

## VIII. Las células fotovoltaicas como alternativa energética

ANTONIO L. DOADRIO VILLAREJO y MARÍA LÓPEZ GARCÍA



El Doctor Antonio L. Doadrio Villarejo es Doctor en Farmacia. Académico de Número de la Real Academia Nacional de Farmacia y su actual Secretario. Es Profesor de Química Inorgánica y Bioinorgánica en la Facultad de Farmacia de la Universidad Complutense. El trabajo lo ha realizado en colaboración con doña María López García, alumna interna del Departamento.

Con el término fotovoltaico se designan distintos fenómenos y tecnologías que permiten la conversión directa de la energía de la radiación solar en energía eléctrica mediante el empleo de unos dispositivos llamados células solares.

Aunque el efecto fotovoltaico fue descubierto por el francés Edmund Becquerel en 1839, no fue hasta 1941 cuando se fabricó la primera célula solar de selenio en que se conseguía una eficiencia del 1%. Desde entonces, se han ido produciendo importantes avances, impulsados inicialmente por la carrera espacial, que han hecho de la tecnología fotovoltaica una tecnología madura y fiable. Los rendimientos en células especiales de laboratorio y de baja radiación superiores al 30% y la tecnología del silicio monocristalino, se han convertido en la tecnología líder, consiguiendo rendimientos de hasta el 17% sin concentración en células comerciales.

En la actualidad, se trabaja en nuevas tecnologías buscando la reducción en los costes, que siguen siendo relativamente elevados, para competir con la energía eléctrica producida en centrales térmicas. El precio de las instalaciones conectadas a red se ha reducido considerablemente en las últimas décadas, pasando de más de 30 dólares/ $W_p$  en 1980 a 6 dólares/ $W_p$  en 1998; 10 dólares correspondían al coste de los paneles y los 20 dólares restantes a otros gastos, mientras que en 1998, de los 6 dólares/ $W_p$ , 3,5 dólares correspondían al coste de los paneles y 2,5 dólares eran debidos a otros gastos.

A pesar de que el mercado fotovoltaico ha estado restringido prácticamente a instalaciones aisladas, éstas han permitido un rápido crecimiento de la capacidad de producción de la industria fotovoltaica, pasando de los 15 MW<sub>p</sub> en 1980 a más de 150 MW<sub>p</sub> en 1998.

Motivados por los problemas ambientales del sector energético y concretamente por los compromisos adquiridos para la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>, los gobiernos de la Unión Europea se han lanzado en apoyo decidido de las energías renovables siguiendo las directrices recogidas en el libro blanco de las Energías Renovables. Bajo la premisa de que el coste de los sistemas fotovoltaicos se mantiene elevado porque el mercado es reducido y, que este mercado no se expande debido a los elevados costes de las instalaciones, el sector fotovoltaico se haya en un círculo vicioso difícil de romper, si las administraciones públicas no intervienen directamente mediante subvenciones y garantías de venta de la energía producida y con precios especiales que permitan una relativa rentabilidad. Esto explica las subvenciones y apoyos que actualmente recibe el sector fotovoltaico y las instalaciones fotovoltaicas conectadas a la red eléctrica. En esta situación se plantea como objetivo para el año 2010 alcanzar una producción mundial de 1GW<sub>p</sub>.

Gran parte de la producción mundial que no disfruta de los beneficios de la energía eléctrica vive en zonas rurales no electrificadas caracterizadas por una gran dispersión y bajas densidades de población. En estas zonas no resulta económicamente rentable la extensión de la red eléctrica, siendo la solución fotovoltaica un solución muy interesante, especialmente para instalaciones de potencias inferiores a 1 kW, que suelen ser las más demandadas. Es esta la razón por la que la energía solar fotovoltaica cumplirá un importante papel en la electrificación de zonas rurales y en la universalidad del acceso a la energía eléctrica y a los servicios que esta proporciona.

## PRINCIPIOS DE OPERACIÓN

Las células fotovoltaicas convierten la energía de la luz en energía eléctrica. El proceso de producción de corriente en un material sólido con la ayuda de la luz solar, no fue entendido completamente hasta 1939. El rendimiento de conversión es fundamental en los dispositivos fotovoltaicos y hace de la energía solar fotovoltaica una energía más competitiva que otras fuentes. Los primeros dispositivos fotovoltaicos tenían rendimientos del 1%-2%, mientras que en la actualidad los módulos fotovoltaicos comerciales tienen rendimientos del 7%-17% en función de su tecnología.

La Figura 1 ilustra los principios de operación de una célula fotovoltaica hecha de materiales semiconductores (normalmente silicio). Son especialmente tratados para formar dos capas diferentemente dopadas (tipo p y tipo n) que forman un campo eléctrico, dando lugar a una cara positiva y otra negativa. Cuando la

luz solar incide en la célula se liberan electrones que pueden ser separados por el campo eléctrico, dando lugar a una corriente eléctrica. Una célula fotovoltaica típica de 100 cm<sup>2</sup> puede producir en torno a 1,5 W (0,5 V y 3 A).

Un módulo fotovoltaico consiste en un conjunto de células fotovoltaicas eléctricamente conectadas unas a otras, encapsuladas, montadas en un laminado y una estructura soporte o marco. Los módulos están diseñados para suministrar electricidad a un determinado voltaje (normalmente 12 ó 24 V). La corriente producida depende del nivel de insolación. La estructura del módulo protege a las células del medio ambiente, haciendo que sean muy duraderas y fiables.

