



**Escuela de
Ingeniería y Arquitectura
Universidad Zaragoza**

PROYECTO FINAL DE CARRERA

Investigaciones recientes en células solares

AUTOR

Francisco Javier Pérez-Arados Álamos

DIRECTOR

Lucía García Nieto

DEPARTAMENTO

Ingeniería Química

CENTRO

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

TITULACIÓN

Ingeniería Técnica Industrial

ESPECIALIDAD

Química Industrial

CURSO ACADÉMICO

2010-2011

FECHA

31/08/2011

INDICE

- **Capítulo 1. Tipos y aplicaciones de la energía solar**

- 1.1. *Introducción*

- 1.2. *Energía solar térmica*

- 1.2.1. *Tecnologías de baja temperatura*

- 1.2.2. *Tecnologías de media y alta temperatura*

- 1.3. *Energía solar fotovoltaica*

- 1.3.1. *Fundamentos de las celdas solares y asociaciones.*

- 1.3.2. *Aplicaciones*

- 1.3.3. *Nuevas tendencias*

- **Capítulo 2. Las células solares**

- 2.1. *Principio de funcionamiento*

- 2.2. *Investigación y desarrollo*

- 2.3. *Las cuatro generaciones de células fotoeléctricas*

- **Capítulo 3: Investigaciones recientes en células solares**

- 3.1. *Células solares policristalinas de película delgada*

- 3.1.1. *Opción 1 : Silicio amorfo.*

- 3.1.1.1. *Perspectiva actual*

- 3.1.1.2 *Deposición de películas de silicio amorfo hidrogenado (α -Si:H) por el método del filamento caliente deposición química de vapor (HW-CVD): Función de la temperatura del sustrato.*

- 3.1.1.3. *Procedimientos experimentales*

- 3.1.1.4. *Resultados y discusiones*

- 3.1.1.4.1 *Variación en la velocidad de deposición*

3.1.1.4.2 Análisis espectroscópico FTIR

3.1.1.4.3. Análisis de la espectroscopía de Raman

3.1.1.4.4. Propiedades ópticas

3.1.1.4.5. Propiedades eléctricas

3.1.2. Opción 2 : Telururo de Cadmio

3.1.2.1. Sublimación en espacio cerrado (CSS), un proceso innovador, adecuado para producir módulos de película delgada CdTe/CdS de alta eficiencia

3.1.2.1.1. Estructura de la célula.

3.1.2.1.2. La capa TCO

3. 1.2.1.3. La capa de CdS

3. 1.2.1.4. La capa de CdTe

3.1.2.1.5. Tratamiento de la estructura CdTe/CdS en presencia de Cl₂

3.1.2.1.6. El contacto trasero

3.1.2.1.7. La célula solar CdTe/CdS

3.1.2.1.8. El proceso de fabricación en línea.

3.1.3. Opción 3 : Células solares de Cobre Indio Galio y Diselenuro (CdS / Cu(In, Ga)Se₂ (CdS / CIGS)

3.1.3.1. Resultados recientes (CdS / CuIn_{1-x}Ga_xSe₂)

3.1.3.2. Problemas de fabricación de CIGS

• **Capítulo 4: Células solares de polímero**

4.1. Principios de operación

4.2. El reciente desarrollo de células fotovoltaicas de polímero

4.2.1. Materiales poliméricos células solares

4.2.2. La mezcla P3HT: PCBM

4.2.3. Desarrollos recientes

4.3. Posibles rutas para mejorar el rendimiento

4.3.1. Mejorando la absorción

4.3.2. Mejorar la tensión en circuito abierto

4.3.3. Hacia una morfología controlable

4.3.4. Nuevas estructuras de dispositivos

4.3.5. La estabilidad de las células solares de polímeros

4.3.6. Dispositivo libre de ITO

4.3.7. Procesos de fabricación

4.4. Conclusión y Perspectivas

- **Capítulo 5. Resumen y conclusiones**

- **Capítulo 6. Bibliografía**

6.1. Libros

6.2. Artículos científicos

6.3. Páginas web

Capítulo 1. Tipos y aplicaciones de la energía solar

1.1. Introducción

La energía solar es la fuente principal de vida en la Tierra ya que dirige los ciclos biofísicos, geofísicos y químicos que mantienen la vida en el planeta, los ciclos del oxígeno, del agua, del carbono y del clima. El Sol nos suministra alimentos mediante la fotosíntesis y es la energía del Sol la que induce el movimiento del viento, del agua y el crecimiento de las plantas.

La energía solar es el origen de la mayoría de fuentes de energía renovables, tanto de la energía eólica, la hidroeléctrica, la biomasa, y la de las olas y corrientes marinas, como también de la energía solar propiamente dicha. La energía solar se puede aprovechar pasivamente (energía solar pasiva), es decir, sin la utilización de ningún dispositivo o aparato intermedio, por ejemplo mediante la adecuada ubicación, diseño y orientación de los edificios, empleando correctamente las propiedades fisicoquímicas de los materiales y los elementos arquitectónicos de los mismos tales como: aislamientos, tipo de cubiertas, protecciones, etc. Por medio de la aplicación de criterios de arquitectura bioclimática se puede reducir significativamente, e incluso eliminar, la necesidad de climatizar (calentar y enfriar) los edificios, así como la necesidad de iluminarlos durante el día.

La energía solar es la potencia radiante producida por el Sol, como resultado de reacciones nucleares de fusión, que llegan a la Tierra a través del espacio en cuantos de energía. Estos son llamados fotones, que interactúan con la atmósfera y la superficie terrestre.

La intensidad de la radiación solar en el borde exterior de la atmósfera, si se considera que la Tierra está a su distancia promedio del Sol, se llama constante solar, y su valor medio es de unas 2 cal/min cm^2 . El Sol, en concreto la radiación solar interceptada por la tierra en su desplazamiento a su alrededor, constituye la principal fuente de energía renovable a nuestro alcance. Nuestro planeta recibe del Sol la asombrosa cantidad de energía anual de $5,4 \times 10^{24} \text{ J}$, una cifra que representa 4.500 veces el consumo mundial de energía. Aunque es muy abundante el aprovechamiento de la radiación solar, ésta está condicionada por tres aspectos: la intensidad de radiación solar recibida por la tierra, los ciclos diarios y anuales a los que está sometida y las condiciones climatológicas de cada emplazamiento.

La media anual de recursos de energía solar se suele expresar como la cantidad de energía radiante recibida por unidad de superficie en un tiempo determinado ($\text{kW/m}^2\text{día}$).

La energía solar contiene una componente directa, que es la luz del rayo solar, y una componente difusa, que es la luz que ha sido dispersada por la atmósfera. Esta distinción es importante porque sólo la componente solar directa puede concentrarse fácilmente usando espejos o lentes. La componente directa normalmente representa el 60-80 por ciento de la irradiación solar total en condiciones de cielo despejado y disminuye con el aumento de la humedad, la nubosidad y los aerosoles atmosféricos, tales como penachos de polvo o la contaminación. Las tecnologías que se basan en la componente solar directa, como las plantas CSP (producción de energía por concentración solar) funcionan mejor en áreas con alta irradiación directa normal, que por lo general limita su aplicación a las regiones áridas. Las tecnologías solares de no concentración, como los paneles fotovoltaicos, utilizan tanto la componente directa como la difusa y por lo tanto tienen geográficamente una mayor aplicación.

No obstante, es necesario destacar que la emisión de radiaciones solares es un proceso con grandes variaciones, en muchas ocasiones no previsible, que conllevan cambios bruscos. Además las necesidades de calor son inversamente proporcionales a la cantidad de radiación solar emitida, con exceso de radiación en verano y escasez en invierno, que es cuando la necesidad de calor es mayor.

Para que el uso de la energía solar sea una alternativa energética viable es preciso garantizar el suministro necesario mediante una mejora de los sistemas de captación, acumulación y distribución. El nivel técnico actual de dichos sistemas es muy elevado habiéndose desarrollado grandes avances en todos los campos. Se puede afirmar que las posibilidades técnicas de la energía solar están en un orden muy superior al aprovechamiento actual que se está haciendo de este tipo de energía. Además, la energía solar puede perfectamente ser complementada con otras energías renovables o convencionales lo que haría que se redujesen las necesidades de acumulación en períodos de escasa radiación solar.

La energía solar se puede aprovechar de dos formas diferentes, o bien de una manera directa, aprovechando la generación de calor mediante captadores o colectores térmicos, diseñados para recoger energía, a veces después de concentrar los rayos del Sol, o bien transformándola en energía eléctrica gracias a los paneles fotovoltaicos. Estas dos formas de aprovechamiento determinan los dos tipos de energía solar: Energía solar térmica y Energía solar fotovoltaica.

1.2. Energía solar térmica

Los sistemas de energía solar térmicos son los que aprovechan la radiación solar como un sistema de calentamiento. Dentro de los sistemas térmicos podemos distinguir los sistemas pasivos y los activos.

En los sistemas térmicos pasivos se aprovecha la radiación solar para la climatización de viviendas mediante el diseño arquitectónico. Las viviendas bioclimáticas serían un ejemplo claro de aprovechamiento pasivo de la energía solar.

Los sistemas térmicos activos de energía solar son los sistemas que son capaces de captar la energía de la radiación solar mediante un captador o colector por el que circula un fluido y transferirla a un sistema para su aprovechamiento posterior.

Dependiendo de la temperatura a la que se calienta el fluido caloportador, se puede distinguir entre tecnologías de baja temperatura y tecnologías de media y alta temperatura.

1.2.1. Tecnologías de baja temperatura

La energía solar denominada de baja temperatura es la que acostumbramos a utilizar en el ámbito doméstico y suele instalarse en azoteas de vivienda o edificios comerciales. El procedimiento en el que se basan estos sistemas de captación solar es muy simple, pero a la vez de gran utilidad para el hombre por los servicios que ofrece en multitud de aplicaciones.

Por aprovechamiento de baja temperatura se entiende todos aquellos sistemas de energía solar en los que el fluido calentado no sobrepasa los 100 °C. Estas instalaciones se caracterizan por emplear como elemento receptor de energía un captador fijo de placa plana o un captador solar de vacío.

El calentamiento del agua es una de las aplicaciones que más se está extendiendo ya que une el ahorro energético y el respeto al medio ambiente con una importante rentabilidad económica.

Es posible elevar la temperatura del agua hasta temperaturas muy altas superiores al punto de ebullición (100 °C). Sin embargo son las aplicaciones a baja temperatura (de entre 27 y 80 °C) las más comunes, entre las que destacan:

- *Producción de agua caliente sanitaria (ACS)*

Es con diferencia la principal aplicación de la energía solar térmica, debido a las bajas temperaturas de preparación y a la homogeneidad de su consumo a lo largo del año, lo que hace que las instalaciones de energía solar térmica presenten buenos rendimientos para la producción de agua caliente sanitaria y que también resulte interesante a nivel económico a la hora de disminuir los costes energéticos de una instalación.

Esto también es válido para otras actividades que presenten un consumo regular a lo largo del año de agua caliente a baja temperatura, como puede ser una lavandería, donde se pueden alimentar las lavadoras con agua caliente procedente de la instalación solar en lugar de realizar todo el calentamiento en las propias lavadoras, y también en cocinas, donde existe una demanda de agua caliente en los lavavajillas.

- *Calefacción*

La utilización de la energía solar para calefacción tiene en primer término el inconveniente de que sólo existe demanda de calefacción durante unos meses del año, ya que en el periodo de verano generalmente no existe demanda de calefacción y se obtiene, por lo tanto, un menor aprovechamiento de la instalación. Además, la temporada de calefacción coincide con los meses de menor radiación solar, lo cual también resta rendimiento a estas instalaciones.

Por otra parte, las instalaciones de calefacción que predominan en España tienen como elemento emisor de calor los radiadores convencionales. Este tipo de instalación es en principio inadecuada para su utilización con energía solar pues trabaja con elevados niveles de temperatura, a 70-90 °C, donde los colectores planos presentan rendimientos muy bajos.

Es por ello que se debe recurrir a sistemas especiales para la transmisión del calor al interior de la vivienda, que funcionen a temperaturas más bajas, preferentemente por debajo de los 60°C. Los sistemas más utilizados son el suelo radiante y los fan-coils.

