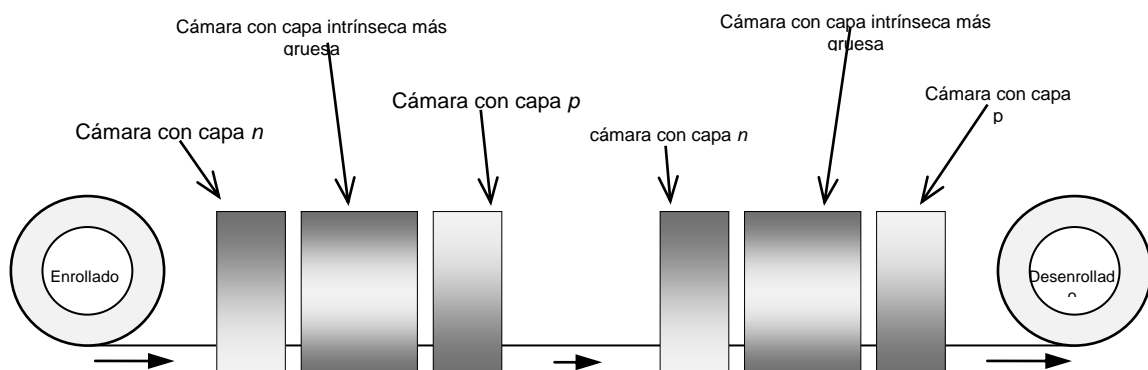
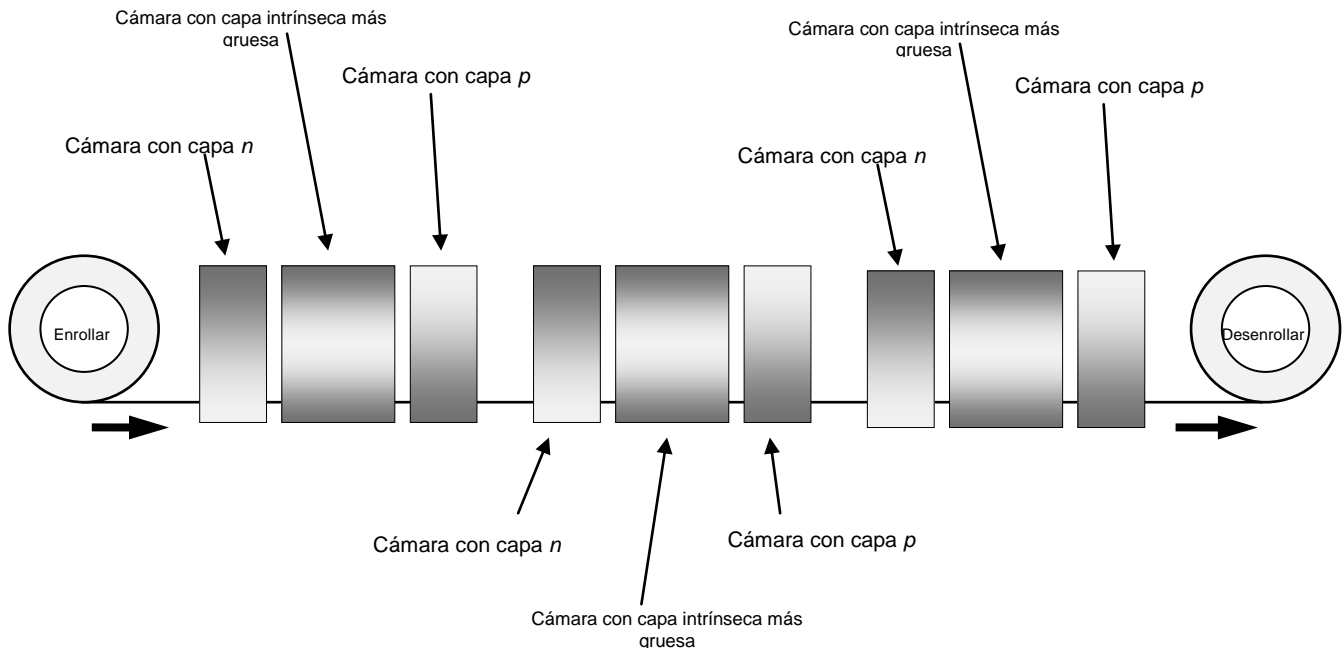


Figura 3b: Cómo se hace una célula fotovoltaica triple (tres capas) UNI-SOLAR® de silicio amorfo.



Al añadirse una tercera estructura *p-i-n* se forma una célula de triple conexión (En términos de producción es simplemente una cuestión de tener cámaras adicionales y sus suministros de gas; véase la figura 3b). Cuando se realiza un desbastado correcto de la superficie de la célula se produce menos reflexión de la superficie de ésta y la correspondiente mejora de su eficiencia. El contacto frontal debe ser diseñado cuidadosamente y la célula entera deber ser encapsulada de forma adecuada y protegida contra las inclemencias del tiempo. Si se hace todo correctamente no hay razón por la que las células no duren treinta años o más.

Figura 2: Deposición del silicio amorfo

Cómo funcionan las cámaras de plasma

Las cámaras de plasma suspenden el silicio y el fósforo o las moléculas de boro en un estado gaseoso. Esta mezcla es empujada hacia el interior de la cámara, que tiene electrodos en la parte superior y en la parte inferior. Cuando se cargan los electrodos, se produce un campo eléctrico entre ellos. El campo eléctrico elimina algunos de los electrones de la mezcla, creando así un gas con iones cargados positivamente, un plasma. Se pasa una lámina de acero inoxidable o lámina de vidrio, con una capa de estaño o de indio, hacia la cámara y entre los electrodos. El gas tipo plasma deposita partículas cargadas sobre la superficie no cargada del sustrato de acero o de vidrio. En función de la naturaleza química de la mezcla gaseosa que se alimenta a la cámara, se formará una de las tres capas que componen la célula fotovoltaica. El grosor de las capas depende de la velocidad con que pasa el sustrato a través de la cámara y del tamaño de la cámara.