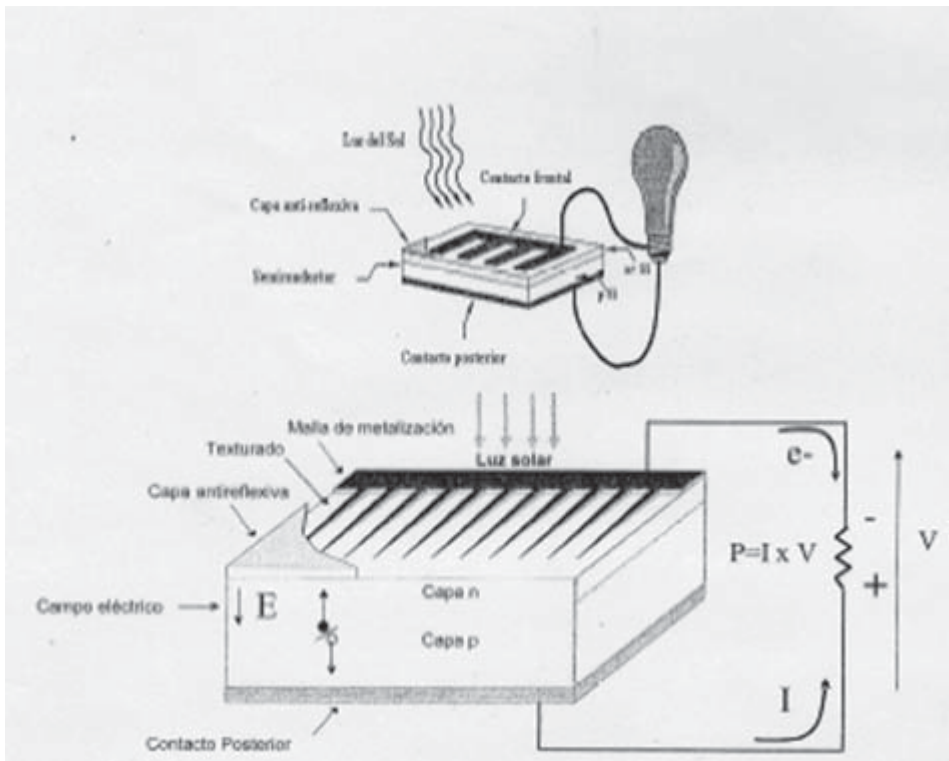


FIGURA 1. Principios de operación de una célula fotovoltaica.

Aunque un solo módulo puede ser suficiente para muchas aplicaciones, es habitual conectar dos o más módulos para formar un generador fotovoltaico. Los generadores o módulos fotovoltaicos producen corriente continua (DC) y pueden ser conectados en serie y/o en paralelo para producir cualquier combinación de corriente y tensión, hasta alcanzar la potencia necesaria para cada aplicación.

Un módulo o generador fotovoltaico por sí mismo no bombea agua ni ilumina una casa durante la noche. Para ello, es necesario un sistema fotovoltaico completo que consiste en un generador fotovoltaico junto a otros componentes, conjuntamente conocidos como «restos del sistema» o BOS (del inglés balance of system). Los sistemas fotovoltaicos se pueden clasificar como autónomos o conectados a la red eléctrica, o según el tipo de aplicación como: electrificación rural (lugar de difícil emplazamiento y acceso, viviendas de uso temporal, refugios de montaña), electrificación urbana (alumbrado de vías urbanas y de edificios públicos como museos o colegios), electrificación domésticas, telecomunicaciones espaciales, telecomunicaciones terrestres, agrícolas y ganaderas, de seguridad y señalización, centrales eléctricas y otras como detección de incendios, combustible para vehículos, etc.

## LA CÉLULA FOTOVOLTAICA

En 1839 el físico experimental Edmund Becquerel, a los diecinueve años de edad observó que ciertos materiales, cuando eran expuestos a la luz, producían corriente eléctrica. Esto es conocido actualmente como el efecto fotovoltaico. Este efecto fue estudiado en sólidos, como el selenio, por Heinrich Hertz en 1870. Las células de selenio convertían la luz en electricidad con rendimientos del 1% al 2%, por lo que fueron rápidamente utilizadas en los campos de la fotografía y en dispositivos para la medida de la luz. Los principales avances para su comercialización se produjeron a partir de 1940, cuando se desarrolló el proceso Czochralski para producir silicio monocristalino de alta pureza. En 1954, los científicos Chapin, Fuller y Pearson de los laboratorios Bell, basándose en el proceso Czochralski, desarrollaron la primera célula fotovoltaica monocristalina con un rendimiento del 6%.

Aunque en los años 1950 hubo algunos intentos de utilizar células de silicio en productos comerciales, fue en el desarrollo de la tecnología espacial donde encontró su principal aplicación. En 1958, el satélite espacial Vanguard contaba con un pequeño generador fotovoltaico para alimentar su radio. En la actualidad las células fotovoltaicas satisfacen las necesidades energéticas de casi todos los satélites y la energía fotovoltaica continúa jugando un importante papel en la tecnología aeroespacial.

La industria electrónica, especialmente la tecnología de transistores de semiconductores, también contribuyó al desarrollo de las células fotovoltaicas. Los transistores y las células fotovoltaicas están hechas de materiales similares y operan basándose en mecanismos físicos también similares. Como resultado, se produce una transferencia de tecnología de los avances en la investigación de los transistores.

A pesar de estos avances, los dispositivos fotovoltaicos de los años setenta eran todavía demasiado caros para usos terrestres. Las crisis energéticas de años

posteriores hicieron renacer el interés en estos dispositivos con grandes inversiones económicas en todo el mundo en investigación, desarrollo, producción y demostración.

## FUNDAMENTOS DE LAS CÉLULAS SOLARES

### 1. Estructura de bandas y materiales semiconductores

Según la teoría cuántica, los electrones de un átomo pueden poseer únicamente determinados valores o niveles de energía. En un sólido de estructura cristalina, las órbitas de los electrones de diferentes átomos se solapan parcialmente e interaccionan entre sí, de forma que los niveles de energía permitidos se convierten en bandas de energía, constituidas por un conjunto continuo de niveles de energía próximos. A muy bajas temperaturas (alrededor de 0 K), los electrones de los átomos ocupan los menores valores de energía posibles, es decir, llenan todos los niveles inferiores. Recibe el nombre de banda de valencia la banda de mayor energía que, a esta temperatura, permanece completamente llena, esto es, con la totalidad de sus niveles energéticos ocupados por electrones. A la banda de energía inmediatamente superior, completamente vacía a dicha temperatura, se la denomina banda de conducción. Ambas pueden estar separadas por una banda prohibida, inaccesible para los electrones.

En los sólidos conductores, las bandas de valencia y de conducción están solapadas, con lo que los electrones están dotados de una gran movilidad al disponer, en la práctica, de una única banda de niveles de energía ocupada tan sólo parcialmente. En los sólidos aislantes, en cambio, la banda de valencia está completamente llena, y la de conducción completamente vacía, siendo la banda prohibida que las separa muy ancha, con lo que es necesario un gran incremento de energía (del orden de unos 7 eV) para pasar un electrón de la banda de valencia a la de conducción.