La calefacción mediante suelo radiante consiste en hacer circular agua a baja temperatura bajo el suelo del local a calefactar. El rango de temperaturas del agua para el suelo radiante suele ser de 30-40°C, que lo hace muy apropiado para instalaciones de energía solar.

El sistema de fan-coils se basa en una serie de tubos con aletas por donde circula agua caliente. Una corriente de aire pasa entre los tubos, que calientan esta corriente de aire antes de ser introducida en la habitación. La temperatura del agua para un sistema de fancoils suele ser de 45°C, lo que lo hace también muy apropiado para instalaciones de energía solar.

Otra opción para la utilización de instalaciones de energía solar para calefacción consiste en la utilización de colectores con buen rendimiento a altas temperaturas, como los colectores de vacío. El inconveniente de este sistema es que se encarece sensiblemente el coste de la instalación.

- *Climatización solar*

La climatización de edificios mediante energía solar ofrece una buena posibilidad de aplicación de la energía solar debido a la coincidencia de los periodos de demanda con los meses de mayor radiación solar. Además, la energía solar puede utilizarse también en estas instalaciones como apoyo a la calefacción durante los meses en que no existe demanda de frío.

En la climatización solar se utiliza la energía térmica como fuerza motriz para la producción de frío. Es el llamado frío solar, siendo generalmente la tecnología utilizada para la producción de frío la de las máquinas de absorción.

En las máquinas de absorción para la refrigeración de edificios generalmente se emplea el agua como refrigerante y el bromuro de litio como absorbente. Contrariamente a lo que sucede con los colectores solares, el rendimiento de las máquinas de absorción aumenta al incrementarse la temperatura de trabajo, necesitando temperaturas (80-90°C para las máquinas de absorción de simple efecto) que son difíciles de alcanzar mediante colectores solares planos. Es por ello que hay que recurrir a colectores de alta eficiencia o a tubos de vacío.

Otro aspecto a tener en cuenta es que el ciclo de una máquina de absorción existen calores residuales que se han de evacuar. Este calor de condensación se evacua normalmente mediante una torre de refrigeración o con un aerocondensador (para máquinas de absorción de pequeña potencia).

Aunque en la actualidad los equipos de trabajo se utilizan sobre todo en grandes instalaciones como puede ser el sector industrial o terciario, existen actualmente en el mercado equipos de absorción doméstica de pequeña potencia (5-10 kW) aptos para aplicaciones domésticas. Se espera que en un futuro esta tecnología multiplique las posibilidades de producción de frío en las viviendas.

- *Energía solar para procesos industriales*

Los sistemas de energía solar de baja temperatura pueden llegar a suministrar una parte importante de la demanda industrial de calor. La gran escala de las instalaciones industriales lleva a sistemas de bajo coste, siendo las aplicaciones más interesantes aquellas donde existe una demanda de calor continua a lo largo de todo el año.

Procesos especialmente apropiados son, por ejemplo, el calentamiento de baños para ciclos de lavado, procesos de tintado donde se demanda gran cantidad de agua caliente, calentamiento de aire para procesos de secado, tratamientos químicos, etc. Algunas de estas aplicaciones se detallan a continuación:

- *Precalentamiento de salmuera. La salmuera utilizada en procesos de destilación de agua para su uso en el proceso industrial se puede llevar a la temperatura de uso por medio de placas solares.*
- *Lavandería y suministro de ACS en vestuarios. En sectores industriales donde exista gran carga de recursos humanos y altas necesidades de higiene, como es el caso del sector alimentario, se puede aprovechar la energía solar térmica para producir ACS en las duchas o bien para lavar la ropa de trabajo.*

- *Calentamiento de aire. En la industria cervecera de malta, el consumo de calor principal en la fabricación de la malta es para el secado de la malta germinada. Para ello se utiliza aire precalentado hasta 80 °C. El consumo de calor a bajas temperaturas es muy elevado, por lo que la contribución solar que se puede conseguir es alta.*

Se puede ayudar a calentar aire de entrada al hacerlo pasar por una serie de tubos precalentados con energía solar térmica. El sistema contará con bombas de circulación y válvulas que dirigirán el caudal. Con este calor solar el aire de entrada se precalienta hasta 25 - 50 °C antes de llegar al intercambiador convencional con lo que se consigue un importante nivel de ahorro de energía.

Esta aplicación es factible en sectores como el del moldeo del plástico, el lácteo, en el cárnico en el secado de las piezas o en el de la cerámica estructural.

- *Energía solar térmica como complemento a la cogeneración. En muchas industrias resulta más ventajoso utilizar la cogeneración como fuente para producir calor y electricidad. Sin embargo, el aporte por energía solar puede servir como complemento en aquellos procesos paralelos a la producción en los que el requerimiento de calor sea de baja o media temperatura. No olvidemos no obstante que la mejor manera casi siempre de cubrir la demanda de calor a baja temperatura (<50 °C) en procesos industriales es a través de recuperación de calor.*
- *Precalentamiento de agua para procesos industriales (caldera convencional, caldera de vapor). La energía térmica requerida se genera habitualmente en calderas de vapor saturado que queman fuel o gas natural. Si un porcentaje de estas necesidades de calor se producen por medio de energías renovables conseguiremos una reducción de costes así como una reducción de emisiones nocivas a la atmósfera.*
- *Limpieza de instalaciones. La limpieza de las instalaciones es necesaria que se haga con agua a presión a una cierta temperatura, en torno a los 70°C. Para ello se puede utilizar energía solar para calentar esta agua.*
- *Tratamiento del agua para pasteurización. Este subproceso es usado en el sector lácteo, conservero y en la industria de la producción de aceite.*
- *Calentamiento del agua para el cuajado. Se realiza en torno a los 35 °C en el sector lácteo.*
- *Mantenimiento de temperatura de agua en piscifactorías. Aquí la temperatura del agua se ha de mantener constante entre 20 y 26 °C, temperaturas que favorecen el aprovechamiento máximo del calor producido por placas solares.*

La producción de frío mediante máquinas de absorción es otra aplicación interesante de la energía solar en la industria, donde son válidas las mismas consideraciones que se han efectuado para la refrigeración doméstica.

1.2.2. Tecnologías de media y alta temperatura

La tecnología de media temperatura va destinada a aquellas aplicaciones que requieren temperaturas más elevadas de trabajo. A partir de los 80 °C los captadores planos

convencionales presentan rendimientos bajos y cuando se pretende generar vapor entre 100 °C y 250 °C debe acudir a otro tipo de elementos de captación.

Para llegar a estos niveles de temperatura resulta indispensable utilizar sistemas que concentren la radiación solar mediante lentes o espejos parabólicos. Los más desarrollados en la actualidad son los captadores cilindro-parabólicos, que se valen de espejos para calentar un fluido hasta producir el vapor que permita mover una turbina. De esta forma, la energía térmica se convierte en energía mecánica.

En este tipo de instalaciones el fluido que se utiliza, principalmente, es aceite o soluciones salinas porque permite trabajar a temperaturas más elevadas. Además, estos sistemas de concentración requieren un seguimiento continuo del Sol, ya que sólo aprovechan la radiación directa.

Por ello, en las tecnologías de media temperatura son muy comunes los equipos de seguimiento en el eje Norte-Sur o Este-Oeste. También existen ejemplos con seguimiento en todas las direcciones, aunque los mecanismos correspondientes se complican en exceso, por lo que no suele ser una solución demasiado adecuada para este tipo de sistemas de captación.

Las aplicaciones más usuales en las instalaciones de media temperatura que se han realizado hasta la fecha, han sido la producción de vapor para procesos industriales y la generación de energía eléctrica en pequeñas centrales de 30 a 2.000 kW. También existen ejemplos de otras aplicaciones tales como la desalinización o la refrigeración mediante energía solar.

En las tecnologías de alta temperatura, la radiación solar puede servir para la generación de electricidad a gran escala. Mediante un proceso que convierte el calor en energía mecánica y posteriormente en energía eléctrica, se consiguen altas capacidades en la producción de electricidad.

Las instalaciones solares de alta temperatura, también conocidas como termoeléctricas, se basan en procesos tecnológicos parecidos a los utilizados en instalaciones de media temperatura, pero eso sí, con una mayor capacidad para concentrar los rayos del Sol, así como para alcanzar temperaturas más elevadas.

En este tipo de centrales se llegan a superar los 2.000 °C de temperatura por medio de un gran número de espejos enfocados hacia un mismo punto (la cúpula de una torre o un tubo de vidrio dispuesto a lo largo del tramo central del espejo concentrador), con el fin de calentar un fluido hasta convertirlo en vapor. Gracias a la elevada presión alcanzada es posible accionar una turbina, que a su vez impulsará un generador eléctrico.

Las instalaciones que han conseguido un mayor desarrollo con este tipo de tecnologías son las Centrales Torres, formadas por un campo de espejos (helióstatos) que realizan un seguimiento del Sol en cualquier dirección para reflejar la radiación sobre una caldera independiente y situada en lo alto de una torre central y los sistemas cilindro-parabólicos, que reflejan la energía procedente del Sol en un tubo que circula a lo largo de la línea focal del espejo.

Convertir el calor del sol en electricidad

Producir electricidad de la energía de los rayos solares es un proceso relativamente sencillo. La radiación solar directa puede concentrarse y recogerse mediante una serie de tecnologías (TCS) que proporcionarían temperaturas de medias a altas. Este calor se utiliza entonces para operar un ciclo termodinámico convencional, por ejemplo mediante una turbina de vapor o de gas, o un motor Stirling. El calor solar recogido durante el día puede también almacenarse en medios líquidos, sólidos o que cambian de fase, como sales fundidas, cerámicas, cemento, o en el futuro, mezclas de sales que cambian de fase. Por la noche, puede extraerse el calor del medio de almacenamiento para hacer funcionar la turbina.

Las centrales eléctricas termosolares se pueden diseñar para generación exclusivamente solar, ideal para satisfacer demanda diurna, pero con los sistemas de almacenamiento futuros se puede extender su operación casi a requisitos de carga base.

Las tres tecnologías solares térmicas más prometedoras son el concentrador cilindro parabólico (CCP), el receptor central o central de torre y el disco parabólico.

- **Concentradores cilindro-parabólicos**

El captador cilindro parabólico, denominado mediante las siglas CCP, debe su nombre a uno de sus componentes principales: la superficie reflectante cilindro parabólica que refleja la radiación solar directa concentrándola sobre un tubo absorbente colocado en la línea focal de la parábola. Esta radiación concentrada sobre el tubo absorbente hace que el fluido que circula por su interior se caliente, transformando de esta forma la radiación solar en energía térmica, en forma de calor sensible o latente del fluido. Los valores usuales del flujo de radiación sobre el absorbente de un CCP están entre 40 y 60 kW.m⁻², pudiendo operar eficientemente hasta temperaturas del orden de 450 °C.



Figura 1.1. Concentrador cilíndrico-parabólico

Como cualquier otro captador de concentración, los CCP solo pueden aprovechar la radiación solar directa, lo que exige que el colector vaya modificando su posición durante el día. Este movimiento se consigue mediante el giro alrededor de un eje paralelo a su línea focal.

El tipo de fluido de trabajo que se utiliza en los CCP depende de la temperatura a la que se desee calentar. Si las temperaturas que se desean son moderadas (<200 °C), se puede utilizar

agua desmineralizada o etilenglicol como fluidos de trabajo. En cambio, se utilizan aceites sintéticos en aquellas aplicaciones donde se desean temperaturas más altas ($200\text{ }^{\circ}\text{C} < T < 450\text{ }^{\circ}\text{C}$)

De las tres tecnologías actuales de CET (Receptor Central, Colectores Cilindro Parabólicos y los Discos Stirlings), las plantas con colectores cilindro parabólicos (CCP) son las que cuentan actualmente con una mayor experiencia comercial. Las nueve plantas SEGS (Solar Electricity Generating Systems) actualmente en operación en California, con sus más de 2,5 millones de metros cuadrados de CCP, son el mejor ejemplo del estado del arte de esta tecnología

Las plantas SEGS típicas carecen de almacenamiento térmico, pero cuentan con calderas de gas auxiliares que pueden ser usadas tanto como complemento del campo solar, como para generar electricidad en periodos en los que no existe radiación solar disponible (días nublados y durante la noche).

Las CET con CCP son las que presentan actualmente un menor coste para generar electricidad o producir vapor sobrecalentado a alta presión ($375\text{ }^{\circ}\text{C} / 100\text{ bar}$). La tecnología de las plantas termosolares del tipo SEGS está totalmente disponible en la actualidad, aunque no resulta competitiva en la mayor parte de los mercados energéticos actuales si no disponen de algún tipo de incentivo fiscal o ayuda económica externa que tenga en cuenta sus buenas cualidades desde el punto de vista medioambiental y para la consecución de un desarrollo sostenible.

El escaso riesgo, desde el punto de vista tecnológico que conlleva la instalación de plantas tipo SEGS es la causa de que existan en la actualidad varias empresas promoviendo la instalación de plantas termosolares de este tipo en un buen número de países con un buen nivel de insolación (Brasil, Egipto, España, Grecia, India, México y Pakistán).

Dado que la contribución solar es mayor en ese caso, las centrales termosolares con CCP resultan más interesantes para la generación de electricidad mediante un ciclo Rankine. No obstante, la integración con un ciclo combinado, lo que se conoce bajo las siglas ISCCS (Integrated Solar Combined Cycle System), ofrece una oportunidad importante de reducir los costes de la electricidad generada con CCP, aunque la fracción solar queda reducida en este caso a un valor del orden del 15%.

Se espera que el coste que presentarán las nuevas plantas caiga rápidamente como consecuencia de una producción en masa de los componentes y la aparición de un mayor número de suministradores. Así mismo, la introducción de importantes mejoras tecnológicas, como la generación directa de vapor en los propios tubos absorbentes de los captadores solares, puede conducir a una importante reducción de los costes.

El elevado grado de avance y el interés de la tecnología de los colectores cilindro-parabólicos para la producción de electricidad contrasta con la falta de desarrollo de la que adolece la de otras posibles aplicaciones que también resultan interesantes para este tipo de colectores, como son el calor de proceso y generación de vapor para procesos industriales en sectores como alimentación, textil o papel, que requieren temperaturas del orden a las obtenidas con estos sistemas, así como también climatización industrial. Los países ubicados en el denominado Cinturón Solar Terrestre poseen unas condiciones climáticas que hacen muy atractivas estas aplicaciones, sin embargo, la falta de colectores solares y equipos industriales adaptados para este tipo de usos, hace necesaria una fuerte actividad de I+D que permita alcanzar el mismo nivel de desarrollo que la generación de electricidad.

- **Sistemas de torre o de receptor central**

Consisten en un campo de helióstatos que siguen la posición del Sol en todo momento (elevación y acimut) y orientan el rayo reflejado hacia el foco colocado en la parte superior de una torre. Los órdenes de concentración son de 200 a 1.000 y las potencias unitarias de 10 a 200 MW.

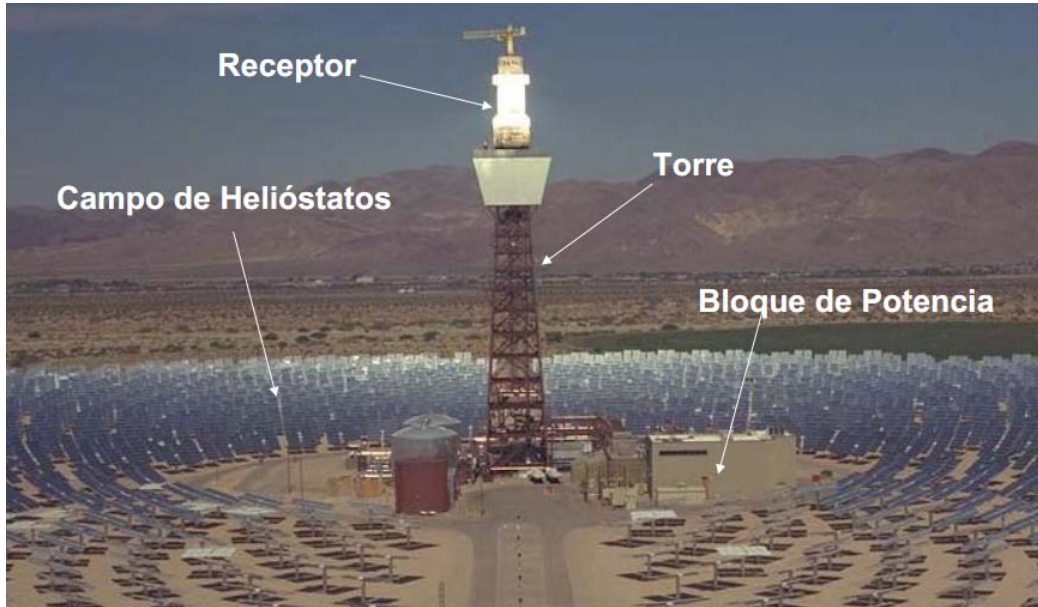


Figura 1.2. Sistema de torre o receptor central

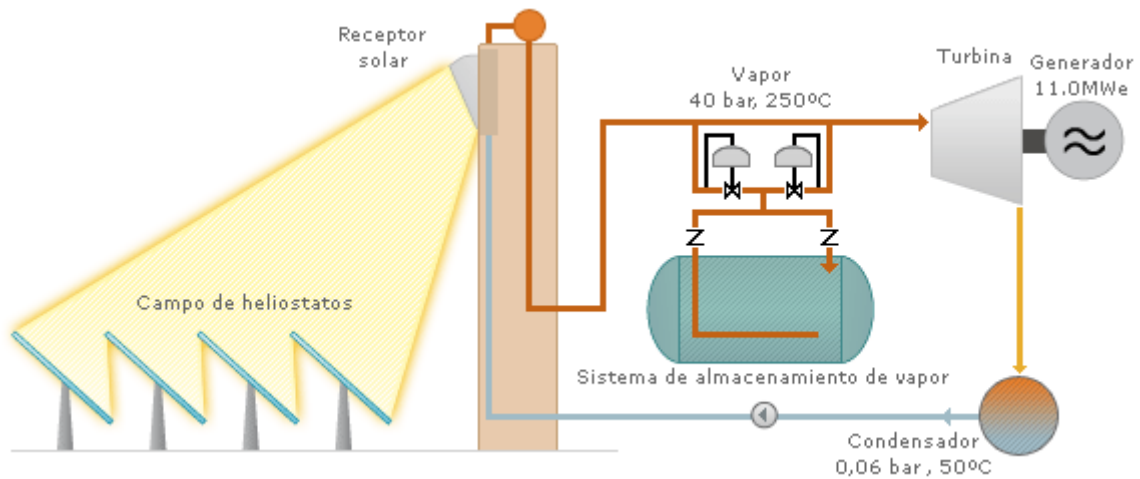


Figura 1.3. Esquema básico de la generación de vapor unido a un sistema de torre

El intercambio radiativo/convectivo se produce de forma elegante y centralizada en un intercambiador de calor ubicado encima de una torre. Por los altos flujos de radiación incidente (típicamente entre 300 y 1.000 kW.m⁻², permiten trabajar a altas temperaturas e integrarse en ciclos más eficientes de forma escalonada, admiten fácilmente el funcionamiento híbrido en una gran variedad de opciones y tienen el potencial de generar electricidad con altos factores de capacidad mediante el uso de almacenamiento térmico, pudiéndose plantear ya en la actualidad sistemas superando las 4.500 horas equivalentes al año.

Los distintos proyectos de desarrollo tecnológico que han tenido lugar desde entonces han permitido ir mejorando componentes y procedimientos, de modo que hoy en día las predicciones establecen valores de eficiencia del sistema, conversión de solar a electricidad, del 23% en punto de diseño y del 20% anual. A pesar de todo, el gran reto pendiente para los sistemas de receptor central es la puesta en marcha de una primera generación de plantas comerciales operando en régimen de conexión a red y competitivas en las condiciones del mercado energético actual. Las tres tecnologías de receptor central que se utilizarán en las primeras plantas comerciales que están en proceso de construcción en España están basadas en el uso como fluido termoportador de sales fundidas (SOLAR TRES), vapor saturado (PS10) y receptor volumétrico refrigerado por aire (Proyecto de demostración SOLGATE). La utilización de este último fluido evita la limitación en temperatura de las sales, la complejidad del control de la generación de vapor, además de permitir rangos más altos de temperatura de trabajo y funcionamiento en sistemas de generación eléctrica basados en ciclos combinados (turbina de gas y posteriormente de vapor), con lo que se obtienen mayores rendimientos de planta.

Cabe esperar que, paulatinamente, las nuevas plantas vayan incorporando en su diseño los avances tecnológicos en los que se está trabajando, como son la utilización de helióstatos de elevada superficie (90-150 m²), de mejores propiedades ópticas y estructuras más ligeras y baratas; el empleo de mejores estrategias de control y procedimientos de arranque, así como en nuevos desarrollos de receptores. Pese a ello, el elevado coste de capital constituye todavía un obstáculo hacia el pleno aprovechamiento del potencial de esta tecnología a nivel comercial. Las primeras aplicaciones comerciales que están a punto de ver la luz (PS10 y SOLAR TRES en España), aún presentan costes por potencia instalada de 3000 Euro/kW y costes de la electricidad producida próximos a 0.18-0.20 Euro/kWh. La utilización de sistemas híbridos combustible fósil/energía solar, especialmente los constituidos por ciclos combinados, podría disminuir la desmesurada inversión inicial. A este respecto, destaca el desarrollo del receptor volumétrico de aire presurizado SOLGATE, donde la energía solar se utiliza como soporte para el precalentamiento en la cámara de combustión de una turbina de gas. En los proyectos SOLGAS y COLON SOLAR la energía solar se introduce en la caldera de recuperación de un ciclo combinado, entrando así en el ciclo de vapor.

Los ciclos combinados conllevan, además de menores costes de instalación y operación y mayores eficiencias, menores tiempos de arranque, y, probablemente, la aplicación a sistemas modulares de menor tamaño. Los sistemas híbridos ofrecen actualmente costes estimados de 0.10-0.15 Euro/kWh. Una reducción adicional del coste de la tecnología resultaría esencial para la extensión del número de aplicaciones comerciales y potenciales emplazamientos. Sin embargo, se auguran buenos pronósticos en vista de los avances tecnológicos realizados y se prevé que los costes de generación se reduzcan a 0.06 Euro/kWh, a medio plazo, y a 0.04 Euro/kWh, a largo plazo, a medida que la tecnología se introduzca en el mercado.

Por último, cabe señalar aquí las denominadas centrales solares de chimenea, que, aunque no se trata propiamente de sistemas de receptor central, sí son una tecnología de torre. Estos sistemas se fundamentan en el diseño desarrollado por Günther en 1931. En ellos, la radiación del sol calienta el aire que se encuentra debajo de una gran cubierta de cristal abierta en su contorno. Esta cubierta y el terreno forman un gran colector de aire caliente. En el centro de la cubierta se sitúa una gran chimenea con amplias entradas de aire en su base. La junta entre la chimenea y la cubierta acristalada es estanca, de esta forma el aire caliente, que es más ligero que el frío, asciende por la chimenea. La succión provoca que el aire caliente bajo la cubierta de cristal siga entrando a la chimenea, y el aire frío exterior entre por el perímetro de la cubierta. La energía contenida en el flujo de aire se transforma en energía mecánica mediante unas turbinas colocadas en la base de la chimenea y en eléctrica mediante generadores

convencionales. Una sola chimenea con una superficie de colector de 7000 metros de diámetro, construida y explotada en una zona con una radiación anual de 2300 kWh/m², puede producir entre 700 y 800 GWh al año. De esta forma, con un pequeño número de “chimeneas solares” se puede reemplazar una central nuclear.

Estos sistemas se caracterizan por su sencillez constructiva y la ausencia de impacto ambiental, y con el apoyo de los relieves naturales de la superficie de la tierra, las montañas, podrían alcanzar incluso los 3000 metros de altura, generándose mayores potencias.

Actualmente, la empresa alemana Schlaich, Bergermann und Partner (SBP) está llevando a cabo un proyecto en fase de ejecución en Australia, en el año 2009, para la construcción de una central de 200 MW que dispondrá de un tiro térmico acentuado gracias a una chimenea de 1000 metros de altura.