Los materiales semiconductores, en cambio, si bien poseen una disposición de bandas de energía análoga a la de los aislantes, la anchura de la banda prohibida es considerablemente menor (normalmente inferior a unos 3 eV). La anchura de este salto,  $E_g$ , es una característica fundamental de los semiconductores (Figura 2). En la Tabla I se indica los saltos energéticos de los principales semiconductores, resaltándose en cursiva los que son más utilizados para el aprovechamiento fotovoltaico de la energía solar. El silicio, Si, es, con diferencia, el material semiconductor más empleado, siendo, además, uno de los elementos químicos más abundantes de la corteza terrestre.

TABLA I. *Salto energético de los principales semiconductores*

<i>Semiconductor</i>	$E_g$ (eV)
Te	0,33
Ge	0,67
$CuInSe_2$	1,05
<i>Si cristalino</i>	1,12
$Cu_2S$	1,20
<i>InP</i>	1,34
<i>GaAs</i>	1,42
<i>CdTe</i>	1,45
CdSe	1,72
<i>Si amorfo</i>	1,75
$Cu_2O$	2,10
GaP	2,25
CdS	2,42
$TiO_2$	3,00

Existen fundamentalmente dos tipos de semiconductores: los semiconductores intrínsecos, que conducen la corriente eléctrica debido a las características de su estructura atómica, y los conductores extrínsecos, que aumentan su conductividad a base de añadir a un semiconductor intrínseco, ciertas impurezas.

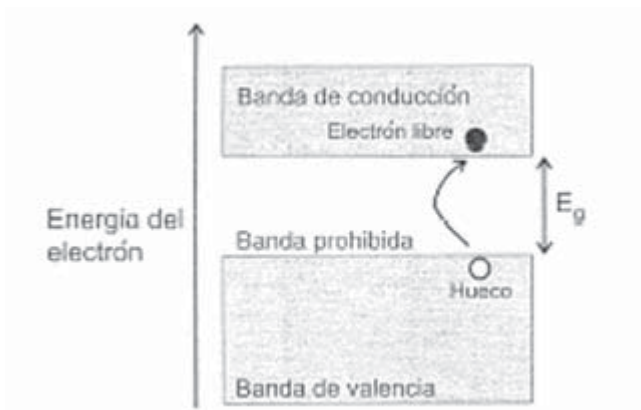


FIGURA 2. *Salto energético en los semiconductores.*

Los semiconductores intrínsecos más importantes son silicio y germanio, siendo el primero el constituyente fundamental de los sistemas solares fotovoltaicos. Ambos son elementos con valencia 4, esto es, poseen cuatro electrones

en la capa de valencia y poseen estructura cristalina cúbica. Son, además, sólidos covalentes, por lo que sus átomos están ligados por electrones de valencia compartidos (similares a lo que sucede en el enlace covalente entre moléculas). Cada uno de los cuatro átomos más próximos a un átomo determinado forma con éste un enlace covalente constituido por un intercambio de dos electrones, uno en cada átomo. Se establecen en total cuatro enlaces covalentes con ocho electrones compartidos, que forman parte de la banda de valencia. A temperatura de 0 absoluto, los electrones no se hayan sometidos a vibración externa y permanecen fijos en la banda de valencia, mientras que la banda de conducción está totalmente vacía, con lo que los semiconductores intrínsecos se comportan como aislantes perfectos. Cuando al aumentar la temperatura u otra causa, la energía cinética de un electrón alcanza el valor correspondiente a la energía de activación (la energía necesaria para superar la banda prohibida es 1,12 eV para el Si), el electrón abandona su estado en la banda de valencia y pasa a ocupar un estado en la banda de conducción, comportándose a partir de ese momento como un electrón libre de un metal; al aplicar una diferencia de potencial en los extremos del semiconductor, el electrón se desplaza en el sentido contrario al del campo eléctrico formado. En la banda de valencia a su vez, se ha creado un vacío o hueco correspondiente al nivel de energía que ha dejado vacante el electrón, que puede ser ocupado por electrones de la banda de valencia, con lo que se origina, bajo la acción del mismo campo eléctrico, una corriente de los electrones de valencia, de forma que el hueco y la carga positiva a la que equivale, se desplazan en la misma dirección del campo eléctrico. Así pues, un semiconductor intrínseco conduce la electricidad debido al desplazamiento, en sentidos opuestos, de huecos y electrones libres, ambos en igual número.

Una forma de conseguir que existan electrones libres en la banda de conducción es a base de introducir impurezas en el semiconductor intrínseco, es decir, dopándolo, dando lugar a un semiconductor extrínseco (Figura 3).

Se describe seguidamente este proceso para el caso habitual del silicio. Los cristales de silicio forman una red cristalina en la que, debido a sus cuatro electrones de valencia, cada átomo se enlaza con los cuatro vecinos más próximos situados en los vértices de un tetraedro. Tal y como se ha explicado y de acuerdo con la teoría cuántica, la energía de los orbitales de valencia que forman los enlaces corresponde a un conjunto de estados que forman la banda de valencia. La banda energéticamente superior a ésta es la banda de conducción, separada por un salto energético o banda de energías prohibidas (gap). Supongamos que algunos átomos de fósforo se añaden al crisol de silicio fundido en el que se creará el cristal. Los átomos de fósforo poseen cinco electrones de valencia, cuatro de ellos formarán enlaces con el silicio circundante, pero a temperatura ambiente el quinto pasará a la banda de conducción, quedando las impurezas de fósforos ionizadas con carga positiva. Este tipo de impurezas se conoce como impurezas donadoras.



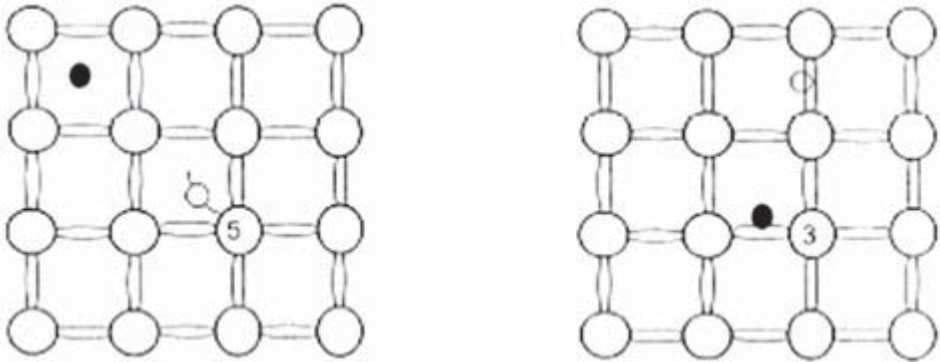


FIGURA 3. Impurezas donadoras y aceptoras en el Si. Impureza donadora a la izquierda y aceptora a la derecha.