En España, esa misma empresa, junto con las españolas Campo 3 e Imasa, son las encargadas de la construcción y explotación, junto con la Universidad de Castilla la Mancha y el Ministerio de Fomento, de una “chimenea solar” de 750 metros de altura y 40 MW en la localidad de Fuente del Fresno (Ciudad Real). Su construcción estaba prevista para 2007 con un presupuesto de 240 M€. El campo colector de esta central actuará, además, de invernadero de cultivos hortofrutícolas. Esta tecnología había sido ensayada previamente en España, donde, en 1982 SBP instaló una planta piloto de 50 kW en Manzanares (Madrid), con una torre de 195 metros y un campo colector de 240 metros de diámetro.

La empresa francesa OTH, con su proyecto Elioth, es también pionera en el desarrollo de esta tecnología.

- **Los sistemas disco-Stirling**

El Motor Stirling fue inventado en 1816 por Robert Stirling, reverendo de origen escocés. El objetivo era tener un motor menos peligroso que la máquina de vapor.

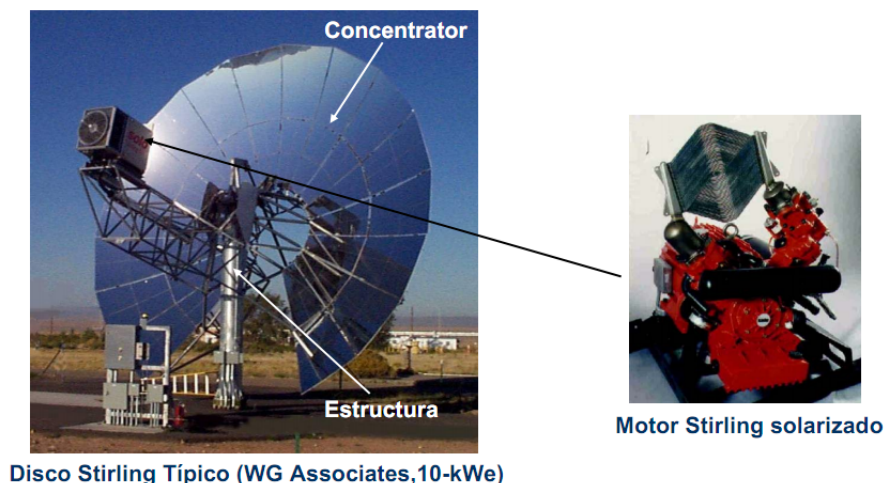


Figura 1.4. Sistema disco-Stirling

El principio de funcionamiento es el trabajo realizado por la expansión y contracción de un gas (normalmente helio, hidrógeno, nitrógeno o simplemente aire) al ser obligado a seguir

un ciclo de enfriamiento en un foco frío, con lo cual se contrae, y de calentamiento en un foco caliente, con lo cual se expande. Es decir, es necesaria la presencia de una diferencia de temperaturas entre dos focos y se trata de un motor térmico.

Los discos parabólicos han evolucionado tanto en EEUU como en Europa hacia la construcción de unidades autónomas conectadas a motores Stirling situados en el foco. Los sistemas disco/Stirling han demostrado la mayor eficiencia de conversión de radiación solar en energía eléctrica con valores máximos del 30 % y hasta un 25 % de promedio diario en unidades de 7 a 25 kW. Debido a la curvatura parabólica del concentrador y a la baja relación distancia focal/diámetro ($f/D=0,6$), se pueden conseguir altas relaciones de concentración por encima de 3.000. Esto permite alcanzar muy altas temperaturas de operación entre 650 y 800 °C, dando lugar a eficiencias en el motor Stirling del orden del 30 al 40 %. La superficie cóncava del concentrador está cubierta por espejos de vidrio de segunda superficie con su correspondiente curvatura parabólica o bien por espejos delgados o polímeros metalizados de primera superficie soportados sobre una estructura de fibra de vidrio o de membrana tensionada. Los receptores para sistemas disco/Stirling son de tipo cavidad, con una pequeña apertura y su correspondiente sistema de aislamiento. Habitualmente, se usan dos métodos para la transferencia de la radiación solar al gas de trabajo. En el primero se ilumina directamente un panel de tubos por el interior de los cuales circula el gas que suele ser helio, hidrógeno o aire. En el segundo método, se utiliza el concepto de tubo de calor o heat pipe, vaporizándose un metal líquido (normalmente sodio) que luego condensa en la superficie de los tubos por los que circulan el gas de trabajo y refluye nuevamente al absorbedor.

Los logros que se están alcanzando (hibridación, optimización de procedimientos de arranque y control, etc.) hacen prever unos costes de generación inferiores a 0.12-0.17 Euro/kWh a corto plazo. No obstante, pese al enorme potencial a largo plazo de esta tecnología, debido a sus elevadas eficiencias y su modularidad, la limitación en cuanto a su potencia unitaria (inferior a 25 kW) obstaculiza muchas aplicaciones que pretenden la producción eléctrica a gran escala. Así, tienen su aplicación más obvia en la producción de electricidad para autoconsumo en lugares aislados donde no llegue la red eléctrica (bombeo de agua en pozos, suministro de electricidad a núcleos de viviendas rurales, etc.), donde cabe esperar que puedan competir con sistemas ya comerciales como los fotovoltaicos o los generadores diesel.

- **Reflectores lineales de Fresnel**

Concentradores solares según el Principio de Fresnel.

El principio de Fresnel - Huygens es un método de análisis aplicado a los problemas de propagación de ondas. Afirma que todo punto de un frente de onda inicial puede considerarse como una fuente de ondas esféricas secundarias que se extienden en todas las direcciones con la misma velocidad, frecuencia y longitud de onda que el frente de onda del que proceden.

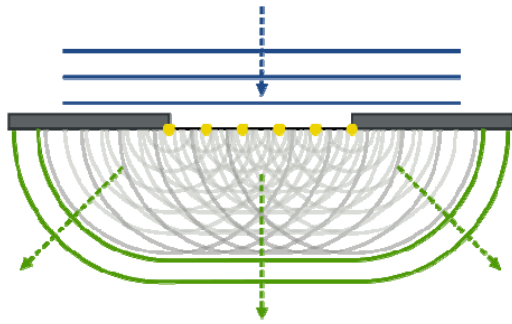


Figura 1.5. Propagación de ondas según el principio de Fresnel

Una serie de reflectores lineales de Fresnel (LFR) es un sistema de foco en línea similar a los concentradores (CCP) en los que la radiación solar se concentra en un captador lineal invertido elevado mediante una serie de reflectores casi planos. Con las ventajas de bajos costes estructurales de apoyo, juntas de fluido fijas, receptor separado del sistema reflector, y largas longitudes de foco que permiten el uso de cristal convencional, los colectores LFR han atraído una creciente atención. Se ve la tecnología como una alternativa de coste inferior a la tecnología CCP para la producción de vapor solar para la generación eléctrica.

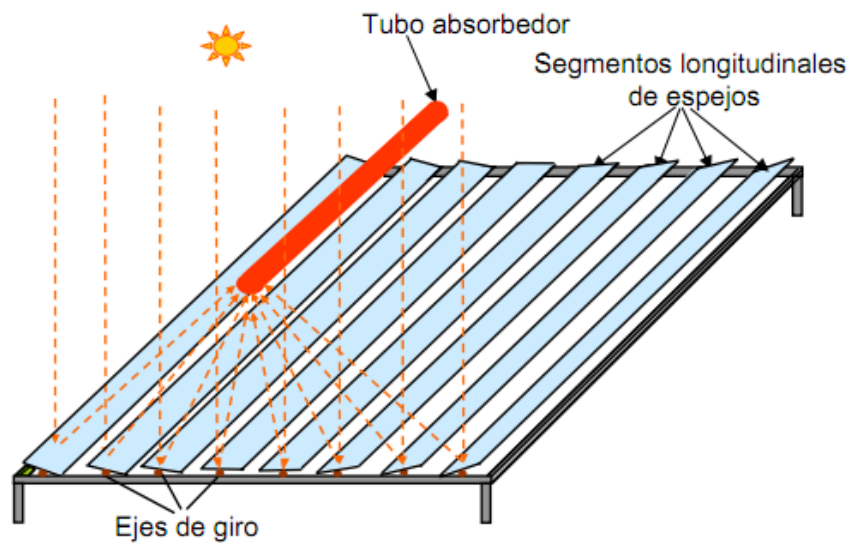


Figura 1.6. Esquema de un reflector lineal de Fresnel

Se puede diseñar un LFR para que tenga rendimiento térmico similar por área de abertura al de un cilindro parabólico, pero los diseños recientes tienden a usar materiales de reflector menos caros y componentes de captador que reducen el rendimiento óptico. Sin embargo, este rendimiento inferior se compensa por los menores costes de inversión y operación y mantenimiento. Los LFR además permiten el uso del terreno bajo los campos de espejos con otros fines económicos, como la horticultura.

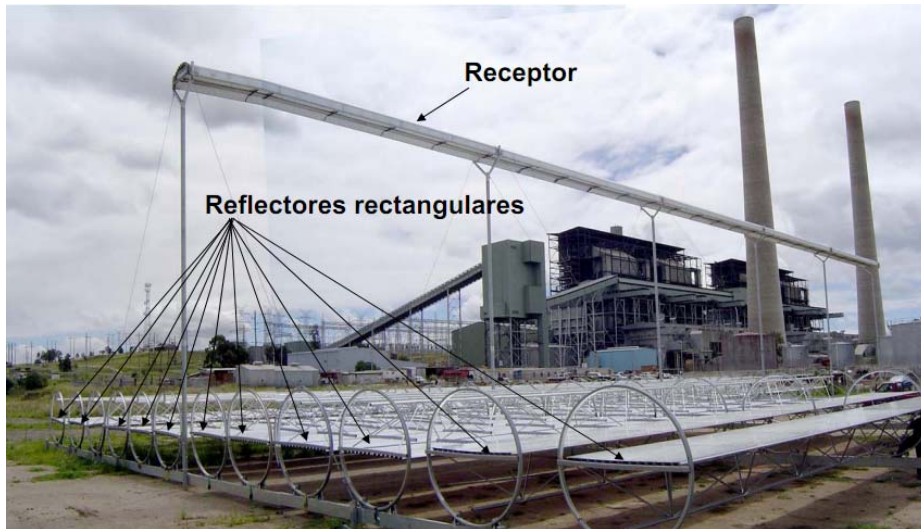


Figura 1.7. Imagen de una instalación con reflectores lineales de Fresnel

En 1999 la compañía belga Solarmundo construyó el mayor prototipo de colector Fresnel, con un colector de 24 m de ancho, y un área de reflector de 2500 m². El siguiente paso debería ser una central piloto para demostrar la tecnología en un sistema a gran escala bajo condiciones de operación comerciales. Lo más conveniente y rentable sería una solución ya preparada de un colector Fresnel conectado a una central eléctrica existente. La compañía australiana Solar Heat and Power planeaba para finales del 2003 una serie piloto de 24.000 m de reflectores compactos de Fresnel (CLFR) unida a una central de carbón.

- **Combustibles solares y solarización de procesos industriales**

El sector transporte y la industria, con un 42 y un 31 % del consumo de la energía final en España, requieren de combustibles y calor. Estas necesidades energéticas, fundamentalmente en los rangos de temperatura media (<400 °C) y alta (>600 °C), podrían cubrirse mediante la integración de sistemas solares de colectores cilindro-parabólicos y torre, respectivamente. En lo que se refiere a los combustibles, en la actualidad, su origen es fósil. La síntesis de otros más limpios como el hidrógeno, bioetanol o biodiesel está basada generalmente en reacciones endotérmicas que requieren el aporte de calor. Así pues, la utilización de la energía solar en estos procesos podría reducir enormemente la dependencia energética de los combustibles fósiles, así como las emisiones de CO₂.

La producción de hidrógeno como vector energético limpio está siendo una de las prioridades de investigación en el ámbito mundial. Entre los métodos para producir hidrógeno con energía solar (procesos fotoquímicos, electroquímicos, termoquímicos y combinaciones de éstos), aquéllos que hacen uso de la radiación solar concentrada presentan muchas posibilidades de desarrollo. Entre ellos cabe distinguir la electrólisis a alta temperatura y los métodos termoquímicos.