Los electrones en la banda de conducción son móviles, con lo que el semiconductor adquiere cierta conductividad debido a las cargas negativas, denominándose semiconductor de tipo n (por tener predominancia de portadores de carga negativas: electrones). Se produce una situación similar aunque complementaria, cuando las impurezas introducidas son átomos de boro; este átomo tiene tres electrones de valencia. A temperatura ambiente, prácticamente todos los átomos de boro han captado un electrón de la banda de valencia y poseen, por tanto, carga negativa, quedando en dicha banda de valencia los huecos correspondientes, que actúan como partículas cargadas positivamente. Este tipo de impurezas se llaman impurezas aceptadoras, y un semiconductor con estas características eléctricas se denomina semiconductor de tipo p (por tener predominancia de portadores de carga positivos: huecos).

## 2. Unión entre semiconductores

El funcionamiento de la célula solar se basa en la formación de uniones entre materiales semiconductores con distintos dopajes; estas uniones generan un campo eléctrico. Se denomina unión p-n (Figura 4), al contacto de una zona de tipo p con una zona de tipo n de un mismo semiconductor, no presentándose en la unión discontinuidad notable de la red cristalina.

La primera de dichas zonas tiene mayoría de huecos libres como portadores de carga, con los correspondientes iones negativos ligados a la red cristalina; la otra zona, de tipo n, tiene en cambio, una mayoría de electrones libres como portadores de carga y los correspondientes iones positivos ligados. Al poner en contacto un semiconductor tipo p con uno tipo n, la movilidad de los electrones en el segundo hace que estos se difundan hacia el primero, dejando atrás una capa positivamente cargada por los átomos donantes. De forma análoga, los huecos se difunden hacia la zona tipo n dejando una zona cargada negativamente. Próxima



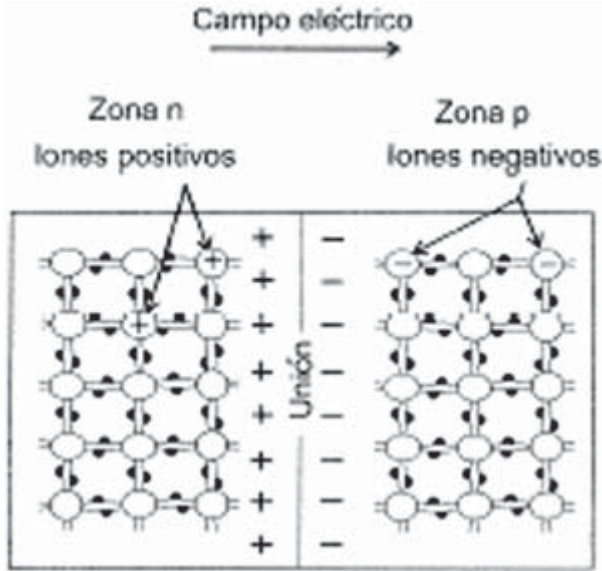


FIGURA 4. Zonas p y n y unión entre ellas.

a la unión se origina pues, una zona sin prácticamente cargas móviles. De este modo, suponiendo el cristal aislado, las cargas fijas de los átomos donantes dan lugar al establecimiento de una diferencia de potencial estática de equilibrio entre ambas regiones, que impide la continuación de las corrientes de difusión de unos y otros portadores a través de la unión y, por tanto, la igualación de las concentraciones de portadores de carga de ambas zonas. La diferencia de potencial generada es del orden de 0,5 V en el caso del silicio. El campo eléctrico creado en esta unión, empuja a nuevos electrones y huecos promovidos a la banda de conducción a moverse en direcciones opuestas, siendo expulsados fuera de la zona de unión, de modo que si se conecta un circuito eléctrico exterior se establece una corriente eléctrica originada por los electrones que han sido expulsados por el campo eléctrico y que, tras recorrer el circuito eléctrico externo vuelven a entrar en el semiconductor por la cara opuesta.

### 3. Absorción de la luz y efecto fotovoltaico

Una célula fotovoltaica convencional de silicio se fabrica a partir de una barra cristalina de silicio dopado con boro, cortado en discos de un espesor de 0,3 mm. Una de sus caras se coloca en una atmósfera gaseosa, a alta temperatura, rica en fósforo, con el que, mediante procesos de difusión, se consigue una elevada concentración de fósforo en dicho extremo (en un espesor entre 0,3 y 1 mm aproximadamente), superior a la concentración inicial de boro. Con ello,

se constituye una unión p-n, fundamento de la célula solar fotovoltaica. Seguidamente, se deposita una rejilla conductora metálica sobre esta cara, y una capa metálica conductora sobre la capa opuesta, a fin de que actúen de electrodos colectores de las cargas eléctricas generadas y para establecer las conexiones eléctricas entre células (Figura 5).

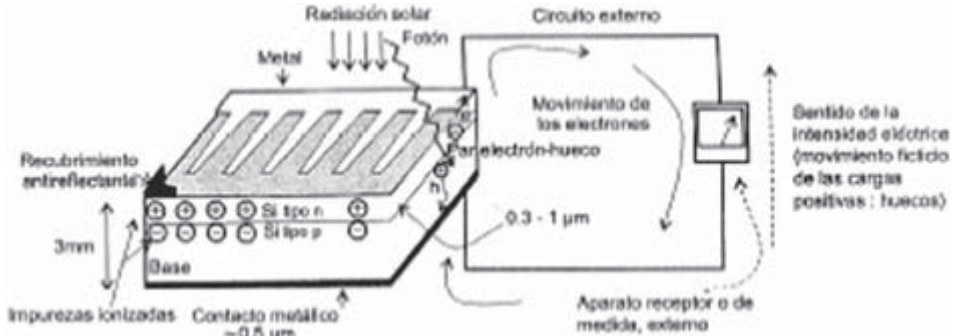


FIGURA 5. Célula convencional de silicio.

Cuando un flujo de fotones incide sobre la célula construida a partir de la unión entre semiconductores tipo p y n, parte de ellos son absorbidos en el material. Los fotones que poseen una energía mayor al salto energético entre la banda de conducción y la banda de valencia pueden ser absorbidos y forzar el salto de un electrón entre estas dos bandas. Como este salto deja un hueco en la banda de valencia, se dice que la absorción de un fotón genera un par electrón-hueco. Si esta generación tiene lugar a una distancia de la unión inferior a la denominada longitud de difusión, existe una alta probabilidad de que estos portadores de carga eléctrica (el electrón y el hueco), sean separados por el elevado campo eléctrico existente en la unión p-n, produciéndose la separación de ambas cargas; el electrón se desplaza hacia la zona n y el hueco hacia la zona p, creándose con ello una corriente de electrones desde la zona n a la zona p. Si se conectan ambas regiones mediante un circuito eléctrico exterior, se establece una corriente eléctrica a través de éste. En esto consiste, precisamente, el efecto fotovoltaico; es la conversión directa según el mecanismo que se acaba de explicar, de radiación electromagnética en corriente eléctrica, mediante un dispositivo llamado célula fotovoltaica.

El salto energético entre bandas limita la porción de radiación que puede ser absorbida en un semiconductor. Una célula de silicio puede aprovechar alrededor de un 65% de la radiación solar recibida. En este caso de células construidas a partir de otros semiconductores, con distinta anchura energética de la banda prohibida, la energía mínima de los fotones de luz incide para producir pares electrón-hueco es distinta, así como la fracción de la energía incidente que pueda aprovechar.

Inmediatamente después de su creación, el electrón y el hueco puede recombinarse y decaer a sus estados iniciales, no pudiendo ser aprovechados para generar corriente eléctrica. Existe una elevada probabilidad de que esto suceda si la longitud de difusión es muy corta, en cuyo caso en un corto recorrido se producirá la recombinación del electrón y el hueco, de forma que la energía luminosa que, en un principio fue absorbida para crear el par, se recupera en forma de calor, hecho no deseable en las células fotovoltaicas, pues es este uno de los mecanismos más importantes de pérdidas en las células solares. Por este motivo, los pares de portadores creados en las zonas más alejadas de la unión p-n tendrán pocas posibilidades de alcanzar la unión y contribuir a la generación de corriente eléctrica, a menos que la longitud de difusión sea lo suficientemente grande, para lo cual se precisa que el cristal del semiconductor (típicamente silicio), sea estructural y químicamente muy puro, esto es, monocristal y con bajísima concentración de impurezas, distintas de las impurezas donadoras y aceptoras.

El efecto fotovoltaico se produce de forma prácticamente instantánea, de forma que las células fotovoltaicas generan electricidad inmediatamente después de ser iluminadas. La separación del par electrón-hueco generado por un fotón y, por tanto, la producción de energía eléctrica, sólo puede tener lugar si la energía electrostática de las cargas, después de su separación, no excede la energía del par en el semiconductor, igual al salto energético de la banda prohibida (gap),  $E_g$ . Esto fija un valor máximo para la tensión de forma que:

$$E_g = qE \times V$$

Siendo  $V$  la tensión entre los terminales de la célula solar ( $V$ ) y  $qE$  la carga eléctrica del electrón.

En otras palabras, la tensión máxima de una célula solar, expresada en voltios,  $V$ , es numéricamente igual al salto energético del ancho de la banda prohibida del semiconductor, expresada en eV, pues  $V = E_g/qE$ . En la práctica, la tensión en los terminales de una célula solar es bastante menor a la teóricamente obtenible mediante la expresión anterior, si bien ambas están directamente relacionadas, de modo que, a mayor ancho de banda de un semiconductor, mayor es la tensión real que se obtendrá entre sus terminales.

Muchos semiconductores son buenos absorbentes de luz y captan todos los fotones con energía por encima del salto de bandas en una capa de unas pocas micras. Son los llamados semiconductores de salto de banda directos o gap directo. El silicio cristalino, entre otros, sigue un proceso de absorción más complejo. En éste, un cuarto de las vibraciones de la red debe participar en la conversión de un fotón en un par electrón-hueco para conservar el momento. Esto disminuye notablemente la capacidad de absorción y son necesarios varios cientos de micras de grosor para alcanzar absorciones elevadas. Estos semiconductores son llamados de salto de banda indirecto o gap indirecto.

## TECNOLOGÍAS DE FABRICACIÓN

El silicio es el material más conocido y utilizado para la fabricación de células con aplicaciones comerciales, siendo a la vez uno de los materiales más abundantes en la corteza terrestre, 20%, en forma de minerales de  $\text{SiO}_2$  y silicatos. Sin embargo, para la producción de células solares se necesita material de elevada pureza, que hay que fabricar. El silicio es un elemento muy resistente a ataques químicos excepto a una mezcla de HF y  $\text{HNO}_3$ , y es soluble en KOH y NaOH. Cuando se expone al aire, se forma casi inmediatamente una capa de óxido,  $\text{SiO}_2$ , de 10 a 20 Å, que aumenta gradualmente a 50-60 Å.

En el silicio monocristalino, la estructura atómica del material es uniforme, ya que su estructura completa ha sido crecida de un único cristal. Esta uniformidad es ideal para la transferencia de electrones a través del material de un modo eficiente. Por otro lado, el silicio multicristalino está formado por un conglomerado de estructuras macrocristalinas, en cuyas uniones o fronteras de grano se impide el paso de los electrones en procesos recombinativos. No obstante, su proceso de fabricación es mucho más barato y los rendimientos de los dispositivos comerciales se acercan bastante a los del silicio monocristalino.

Conceptualmente se pueden diferenciar dos tecnologías: la del silicio cristalino y las tecnologías de lámina delgada.

La transformación de arena en silicio de elevada pureza se puede realizar a través de los siguientes pasos:

1. Reducción de  $\text{SiO}_2$  a Si de baja pureza con C en hornos de arco eléctrico.
2. Transformación en un compuesto químico intermedio como el triclorosilano.
3. Purificación por destilación u otros medios.
4. Reducción del compuesto intermedio a Si con bajo contenido en impurezas.
5. Crecimiento cristalino, con purificación adicional.

Con estos pasos, se pueden conseguir niveles de impurezas en el intervalo de partes por millón. Es necesario prestar especial atención a la presencia de elementos que actúan como fuertes elementos de recombinación tales como Au, Cu y Fe.