En la electrólisis a alta temperatura se utiliza el calor para calentar el agua y disminuir la energía eléctrica necesaria para disociar la molécula. El suministro del calor y la electricidad proceden de colectores cilindro-parabólicos, receptores centrales o discos parabólicos.

La obtención de hidrógeno mediante la ruptura térmica de la molécula de agua presenta algunos inconvenientes que dificultan su desarrollo. Por un lado, las elevadas temperaturas que

se precisan para obtener un grado de disociación razonable (superiores a 2500 K), lo que implica problemas de materiales; y por otro un incremento de las pérdidas por re-radiación, disminuyendo así la eficiencia térmica del sistema. A esto hay que añadir que al generarse el hidrógeno y el oxígeno en el mismo lugar es preciso utilizar técnicas efectivas de separación para evitar su recombinación. Estos tres inconvenientes son la causa de que no exista de momento ninguna planta piloto en la que se lleve a cabo este proceso y que se busquen métodos alternativos, entre los que se encuentran los ciclos termoquímicos.

Los ciclos termoquímicos engloban un conjunto de reacciones sucesivas basadas en procesos de oxidación-reducción que reducen la temperatura necesaria para la disociación hasta valores comprendidos entre los 800 y 1500 K. Existen más de 2000 ciclos, pero los que tienen más posibilidades de prosperar, al menos en lo que se refiere a la utilización de energía solar, son: la reducción de óxidos metálicos, la descomposición del ácido sulfúrico (ciclos de la familia del azufre) o la hidrólisis de los bromuros de calcio o hierro (ciclos del tipo UT-3).

A medio plazo, las tecnologías de concentración solar también podrían ser utilizadas en procesos de descarbonización de combustibles fósiles, como el cracking de gas natural o petróleo, el reformado de gas natural, petróleo o hidrocarburos ligeros, y la gasificación del carbón y otros hidrocarburos pesados. En todos estos procesos la radiación solar se emplea como fuente calorífica para llevar a cabo una reacción endotérmica. Para conseguir las elevadas razones de concentración necesarias, se utilizan sistemas de receptor central o discos parabólicos.

A la hora de decidir los ciclos a solarizar se tiene en cuenta factores tales como el número de reacciones implicadas (a más reacciones, más complejidad), las temperaturas máximas de trabajo, la disponibilidad y coste de los reactivos, el poder corrosivo de los mismos, la necesidad o no de transporte de sólidos, etc.

El par rédox que se perfila actualmente como más apropiado para el ciclo termoquímico de dos pasos basado en la reducción de óxidos metálicos es el del ZnO y Zn. El primer paso, a temperaturas de 2000 K y superiores, consiste en la reducción del óxido a metal (u óxido metálico de menor valencia) con desprendimiento de oxígeno. Este proceso también se puede realizar utilizando carbón o gas natural como agentes reductores (reducción carbotérmica). El segundo paso, consistente en la hidrólisis exotérmica del agua para formar hidrógeno y el correspondiente óxido metálico, presenta experimentalmente una tasa de conversión razonable a temperaturas del orden de los 700 K. Basado en el primer paso de esta reacción, el proyecto europeo SOLZINC (2001-2005) fue el primero en usar con éxito la energía solar en una planta piloto para crear energía almacenable a partir de un mineral de metal. Así, mediante la reducción carbotérmica del ZnO a Zn, la energía solar puede convertirse en combustible químico, ser almacenada durante largos periodos de tiempo y transportarse a grandes distancias. Las plantas de tamaño industrial que se desarrollarán a partir de este prototipo de 300 kW construido en el Weizmann Institute of Science (Israel), se prevé que alcancen rendimientos de entre 50 y un 60 %. Cuanto mayor rendimiento, menor será el área de colectores necesaria y menores serán los costes del sistema de concentración solar, que normalmente corresponden a la mitad de la inversión total del conjunto de la planta solar-química. En el proyecto SOLZINC participaron PROMES-CNRS (Francia), ScanArc Plasma Systems AB (Suecia), ZOXY Energy Systems AG (Alemania), el Paul Scherrer Institute (PSI), El Institute of Energy Technology-ETHZ (Suiza) y el Weizmann Institute of Science (Israel).

La síntesis solar de Zn y otros metales y semiconductores conlleva adicionalmente un ahorro del consumo eléctrico y de combustibles fósiles inherentes a otros métodos tradicionales de

obtención (electrólisis), con la consiguiente reducción de las emisiones de CO_2 y otros gases contaminantes (CF_4 , C_2F_6 , etc.).

A nivel mundial, los centros más relevantes implicados en el desarrollo de este tipo de procesos son: La Plataforma Solar de Almería, el Félix Trombe Solar Furnce Center del IMP-CNRS (Odeillo, Francia), el Paul Scherrer Institute (PSI), El Swiss Federal Institute of Technology-ETHZ (Suiza), el Weizmann Institute of Science (WIS, Israel) y la Australian University of Camberra (ANU).

En el Félix Trombe Solar Furnce Center la investigación se centra en la síntesis de metales y semiconductores (reducción carbotérmica de sílice y de mezclas $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-C}$), la síntesis de hidrógeno mediante descarbonización de combustibles fósiles (reformado de metano, reducción carbotérmica de ZnO y cracking de metano) y la síntesis de nanotubos. En el WIS la actividad se basa en procesos de reformado y cracking de metano, la electrólisis a alta temperatura de vapor de agua, así como en procesos de gasificación de la biomasa y síntesis de Zn y otros metales por reducción carbotérmica. En la ANU se hace especial hincapié en el proceso de disociación termosolar del amoniaco y en la gasificación del carbón. En el PSI se investiga acerca de la reducción térmica de sulfuros y ZnO , así como sobre la reducción carbotérmica del ZnO con metano (proceso "SynMet").

Por último, en todos los sistemas mencionados de concentración solar cabe señalar la intensa actividad de Sunlab, colaboración entre los Sandia National Laboratories y el National Renewable Energy Laboratory, dos de los centros de investigación en energías renovables más significativos del gobierno norteamericano.

- **Sistemas de hornos solares**

Los hornos solares son sistemas basados en una doble concentración de la radiación solar, generalmente un campo de helióstatos y un disco, con lo que se han conseguido concentraciones por encima de los 10.000 soles.

Su desarrollo está aún a nivel de investigación, en Europa se cuenta con el horno solar de la PSA-CIEMAT (50 kW), PSI-Suizo (45 kW) y el DLR alemán (25 kW), y ya a mayor escala destaca el que se encuentra en IMP-Odeillo con 1000 kW de potencia y temperaturas máximas alcanzables de 3800°C .

Su campo de aplicación comprende principalmente ensayos de materiales, tanto en condiciones ambientales como en atmósferas controladas o en vacío, y experimentos de química solar mediante sistemas receptores asociados a reactores químicos.

Actualmente, se está diversificando el campo de aplicación de estos sistemas de alta concentración solar y se estudia el desarrollo de diferentes reactores que permitan el aporte de calor a procesos industriales y de eliminación de residuos que requieran elevadas temperaturas. Entre ellos cabe destacar diferentes rutas de producción de hidrógeno; los procesos de destoxificación de agua y aire; la síntesis de metales y semiconductores (Zn , Ca , Fe , Na , Mn , Al-Si , etc.); y la síntesis de otros materiales, como carburos y nitruros metálicos, y nanotubos de carbono. Al mismo tiempo, se están mejorando los sistemas de control de este tipo de sistemas de concentración solar para conseguir una mayor estabilidad de la temperatura y del flujo de radiación solar concentrada en el foco.

1.3. Energía solar fotovoltaica

Los sistemas fotovoltaicos transforman la luz solar en energía eléctrica, una partícula luminosa con energía (fotón) se convierte en una energía electromotriz (voltaica), de ahí su nombre, fotovoltaico.

A esta conversión fotovoltaica se le llama efecto fotoeléctrico. El efecto fotoeléctrico consiste en la emisión de electrones por un material cuando se le ilumina con radiación electromagnética (luz visible o ultravioleta, en general). El efecto fotoeléctrico fue descubierto y descrito por Heinrich Hertz en 1887.

El dispositivo o elemento que media en el proceso es la célula solar o célula fotovoltaica. También se llama célula fotoeléctrica, célula, fotocélula, celda fotovoltaica o celda solar.

Cuando la energía luminosa, principalmente la radiación solar, incide en la célula fotoeléctrica, existe un desprendimiento de electrones de los átomos que comienzan a circular libremente en el material. Si se mide el voltaje existente entre los dos extremos del material, se observa que existe una diferencia de potencial entre 0,5 y 0,6 voltios.

En la actualidad el material fotosensible más utilizado es el silicio, que produce corrientes eléctricas mayores. Hoy se utilizan diferentes tecnologías en la producción de las celdas fotovoltaicas con el fin de aumentar su producción y reducir su coste.

En la producción de celdas solares al silicio se le introducen átomos de impurezas (dopado) para crear una región tipo p y una región tipo n de modo de producir una unión p-n. El dopado se puede hacer por difusión a alta temperatura, donde las planchas se colocan en un horno con el dopante introducido en forma de vapor. Hay muchos otros métodos de dopar el silicio.

Un átomo del silicio tiene 4 electrones de valencia (aquellos más débilmente unidos), que enlazan a los átomos adyacentes. Substituyendo un átomo del silicio por un átomo que tenga 3 o 5 electrones de la valencia producirá un espacio sin un electrón (un agujero) o un electrón extra que pueda moverse más libremente que los otros, ésta es la base del doping. En el doping tipo p, la creación de agujeros, se consigue mediante la incorporación en el silicio de átomos con 3 electrones de valencia, generalmente se utiliza boro. En el dopaje de tipo n, la creación de electrones adicionales se consigue incorporando un átomo con 5 electrones de valencia, generalmente fósforo.

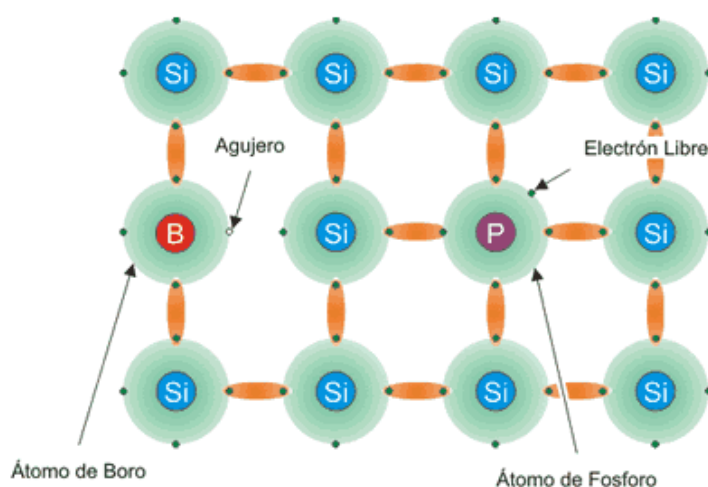


Figura 1.8. Esquema del dopaje de silicio

Una vez que se crea una unión p-n, se hacen los contactos eléctricos por delante y en la parte posterior de la célula evaporando o pintando con metal la plancha. La parte posterior de la plancha se puede cubrir totalmente por el metal, pero el frente de la misma tiene que tener solamente un patrón en forma de rejilla o de líneas finas de metal, de otra manera el metal bloquearía al sol del silicio y no habría ninguna respuesta a los fotones de la luz incidente.

1.3.1. Fundamentos de las celdas solares y asociaciones.

Para entender la operación de una célula fotovoltaica, se necesita considerar la naturaleza del material y la naturaleza de la luz del sol. Las celdas solares están formadas por dos tipos de material, generalmente silicio tipo p y silicio tipo n. La luz de ciertas longitudes de onda puede ionizar los átomos en el silicio y el campo interno producido por la unión que separa algunas de las cargas positivas ("agujeros") de las cargas negativas (electrones) dentro del dispositivo fotovoltaico. Los agujeros se mueven hacia la capa positiva o capa de tipo p y los electrones hacia la negativa o capa tipo n. Aunque estas cargas opuestas se atraen mutuamente, la mayoría de ellas solamente se pueden recombinar pasando a través de un circuito externo fuera del material debido a la barrera de energía potencial interno. Por lo tanto si se hace un circuito se puede producir una corriente a partir de las celdas iluminadas, puesto que los electrones libres tienen que pasar a través del circuito para recombinarse con los agujeros positivos.

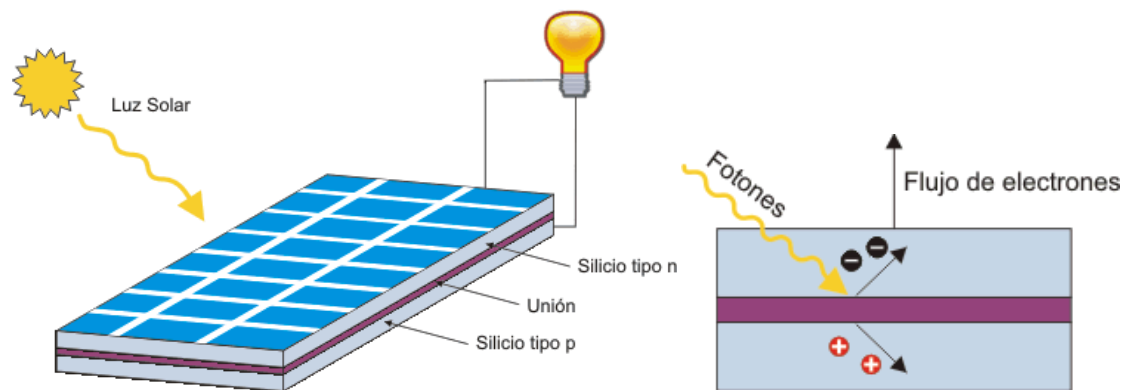


Figura 1.9. Efecto fotovoltaico en una célula solar

La cantidad de energía que entrega un dispositivo fotovoltaico está determinado por:

- El tipo y el área del material
- La intensidad de la luz del sol
- La longitud de onda de la luz del sol

Una típica célula fotovoltaica de silicio monocristalino de 100 cm^2 producirá cerca de 1.5 W de energía a 0.5 V de Corriente Continua y 3 A bajo la luz del sol en pleno verano (el 1000 Wm^{-2}). La energía de salida de la célula es casi directamente proporcional a la intensidad de la luz del sol. (Por ejemplo, si la intensidad de la luz del sol se divide por la mitad la energía de salida también será disminuida a la mitad).

Una característica importante de las celdas fotovoltaicas es que el voltaje de la célula no depende de su tamaño, y sigue siendo bastante constante con el cambio de la intensidad de luz. La corriente en un dispositivo, sin embargo, es casi directamente proporcional a la

intensidad de la luz y al tamaño. Para comparar diversas celdas se las clasifica por densidad de corriente, o amperios por centímetro cuadrado del área de la célula.

La potencia entregada por una célula solar se puede aumentar con bastante eficacia empleando un mecanismo de seguimiento para mantener el dispositivo fotovoltaico directamente frente al sol, o concentrando la luz del sol usando lentes o espejos. Sin embargo, hay límites a este proceso, debido a la complejidad de los mecanismos, y de la necesidad de refrescar las celdas. La corriente es relativamente estable a altas temperaturas, pero el voltaje se reduce, conduciendo a una caída de potencia a causa del aumento de la temperatura de la célula.

Puesto que una sola célula fotovoltaica tiene un voltaje de trabajo cercano a 0.5 V, estas generalmente se conectan juntas en serie (positivo con negativo) para proporcionar voltajes más grandes. Las asociaciones de células fotovoltaicas reciben el nombre de paneles fotovoltaicos. Los paneles se fabrican en una amplia gama de los tamaños para diversos propósitos que generalmente se clasifican en tres categorías básicas:

- Paneles de bajo voltaje / baja potencia, son confeccionados conectando entre 3 y 12 segmentos pequeños de silicio amorfo fotovoltaico con un área total de algunos centímetros cuadrados para obtener voltajes entre 1.5 y 6 V y potencias de algunos milivatios. Aunque cada uno de estos paneles es muy pequeño, la producción total es grande. Se utilizan principalmente en relojes, calculadoras, cámaras fotográficas y dispositivos para detectar la intensidad de luz, tales como luces que se encienden automáticamente al caer la noche.*
- Paneles pequeños, de 1 - 10 W y 3 - 12 V, con áreas de 100 cm² a 1000 cm² se fabrican cortando en pedazos celdas mono o policristalinas de 100cm² y ensamblándolas en serie, o usando paneles amorfos de silicio. Los usos principales son en radios, juguetes, bombecedores pequeños, cercas eléctricas y cargadores de baterías.*
- Los paneles grandes, de 10 a 60 W, y habitualmente 6 o 12 V, con áreas de 1000 cm² a 5000 cm² son generalmente contruidos conectando de 10 a 36 celdas del mismo tamaño en serie. Se utilizan individualmente para bombecedores pequeños y energía de casas rodantes (luces y refrigeración) o en conjuntos para proporcionar energía a casas, comunicaciones, bombecedores grandes y fuentes de energía en área remotas.*

Si una aplicación requiere más energía de la que puede ser proporcionado por un solo panel, pueden hacerse sistemas más grandes combinando un número de paneles constituyendo los módulos o conjuntos. Sin embargo, se presenta una complicación en los casos que la potencia y voltaje requerido es mayor al nivel y uniformidad que puede ser proporcionado directamente de los paneles. En estos casos, se utilizan los sistemas fotovoltaicos, compuestos por las siguientes partes:

- a. un conjunto de paneles fotovoltaicos, variando de dos a varios centenares de paneles.*

- b. un panel de control, que regula la energía de los paneles.
- c. un sistema del almacenaje de energía, constituido generalmente de un conjunto de baterías especialmente diseñadas.
- d. un inversor, para convertir la Corriente Continua en Corriente Alterna (por ejemplo CA de 220 V).
- e. Un marco y una cubierta para el sistema.
- f. En forma opcional se puede contar con fuentes de alimentación de reserva tales como generadores diesel.
- g. Otros elementos que pueden llegar a formar parte del sistema son mecanismos de seguimiento y sensores.

Los paneles en los conjuntos funcionan generalmente en serie/paralelo, para limitar el voltaje de la salida entre 12 y 50 V, pero con un amperaje más alto (corriente). Esto es por seguridad y para reducir al mínimo las pérdidas de energía.

Los conjuntos de paneles se están utilizando cada vez más en la construcción de edificios en donde cumplen dos funciones, proporcionar una pared o un techo y abastecer de energía eléctrica al edificio. Eventualmente cuando bajen los precios de celdas solares, la construcción de edificios con celdas solares integradas puede convertirse en una fuente de la energía eléctrica importante.

La cantidad de energía diaria entregada por los paneles fotovoltaicos variará dependiendo de la orientación, de la localización, del clima y de la época del año. En promedio, en verano, un panel producirá cerca de cinco veces la energía especificada en vatio por horas y por día, y en invierno cerca de dos veces esa cantidad. Por ejemplo, en verano un panel de 50 W producirá un promedio de 250 W/hora, y en invierno cerca de 100 W/hora. Estos valores son solamente indicativos, y se debe buscar ayuda profesional para obtener cálculos más exactos.

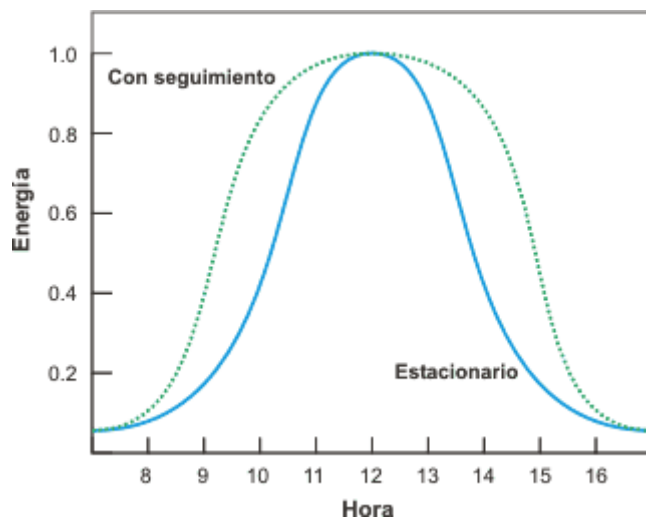


Figura 1.10. Diferencia de energía obtenida por un panel fotovoltaico con seguimiento y otro sin seguimiento, en función de la hora.

Los mecanismos de seguimiento se utilizan para mantener los paneles fotovoltaicos directamente frente al sol, para aumentar la potencia de salida de los paneles. Los mecanismos de seguimiento pueden casi duplicar la salida de un conjunto de paneles fotovoltaicos. Se requiere de un análisis cuidadoso para determinar si el incremento en el coste y la complejidad mecánica de un mecanismo de seguimiento es rentable en circunstancias particulares.

Frecuentemente es necesario almacenar la energía debido a que se requiere energía aun cuando el sol no está brillando (ya sea durante la noche o en períodos cuando el cielo está nublado) o en cantidades mayores a las que pueden ser provistas directamente del conjunto. Se utilizan generalmente baterías de "ciclo profundo" diseñadas especialmente. A diferencia de las baterías normales, estas pueden descargar cerca de la mitad de la energía almacenada varias miles de veces antes de que deterioren. Cada batería generalmente es de 2 V, y el conjunto total de baterías está formado generalmente por varias baterías conectadas en serie o paralelo para proporcionar el nivel de energía requerido. Las baterías deben ser las adecuadas para satisfacer cada uso particular, dependiendo de la radiación solar diaria total, la carga total, la carga máxima y el número de días de almacenaje requerido.

Los inversores transforman la corriente continua de la baja tensión de las baterías (12 V, 24 V, 32 o 48 V) en corriente alterna de alto voltaje (por ejemplo 110 V o 220 V). Los inversores son necesarios si se van utilizar electrodomésticos o instrumentos de voltaje normal. En la determinación del costo total del sistema, puede llegar a ser más económico comprar un inversor y electrodomésticos producidos para consumo masivo que utilizar electrodomésticos de corriente continua de baja tensión que pueden ser más costosos.

Algunas aplicaciones, tales como luces de alta eficacia actualmente no se encuentran disponibles para bajas tensiones. En este caso, el costo de utilizar más paneles debe ser equilibrado con el costo de un inversor.

Fuentes de potencia auxiliar o de reserva son requeridas cuando debe ser garantizada la confiabilidad de la fuente de electricidad, cuando es poco económico proporcionar el almacenaje con baterías para períodos nublados extendidos infrecuentes, o cuando algunas aplicaciones tienen requisitos intermitentes de grandes cantidades de energía que sean poco convenientes de satisfacer con el sistema fotovoltaico.

En ocasiones, si es viable la combinación del sol y del viento, se utilizan generadores eólicos conjuntamente con sistemas fotovoltaicos. Se utilizan a menudo como reserva pequeños generadores a gasolina o diesel. Estos sistemas son relativamente baratos de comprar pero su funcionamiento es costoso.

1.3.2. Aplicaciones

Durante gran parte de los años ochenta y de principios de los años noventa el mayor mercado para los paneles solares estaba en las fuentes de alimentación para áreas remotas y algunos productos de consumo (relojes, juguetes y calculadoras). Sin embargo a mediados de los años noventa se realizó un importante esfuerzo para desarrollar paneles solares integrados en la construcción de edificios para ser conectados a la red. El tejado fotovoltaico actualmente está liderando el desarrollo del mercado en Japón, Europa y los EE.UU. Japón tiene actualmente un programa con el objetivo de construir 70.000 hogares solares, con el cual para el año 2010 esperan alcanzar unos 4.820 MW producidos por sistemas fotovoltaicos. En Europa, varios países están apoyando la construcción de hogares solares, con el Parlamento Europeo

proponiendo un esquema 1.000 MW. En los EE.UU., el presidente Clinton anunció un programa de techos solares, para instalar paneles solares en un millón azoteas en América antes de 2010.

En Australia y los E.E.U.U., la aparición de los esquemas de energía verde, que permiten que los clientes elijan opciones de energía renovable, ha conllevado un considerable impulso al crecimiento de la industria. Las granjas solares conectadas a la red se han construido en Australia, Japón, los E.E.U.U. y Grecia.