## SILICIO CRISTALINO Y MULTICRISTALINO

El elemento base de la fabricación de las células fotovoltaicas es el silicio, muy abundante en la corteza terrestre. El silicio policristalino de grado semiconduc-

tor, utilizado por la industria microelectrónica, y de grado solar, es de menor pureza (1 ppma) y más barato. Hasta el momento los fabricantes de células han satisfecho un 70% de sus necesidades con excedentes de silicio de grado semiconductor.

Mediante métodos de cristalización del polisilicio se obtienen las obleas utilizadas en la industria fotovoltaica. En estos procesos de cristalización se logran en unos casos monocristales, dando lugar al silicio cristalino, mientras que en otros el resultado es un conglomerado de cristales, llamado silicio multicristalino. Existen varios métodos para la obtención de lingotes de silicio cristalino, basados en una semilla de inicio de la cristalización, tales como el método de zona flotantes (FZ), el método de Czochralski (CZ) o métodos de colada. Estos lingotes se cortan para producir obleas mediante sierras multi-hoja.

En el proceso de Czochralski se parte de polisilicio fundido en un crisol, se pone una semilla en contacto con su superficie y se eleva y se hace rotar lentamente sobre sí misma, obteniéndose unos lingotes cilíndricos monocristalinos.

En el proceso de Zona Flotante (FZ) se produce un cristal más puro que en el anterior, debido a la no contaminación del crisol. Este método consiste en fundir localmente una barra de polisilicio mediante una bobina de radiofrecuencia, partiendo de un extremo donde se coloca la semilla de crecimiento del monocristal.

Los lingotes de material monocristalino o multicristalino obtenido han de cortarse en obleas de silicio, de espesor igual al espesor de una célula, 300  $\mu\text{m}$ , en un proceso de corte en que se llega a despreñar hasta el 20% del material. Actualmente, también se están utilizando nuevos procesos alternativos de crecimiento de silicio cristalino en láminas (células crecidas por el borde), en las que se minimiza el Si desperdiciado en el corte de la oblea tradicional.

## FABRICACIÓN DE UNA CÉLULA CONVENCIONAL

Los pasos en la fabricación de una célula fotovoltaica convencional a partir de una oblea de silicio son:

*Limpieza de las obleas.* Cuya finalidad es la limpieza previa que elimine los restos de metales procedentes de las sierras de corte y restos orgánicos y metálicos procedentes de los procesos de fabricación de las obleas. Para estas limpiezas se utilizan ácidos con gran capacidad de disolver metales como el HCl, HNO<sub>3</sub> o combinaciones del tipo HCl + H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y NH<sub>4</sub>OH + H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>.

*Decapado.* Que se realiza por inmersión de las obleas en una disolución acuosa de NaOH al 30% y caliente. El objetivo es la eliminación de las tensiones, irregularidades y defectos de la superficie debidos a los procesos de corte de las obleas, eliminando unas micras de material. Con ello, se mejoran los tiempos de vida de los portadores en la región de emisor próximo a la superficie

y se favorecen tratamientos posteriores como la texturización y las metalizaciones que requieren superficies lisas.

*Texturización.* Consiste en crear en la superficie unas micropirámides para conseguir reducir las pérdidas por reflexión del 30 al 10%, obligando a que se produzca una segunda absorción de la luz reflejada. La formación de las micropirámides se consigue atacando la superficie de las obleas cristalizadas en una orientación, con una disolución acuosa de NaOH y de KOH al 2%, dejando al descubierto los planos cristalográficos. Este proceso no es aplicable a las obleas de silicio multicristalino, ya que no poseen una orientación definida. En estos casos, las pérdidas por reflexión se reducen mediante capas antirreflexivas. Los efectos de la texturización son dobles, por un lado se reducen las pérdidas por reflexión por incidencia múltiple y además aumenta el camino óptico de la luz en el interior del material, incentivando la fotogeneración cerca de la unión p-n y aumentando el rendimiento cuántico.

*Limpieza previa a la formación de la unión p-n.* Consiste en la eliminación del óxido superficial resultante de los anteriores procesos mediante la inmersión en HF diluido, posterior aclarado con agua desionizada y un secado rápido final.

*Predeposición de dopante.* Las obleas de partida suelen ser de tipo p (dopadas con Bromo). La unión p-n se hace por difusión de dopante tipo n (normalmente fósforo) en la cara frontal de la oblea. Previamente a la difusión el dopante tipo n ha de ser depositado en la superficie de la oblea. Se utilizan varios métodos como: serigrafía, centrifugación, por fuente sólida, por fuente líquida o por fuente gaseosa.

*Formación de la unión p-n por difusión.* Que consiste en la introducción del dopante tipo n, predepositado, substituyendo átomos de silicio en el interior de la red. Para ello se introducen en hornos (de cinta o de cuarzo) a altas temperaturas (900 a 1.000° C). Los productos químicos empleados como fuente primaria de fósforo son: el Oxiclورو de Fósforo, Pentóxido de Fósforo y Fosfina.

*Limpieza de restos de la difusión.* Cuyo proceso depende de la tecnología usada en la formación de la unión y, suelen constar de una batería de baños químicos con diversos ácidos (HF, HCl).

*Formación del contacto metálico posterior.* Deposición de metal realizada mediante serigrafía.

*Formación del contacto metálico frontal.* Similar al anterior, pero en este caso la disposición de los dedos de contacto es determinante en el rendimiento final, estableciendo un compromiso entre el haz de la luz y la superficie necesaria para disminuir la resistencia serie.

*Aislamiento de las zonas n y p.* Que consiste en preparar los bordes de las células resultantes de los procesos anteriores mediante ataques químicos o cortes con sierra o láser, para que el emisor y la base no estén conectados eléctricamente, debido a que el dopante de la cara frontal también se difunde por los bordes.