Otros usos de sistemas fotovoltaicos incluyen los sistemas de protección catódicos, las cercas eléctricas, los sistemas de iluminación, telecomunicaciones y bombas de agua entre otras. También tienen aplicación en la electrificación rural y en sistemas de tratamiento de aguas.

La protección catódica es un método de proteger las estructuras de metal contra la corrosión. Es aplicable a puentes, tuberías, edificios, estanques, perforaciones y líneas ferroviarias. Para alcanzar la protección catódica se aplica un pequeño voltaje negativo a la estructura de metal y éste evita que se oxide o aherrumbre. El terminal positivo de la fuente se conecta a un ánodo galvánico o de sacrificio que es generalmente un pedazo del metal de desecho, que es corroído en vez de la estructura que se desea proteger. Las celdas solares fotovoltaicas a menudo se utilizan en lugares remotos para proporcionar este voltaje.

Las cercas eléctricas se utilizan extensamente en agricultura para evitar que el ganado o los depredadores entren en un campo cerrado. Estas cercas tienen generalmente uno o dos alambres "vivos" que se mantienen con aproximadamente 500 voltios de Corriente Continua. Éstos dan una dolorosa descarga, pero inofensiva a cualquier animal que los toque. Esta descarga generalmente es suficiente para evitar que el ganado derribe las cercas. Estas cercas también se utilizan en recintos de la fauna y áreas protegidas. Requieren de un alto voltaje pero muy poca corriente y a menudo están situadas en áreas alejadas donde el costo de energía eléctrica es alto. Estas necesidades se pueden resolver mediante un sistema fotovoltaico compuesto de células solares, un acondicionador de energía y una batería.

A menudo se requiere iluminación en lugares remotos donde el costo de emplear energía de la red es demasiado alto. Tales aplicaciones incluyen la iluminación de seguridad, ayudas a la navegación (ej. boyas y faros), señales iluminadas en los caminos, señales en cruces ferroviarios y la iluminación de aldeas. Las células solares pueden satisfacer tales usos, aunque siempre se requerirá de una batería de almacenaje. Estos sistemas generalmente consisten de un panel fotovoltaico más una batería de almacenaje, un acondicionador de energía y una lámpara fluorescente de C.C. de baja tensión y alta eficiencia. Estos sistemas son muy populares en áreas remotas, especialmente en países en vías de desarrollo y es uno de los usos principales de células solares.

Las buenas comunicaciones son esenciales para mejorar la calidad de vida en áreas alejadas. Sin embargo el costo de energía eléctrica de hacer funcionar estos sistemas y el alto coste de mantenimiento de los sistemas convencionales han limitado su uso. Los sistemas fotovoltaicos han proporcionado una solución rentable a este problema con el desarrollo de estaciones repetidoras de telecomunicaciones en área remotas. Estas estaciones típicamente consisten de un receptor, un transmisor y un sistema basado en una fuente de alimentación fotovoltaica. Existen miles de estos sistemas instalados alrededor del mundo y tienen una excelente reputación por su confiabilidad y costos relativamente bajos de operación y mantenimiento.

Principios similares se aplican a radios y televisiones accionadas por energía solar, los teléfonos de emergencia y los sistemas de monitoreo. Los sistemas de monitoreo remotos se pueden

utilizar para recolectar datos del tiempo u otra información sobre el medio ambiente y transmitirla automáticamente vía radio a una central.

Existen más de 10.000 bombas de agua accionadas por energía solar en el mundo. Son utilizadas extensamente en granjas para proveer el agua al ganado. En países en vías de desarrollo se las utiliza extensivamente para bombear agua de pozos y de ríos a las aldeas para consumo doméstico y la irrigación de cultivos. Un típico sistema de bombeo accionado por energía fotovoltaica consiste en un conjunto de paneles fotovoltaicos que accionan un motor eléctrico, el que impulsa la bomba. El agua se bombea de la tierra o afluente a un tanque de almacenaje que proporciona una alimentación por gravedad. No es necesario un almacenaje de energía en estos sistemas. Los sistemas de bombeo accionados por energía solar se encuentran disponibles en proveedores de equipo agrícola y son una alternativa rentable a los molinos de viento agrícolas para el abastecimiento de agua en áreas alejadas.

Las baterías de almacenaje se utilizan en áreas aisladas para proporcionar corriente eléctrica de la baja tensión para iluminación y comunicaciones así como también para vehículos. Un sistema fotovoltaico de carga de baterías consiste en generalmente un pequeño conjunto de paneles solares más un regulador de carga. Estos sistemas se utilizan extensamente en proyectos rurales de electrificación en países en vías de desarrollo.

En áreas alejadas la energía eléctrica se utiliza a menudo para desinfectar o purificar agua para consumo humano. Las celdas fotovoltaicas se utilizan para alimentar una luz fuerte ultravioleta utilizada para matar bacterias en agua. Esto se puede combinar con un sistema de bombeo agua accionado con energía solar.

La desalinización del agua salobre se puede alcanzar mediante sistemas fotovoltaicos de ósmosis inversa.

Se puede utilizar celdas fotovoltaicas en una gran variedad de aplicaciones incluyendo:

- *Productos de consumo tales como relojes, juguetes y calculadoras*
- *Sistemas de energía de emergencia*
- *Refrigeradores para almacenaje de vacunas y sangre en áreas remotas*
- *Sistemas de la aireación para estanques*
- *Fuentes de alimentación para satélites y los vehículos espaciales*
- *Fuentes de alimentación portátiles para camping y pescar*

1.3.3. Nuevas tendencias

El gran auge del uso de paneles fotovoltaicos para la generación eléctrica en los últimos años ha permitido que la industria de paneles desarrolle nuevas tecnologías para producir paneles cada vez de menor coste.

Actualmente existen diversas soluciones técnicamente viables para la generación de electricidad a partir de luz solar basadas, fundamentalmente, en células fotovoltaicas de silicio relativamente caras. Las tecnologías actuales de película delgada basadas en el silicio podrían estar llegando al límite en cuanto a relación eficacia-coste.

Nuevos desarrollos incluyen células solares esféricas y paneles orgánicos entre otros.

En Japón líder en tecnología fotovoltaica se ha desarrollado unas nuevas celdas solares con forma esférica y minúsculo tamaño entre 1 y 1,5 mm de diámetro, a diferencia de las celdas planas tradicionales de 72 mm. El avance podría suponer una revolución en la expansión y campo de aplicación de la energía solar fotovoltaica.

Sphelar®, el producto desarrollado por la empresa japonesa Kyosemi, consiste en una matriz de pequeñas células solares esféricas capaces de absorber la radiación solar con cualquier ángulo, pudiendo aprovechar tanto la radiación reflejada como la difusa, con esta tecnología no es necesario el uso de seguidores y su eficiencia llega a superar el 20%.

La disposición de las células en un medio flexible y transparente, amplía el campo de aplicaciones para la energía solar fotovoltaica, como la posibilidad de incorporarlas en pequeños aparatos electrónicos o convertir grandes superficies acristaladas como generadores de electricidad. Su aplicación en España permitiría reducir el impacto visual, especialmente en grandes ciudades y zonas de interés turístico.

Según la empresa, los costes de producción se reducen a la mitad, comparándolo con la fabricación de las células de silicio convencionales, ya que el silicio empleado se aprovecha eficientemente tanto en la fabricación de las células como en la producción posterior de energía.

Los paneles fotovoltaicos orgánicos (OPV) cuentan con la ventaja de que se pueden pintar sobre una superficie, como las paredes exteriores de un edificio o el tejado. Además, se pueden elaborar por medio de procesos de impresión y de recubrimiento de alta velocidad y escalables, como las pinturas en aerosol y la impresión de inyección de tinta para cubrir áreas más extensas.

Los módulos de película delgada (thin-film) no están hechos a base de células de silicio convencionales, sino que se basan en CIGS (Cobre Indio Galio Selenio) incrustadas en un soporte flexible y ligero y aptas para colocarlas no sólo sobre los tejados, sino también sobre las fachadas de los edificios, ventanas, teléfonos móviles, ordenadores portátiles y coches.

Estas nuevas tecnologías, que se revelan como más rentables y eco eficientes, que constituyen, sin duda, una alternativa de bajo coste que permite la inversión acorde a las condiciones económicas del precio de la energía en España y el mundo.

España con la nueva ley, no solo reduce el precio de la energía producida si no que también reduce significativamente la cuota de instalaciones fotovoltaicas. La importante reducción en el coste de puesta en marcha de las instalaciones fotovoltaicas compensa la importante reducción en la tarifa de compra. Pero por otro lado la deficiente infraestructura de las redes de transmisión eléctrica en Media Tensión de España, impide el desarrollo de este importante sector de la economía.

Las células solares de polímeros son un tipo de célula solar flexible. Pueden ser de diversas formas, incluyendo: células solares orgánicas (también llamados células solares de plástico), o la química orgánica de células fotovoltaicas que producen electricidad a partir de la luz del sol usando polímeros.

También hay otros tipos de semiconductores de película delgada más estables, que pueden ser depositados en los diferentes tipos de polímeros para crear las células solares. Esta tecnología

es relativamente nueva, y está siendo investigada por universidades, laboratorios y varias empresas de todo el mundo.

En comparación con dispositivos basados en silicio, células solares de polímeros son ligeros (lo cual es importante para los pequeños sensores autónomos), potencialmente desechables y baratas de fabricar (a veces utilizando la electrónica impresa), flexibles, personalizables a nivel molecular, y causan un menor impacto en el medio ambiente. Un dispositivo de ejemplo se muestra en la Figura. 1.11.

Otra ventaja de las celdas solares de polímeros frente a las basadas en cristales de silicio, es que no requieren una orientación óptima al sol ya que el plástico recoge energía de hasta 70° del eje de sol a sol al aire libre y en cualquier orientación en el interior.



Figura 1.11. Célula solar de polímero

Sin embargo estas células solares de polímeros también presentan problemas serios: ofrecen aproximadamente 1 / 3 de la eficiencia de materiales duros, y son relativamente inestables hacia la degradación fotoquímica. Por estas razones, a pesar de los continuos avances en los polímeros semiconductores, la gran mayoría de las células solares se basan en materiales inorgánicos.

Actualmente la empresa Konarka Technologies, Inc. está produciendo celdas utilizando esta tecnología, su campo de aplicación actual es para suministrar energía a teléfonos móviles y ordenadores portátiles. El vertiginoso desarrollo de esta tecnología próximamente permitirá integración arquitectónica que permita a las edificaciones generar su propia energía (autoconsumo fotovoltaico).

Tabla 1.1. *Objetivos de la industria fotovoltaica japonesa*

| <i>Tema</i> | <i>Objetivo para el 2010</i> | <i>Objetivo para 2020</i> | <i>Objetivo para 2030</i> |
|---|------------------------------|---------------------------|---------------------------|
| <i>Coste de producción</i> | <i>100 yen/watt</i> | <i>75 yen/watt</i> | <i><50 yen/watt</i> |
| <i>Duración de vida</i> | - | <i>+30 años</i> | - |
| <i>Consumo de materia prima</i> | - | - | <i>1 g/watt</i> |
| <i>Costo del conversor</i> | - | - | <i>15 000 yen/kW</i> |
| <i>Costo de la batería</i> | - | <i>10 yen/Wh</i> | - |
| <i>Eficiencia de la célula cristalina</i> | <i>20 %</i> | <i>25 %</i> | <i>25 %</i> |
| <i>Eficiencia de la célula de capa delgada</i> | <i>15 %</i> | <i>18 %</i> | <i>20 %</i> |
| <i>Eficiencia de la célula CIS</i> | <i>19 %</i> | <i>25 %</i> | <i>25 %</i> |
| <i>Eficiencia de la célula III-V</i> | <i>40 %</i> | <i>45 %</i> | <i>50 %</i> |
| <i>Eficiencia de la célula "Dye Sensitized"</i> | <i>10 %</i> | <i>15 %</i> | <i>18 %</i> |

Fuente Nedo (Japón), 134.62 yen = 1 €, agosto de 2009

Capítulo 2. Las células solares

2.1. Principio de funcionamiento

CUERPOS SEMICONDUCTORES INTRÍNSECOS: Mientras que los cuerpos buenos conductores ofrecen escasa resistencia al paso de electrones, los aislantes la ofrecen elevadísima, y entre ambos extremos, se encuentran los semiconductores que presentan una resistencia intermedia.