*Deposición de la capa antireflexiva.* Consiste en el deposición de una capa fina de un material transparente con índice de refracción óptimo  $n = 2,3$ , para adaptar los índices de refracción del silicio ( $n = 3,6$  como valor promedio) y el vidrio ( $n = 1,5$ ). Además, el índice de refracción de los materiales encapsulantes entre la capa antireflexiva y el vidrio ha de ser  $n = 1,5$ . El espesor de la capa se elige igual a  $\lambda/4$ , para producir un cero de reflexión a la longitud de onda, por sumarse en la superficie de la capa la onda incidente y la reflejada en oposición de fase. Ésta se elige en función de la respuesta espectral de la célula y del espectro solar, maximizando la absorción de fotones, que suele tomar un valor de  $\lambda = 0,4 \mu\text{m}$ , con el objeto de minimizar la reflexión a una longitud de onda de  $0,6 \mu\text{m}$ , que coincide con el máximo del espectro solar. A otras longitudes de onda la reflexión se incrementa, no siendo superior al 20%-30%, para cualquier longitud de onda. Se utilizan materiales como el  $\text{SiO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$  o  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ ,  $\text{SiN/Si}$ ,  $\text{F}_2\text{Mg/SZn/Si}$ . El silicio pulido tiene coeficientes de reflexión entre el 33% y el 54% en el intervalo espectral de interés ( $0,35 \mu\text{m}$ - $1,1 \mu\text{m}$ ). Una capa antireflexiva disminuye esta reflexión en promedio al 10%, dos pueden reducirla al 3%. La combinación de capas antireflexivas con procesos de texturado (formación de micropirámides) reducen las pérdidas de reflexión al 3% y al 0,7%, con una y dos capas, respectivamente.

*Campo superficial posterior.* Consiste en la formación de una unión p-p<sup>+</sup> en la parte posterior para formar un campo eléctrico, lo que disminuye la recombinación de portadores minoritarios en la superficie posterior.

*Pasivación con hidrógeno.* Utilizado en células multicristalinas, consiste en la neutralización con hidrógeno de la gran cantidad de defectos y dislocaciones (niveles adicionales en el gap), aumentando el tiempo de vida de los portadores minoritarios.

Con el objetivo de aumentar el rendimiento de las células a lo largo de la historia se han ido mejorando o proponiendo nuevos dispositivos de diseño avanzado como las células de emisor profundo, células de contactos enterrados, células de emisor y contacto posterior pasivados o células de contactos posteriores puntuales. Mientras que el rendimiento de las células de laboratorio están en el intervalo del 18% al 23%, el rendimiento del módulo comercial se sitúa entre el 12-16%.

Las células tienen un espesor entre  $100$ - $500 \mu\text{m}$ . Aunque  $100 \mu\text{m}$  son suficientes para unas células con buena absorción de la luz y pasivación de la superficie posterior, se utilizan espesores mayores debido en parte a motivos de facilidad de manipulación en el proceso de fabricación, disminuyendo el índice de roturas. De hecho se pueden fabricar células con rendimientos del 12% con espesores de célula de  $50 \mu\text{m}$ .

El material de partida suele ser silicio tipo p (base), con un dopaje tal que posea una resistividad desorden de  $1 \Omega/\text{cm}$ . El silicio tipo n posee menor recombinación en superficie, por lo que se sitúa en la parte frontal y tiene una



resistividad del orden de  $100 \Omega/\text{cm}$ . Se dopa lo suficiente para mejorar la conductividad del silicio, pero sin reducir la calidad del material, evitando que los portadores se recombinen antes de llegar a la unión. El espesor del emisor es de  $0,1 \mu\text{m}$ - $0,5 \mu\text{m}$ , con el objeto de que la mayor parte de los portadores generados por los fotones incidentes lo hagan a distancias inferiores a la longitud de difusión. De este modo aumenta la probabilidad de colección (cuando un portador generado llega a la unión p-n, su probabilidad de poder ser extraído de la célula es la unidad). La malla de metalización, cuyos dedos tiene una anchura entre  $20$  a  $200 \mu\text{m}$ , separados  $1$ - $5 \text{ mm}$ , tiene como objetivo la conducción de la corriente. Su diseño ha de estar optimizado, manteniendo un compromiso entre el área sombreada y la resistencia del metal. Suelen estar compuesta por Ti ( $400 \text{ \AA}$ )/Pd ( $200 \text{ \AA}$ )/Ag ( $5 \mu\text{m}$ ). Se suele añadir una capa de soldadura de Pb-Sn para proporcionar la suficiente sección con el fin de disminuir la resistencia serie. El contacto posterior no necesita ser transparente, pero tiene mucha importancia en el rendimiento de la célula, especialmente a medida que las células se hacen más delgadas. Es habitualmente de aluminio depositado por evaporación al vacío. Se utiliza un proceso de difusión de Al, obteniendo una capa de  $p^+$  que disminuye la resistividad del contacto posterior, y si esta capa  $p^+$  es suficientemente gruesa ( $0,2 \mu\text{m}$  necesita  $4$  horas a  $700$ - $800^\circ \text{ C}$ ), produce un campo posterior que reduce la recombinación superficial.

## BALANCE ENERGÉTICO

Un estudio detallado del método utilizado junto con el cálculo de la producción energética y las emisiones que se dejan de emitir a la atmósfera respecto a la producción de energía mediante carbón, ofrece los resultados que se observan en la Tabla II.

## VIABILIDAD

El modelo de desarrollo económico actual, basado en el uso intensivo de recursos energéticos de origen fósil, provoca impactos medioambientales negativos y desequilibrios socioeconómicos, que obligan a definir un nuevo modelo de desarrollo sostenible. Entre las políticas que pueden articularse para asegurar la sostenibilidad del modelo energético, la política de fomento de las energías renovables se cuenta entre las principales. De este modo, el libro blanco de las Energías Renovables de la Unión Europea sitúa como objetivo general una aportación de las fuentes de energía renovable en un porcentaje del  $12\%$  de la energía primaria demandada en la Unión Europea para el año 2010; que en el caso de energía solar fotovoltaica se sitúa en unos  $3000 \text{ MW}$ , es decir, unas  $100$  veces más que la existente en 1995. En el año 2003, la energía instalada únicamente llegaba a los  $573 \text{ MW}$ , en donde Alemania se situaba número uno con

TABLA II. *Balance energético de una instalación fotovoltaica*

<i>Mes</i>	<i>Energía generada o vertida a red mensualmente (MWh)</i>
<i>Sistema de guiado en dos ejes (Gm = 35%)</i>	
Enero	6,704
Febrero	9,468
Marzo	15,408
Abril	19,033
Mayo	21,742
Junio	24,912
Julio	28,298
Agosto	24,223
Septiembre	19,212
Octubre	12,408
Noviembre	8,108
Diciembre	6,197
<b>Total</b>	<b>195,858</b>
<b>Horas útiles año</b>	<b>1.860</b>
<b>Potencia Pico instalada (kWp)</b>	<b>105,300</b>

el 70% de la producción europea. España se situaba en torno a 37 MW, con un objetivo para el año 2010 en torno a 400 MW.

Del estudio de mercado realizado por el IDAE (Instituto Desarrollo Actividades Energéticas), el sector de la energía fotovoltaica presenta una serie de barreras que podrían impedir el desarrollo correcto del sector. En su Plan de Energía Renovables, 2005-2010, presenta una serie de medidas para reducir las y poder así aminorarlas. Entre las principales destacar:

- Rentabilidad insuficiente - Mantenimiento de las primas establecidas en el Real Decreto 436/2004.
- Limitación de las primas actuales hasta alcanzar los 135 MW - Cambiar este límite a 400.
- Dificultades de conexión de usuarios a alta tensión - Posibilitar conexión a la red a usuarios de alta tensión.
- Falta de incentivos para instalaciones innovadoras - Apoyo a la innovación.
- Trámites administrativos no proporcionados y homogéneos - Coordinación entre CCAA.

Efectivamente, el sector de la energía renovable presenta el problema de estar aletargado, en fase de nacimiento, donde los costes de inversión son tan altos que impiden hacer rentable las instalaciones y muy por debajo de los objetivos marcados por el plan de fomento 1999-2010. Por este motivo, el Gobierno lanzó el Real Decreto 234/2004, por el que se establecía una serie de primas sobre la producción energética para productores de energía en régimen especial (energías renovables), por las que se intenta relanzar el sector, entrar en la fase de crecimiento y conseguir reducir los costes de fabricación. Con estas primas, la viabilidad del proyecto se convierte en un hecho real, y como tal, puede observarse en el altísimo número de solicitudes existentes para instalaciones solares.

Además, los análisis de rentabilidad resaltan una TIR y un período de retorno de la inversión en torno al 7,2% y trece años, respectivamente, sobre una inversión total en torno a los 6 €/Wp. Teniendo en cuenta el tipo de riesgo nulo de este tipo de instalaciones, el proyecto es altamente interesante. Por su lado, las entidades financieras, junto a la posibilidad de rentabilizar el proyecto mediante deuda, pueden fidelizar clientes propios vinculándoles al proyecto, clientes que intentan montar pequeñas instalaciones pero que debido a los problemas expuestos, les son rechazadas.

## CONCLUSIONES

- Estamos ante un sector en fase de nacimiento y con unas expectativas de crecimiento altísimas (los especialistas asumen que para el año 2050 en torno al 60% de la energía consumida procederá de la energía solar).
- El posicionamiento español es conseguir ser el número uno a nivel mundial, al igual que lo es en energía eólica, y desbancar a los actuales países que se encuentran por delante: Japón, Alemania y Países Bajos.

## BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

- (1) Células fotovoltaicas. [http://energienucleara.go.ro/cap\\_07.htm](http://energienucleara.go.ro/cap_07.htm).
- (2) Energía solar fotovoltaica. <http://www.cecua.es/temas%20interes/medio%20ambiente/res&rue/htm/dossier/2%20fotovoltaica.htm>.
- (3) Celdas Solares. [www.textoscientificos.com/energia/celulas](http://www.textoscientificos.com/energia/celulas).
- (4) Photovoltaic cell. [www.sierrasolar.com/ss3/photovoltaic\\_cell](http://www.sierrasolar.com/ss3/photovoltaic_cell).
- (5) Solar Energy. [www.history.rochester.edu/class/solar/cells.htm](http://www.history.rochester.edu/class/solar/cells.htm).
- (6) ÁLVARO, M.; CARBONELL, E.; ATIENZAR, P., GARCÍA, H. (2006): A Novel Concept for Photovoltaic Cells: Clusters of Titanium Dioxide Encapsulated within Zeolites as Photoactive Semiconductors. *Chemphyschem.* 7, 1996-2002.

- (7) FTHENAKIS, V. M. (2005): Life Cycle Analysis: Some Science and Energy Policy Issues. Department of Earth & Environmental Engineering, Fall 2005 Seminar Series, September 30.
- (8) FTHENAKIS, V. M. (2005): Photovoltaics and the Environment, 407th Brookhaven National Laboratory Lecture, Sept. 21.
- (9) FTHENAKIS, V. M. and H. C. KIM, Life Cycle Energy Use and Greenhouse Gas Emissions Embedded in Electricity Generated by Thin Film CdTe Photovoltaics, MRS Conference, Nov. 2005, Boston, MS.
- (11) FTHENAKIS, V. M. and WANG, W. (2005): Advances on Recycling of CdTe and CIGS Photovoltaic Modules, 20th EURPVSEC, Barcelona, Spain, June 6-10.
- (12) FTHENAKIS, V. (2005): Promising Advances in Photovoltaics, Critical Issues Editorial, *Chemical Engineering Progress*, **101** (4), 5.
- (13) WANG, W. and FTHENAKIS, V. M.: Feasibility of Recycling of Cadmium-Telluride Photovoltaics, The Minerals, Metals & Materials Society (TMS) Extraction & Processing Division (EPD) Congress 2005, pp. 1053-1064.
- (14) FTHENAKIS, V. M.; ALSEMA, E., and M. J. DE WILD-SCHOLTEN: Life Cycle Assessment of Photovoltaics: Perceptions, Needs, and Challenges, 31st IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Jan. 3-7, 2005, Orlando, FL.
- (15) TOM MARKVART, LUIS CASTANER (2004): Solar Cells: Materials, Manufacture and Operation. Elsevier.
- (16) M. BURESCH (1983): Photovoltaic energy systems: Design and installation. McGraw-Hill Book Co, 347.
- (17) J. NELSON (2002): The Physics of Solar Cells. Imperial College Press. London.
- (18) YOSHIHIRO HAMAKAWA (2004): Thin-Film Solar Cells: Next Generation Photovoltaics and Its Applications. Springer Series in Photonics. Vol. 13.
- (19) ANTONIO LUQUE (2003): Handbook of Photovoltaic Science and Engineering. Wiley-VCH.
- (20) Photovoltaics in the built environment: a design guide for architects and engineers. Washington, DC. US Dept. of Energy, 1997.