Un ejemplo de elemento semiconductor es el silicio (Si), la característica fundamental de los cuerpos semiconductores es la de poseer cuatro electrones en su órbita de valencia. Con esta estructura el átomo es inestable, pero para hacerse estable se presenta un dilema: y es que le cuesta lo mismo desprenderse de cuatro electrones y quedarse sin una órbita, que absorber otros cuatro electrones para hacerse estable al pasar a tener ocho electrones. En estas especiales circunstancias, ciertos elementos como el silicio y el germanio (Ge) agrupan sus átomos de manera muy particular, formando una estructura reticular en la que cada átomo queda rodeado por otros cuatro iguales, propiciando la formación de los llamados enlaces covalentes. En estas circunstancias, la estructura de los cuerpos semiconductores, al estabilizarse, debería trabajar como buen aislante, pero no es así a causa de la temperatura. Canto mayor es la temperatura aumenta la agitación de los electrones y por consiguiente se producen enlaces covalentes rotos, dando lugar a electrones libres y huecos (falta de electrón).

SEMICONDUCTORES EXTRÍNSECOS: Ya que las corrientes que se producen en el seno de un semiconductor intrínseco a la temperatura ambiente son insignificantes, dado el bajo valor de portadores libres, para aumentarlos se les añaden otros cuerpos, que se denominan impurezas o dopantes. De esta forma es como se obtienen los semiconductores extrínsecos tan importantes en la energía solar fotovoltaica.

SEMICONDUCTORES EXTRÍNSECOS TIPO N: en la Figura 2.1 se presenta la estructura cristalina del Si dopado con antimonio (Sb) al introducirse un átomo de impurezas de este elemento y hecho por el que recibe el nombre de semiconductor extrínseco.

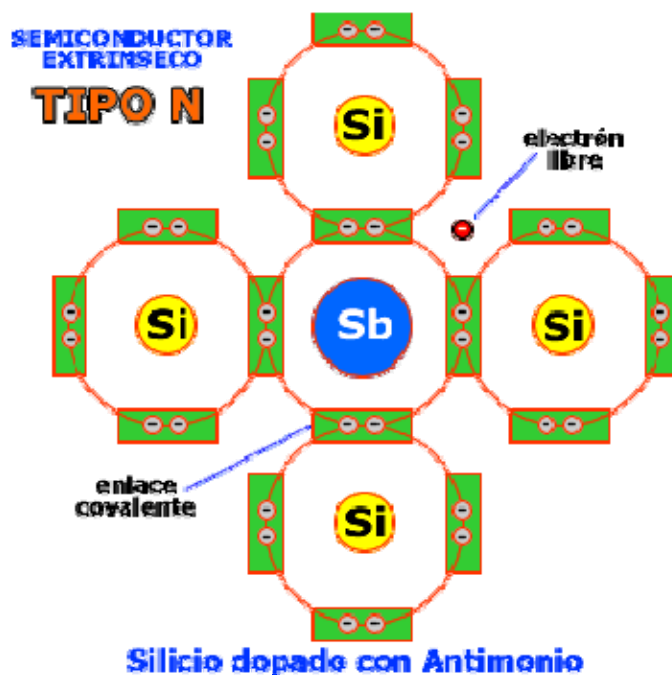


Figura 2.1. Esquema de un semiconductor tipo n.

Como se aprecia el átomo de Sb no solo cumple con los cuatro enlaces covalentes, sino que aún le sobra un electrón, que tiende a salirse de su órbita para que quede estable el átomo de Sb. Por cada átomo de impurezas añadido aparece un electrón libre en la estructura. Aunque se añadan impurezas en relación de uno a un millón, en la estructura del silicio además de los 10^{10} electrones y 10^{10} huecos libres que existen por cm^3 a la temperatura ambiente, hay ahora que sumar una cantidad de electrones libres equivalente a la de átomos de impurezas. En estas condiciones el Si con impurezas de Sb alcanza 10^{16} electrones libres y 10^{10} huecos libres por cm^3 , siendo en consecuencia el número de portadores eléctricos negativos mucho mayor que el de los positivos, por lo que los primeros reciben la denominación de portadores mayoritarios y los segundos la de portadores minoritarios y, por el mismo motivo, se le asigna a este tipo de semiconductores extrínsecos la clasificación de semiconductor extrínseco tipo n.

SEMICONDUCTORES EXTRÍNSECOS TIPO P: en la Figura 2.2 se presenta la estructura cristalina del Si dopado con aluminio (Al). Por cada átomo de impurezas trivalente que se añade al semiconductor intrínseco aparece en la estructura un hueco, o lo que es lo mismo, la falta de un electrón.



Figura 2.2. Esquema de un semiconductor tipo p.

Añadiendo un átomo de impurezas trivalente por cada millón de átomos de semiconductor existen: 10^{16} huecos libres y 10^{10} electrones libres por cm^3 a la temperatura ambiente. Como en este semiconductor hay mayor número de cargas positivas o huecos, se les denomina a estos, portadores mayoritarios; mientras que los electrones libres, únicamente propiciados por los efectos de la agitación térmica son los portadores minoritarios. Por esta misma razón el semiconductor extrínseco así formado recibe el nombre de semiconductor extrínseco tipo p, siendo neutro el conjunto de la estructura, al igual que sucedía con el TIPO N.

UNIÓN DEL SEMICONDUCTOR P CON EL N: Al colocar parte del semiconductor TIPO P junto a otra parte del semiconductor TIPO N, debido a la ley de difusión los electrones de la zona N, donde hay alta concentración de estos, tienden a dirigirse a la zona P, que casi no tiene, sucediendo lo contrario con los huecos, que tratan de dirigirse de la zona P, donde hay alta concentración de huecos, a la zona N. Esto ocasiona su encuentro y neutralización en la zona de unión. Al encontrarse un electrón con un hueco desaparece el electrón libre, que pasa

ocupar el lugar del hueco, y por lo tanto también desaparece este último, formándose en dicha zona de la unión una estructura estable y neutra. Esto se aprecia en la Figura 2.3.



Figura 2.3. Esquema de la unión pn.

Como quiera que la zona N era en principio neutra y al colocarla junto a la zona P pierde electrones libres, hace que cada vez vaya siendo más positiva, mientras que la zona P, al perder huecos, se hace cada vez más negativa. Así aparece una diferencia de potencial entre las zonas N y P, separadas por la zona de unión que es neutra. La tensión que aparece entre las zonas, llamada barrera de potencial, se opone a la ley de difusión, puesto que el potencial positivo que se va creando en la zona N repele a los huecos que se acercan de P, y el potencial negativo de la zona P repele a los electrones de la zona N. Cuando ambas zonas han perdido cierta cantidad de portadores mayoritarios que se han recombinado, la barrera de potencial creada impide la continuación de la difusión y por tanto la igualación de las concentraciones de ambas zonas. La barrera de potencial es del orden de 0.2 V cuando el semiconductor es de Ge y de unos 0.5 V cuando es de Si.

Las aplicaciones de la energía solar fotovoltaica están basadas en el aprovechamiento del efecto fotovoltaico que tiene mucho que ver con lo explicado anteriormente. De forma muy resumida y desde el punto de vista eléctrico, el "efecto fotovoltaico" se produce al incidir la radiación solar (fotones) sobre los materiales que definimos al principio como semiconductores extrínsecos. La energía que reciben estos provenientes de los fotones, provoca un movimiento caótico en el interior del material.

Al unir dos regiones de un semiconductor al que artificialmente se había dotado de concentraciones diferentes de electrones, mediante los elementos que denominábamos dopantes, se provocaba un campo electrostático constante que reconducía el movimiento de electrones. Este material formado por la unión de dos zonas de concentraciones diferentes de electrones la denominábamos unión PN, pues la célula solar en definitiva es esto; una unión PN en la que la parte iluminada será la tipo N y la no iluminada será la tipo P.

De esta forma, cuando sobre la célula solar incide la radiación, aparece en ella una tensión análoga a la que se produce entre las bornas de una pila. Mediante la colocación de contactos

metálicos en cada una de las caras puede “extraerse” la energía eléctrica, que se utilizará para alimentar una carga.

$$E_{\text{FOTON}} = \frac{hc}{\lambda} \geq E_g \quad (2.1)$$

$$E_{\text{FOTON}}(eV) = \frac{1240}{\lambda(nm)} \quad (2.2)$$

Para que se cumpla el efecto fotovoltaico debe cumplirse que:

Por otro lado y dando una explicación desde un punto de vista cuántico, su funcionamiento se basa en la capacidad de transmitir la energía de los fotones de la radiación solar a los electrones de valencia de los materiales semiconductores, de manera que estos electrones rompen su enlace que anteriormente los tenía ligado a un átomo. Por cada enlace que se rompe queda un electrón y un hueco (falta de electrón en un enlace roto) para circular dentro del semiconductor. El movimiento de los electrones y huecos en sentidos opuestos (conseguido por la existencia de un campo eléctrico como veremos posteriormente) genera una corriente eléctrica en el semiconductor la cual puede circular por un circuito externo y liberar la energía cedida por los fotones para crear los pares electrón-hueco. El campo eléctrico necesario al que se hacía referencia anteriormente, se consigue con la unión de dos semiconductores de diferente dopado: Un semiconductor tipo P (exceso de huecos) y otro tipo N (exceso de electrones). Que al unirlos crea el campo eléctrico E .

Cuando conectamos una célula solar a una carga y la célula está iluminada, se produce una diferencia de potencial en extremos de la carga y circula una corriente por ella (efecto fotovoltaico), tal y como se representa en la Figura 2.4.

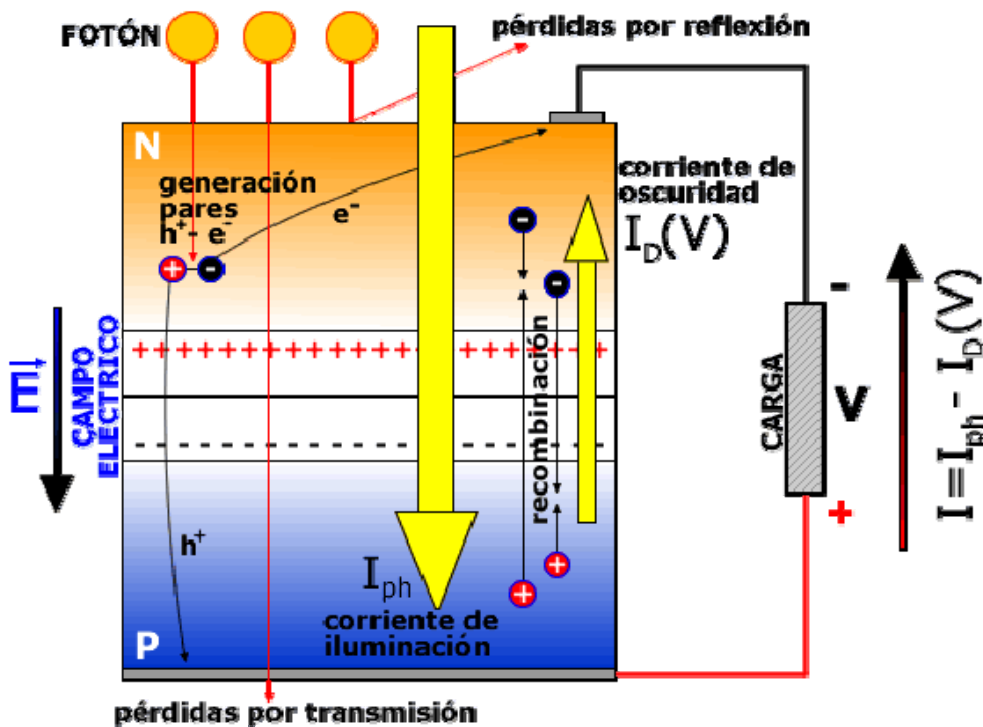


Figura 2.4. Esquema del efecto fotovoltaico, provocado al unir un semiconductor tipo P y otro tipo N.

La corriente entregada a una carga por una célula solar es el resultado neto de dos componentes internas de corriente que se oponen. Estas son:

Corriente de iluminación: debida a la generación de portadores que produce la iluminación.

$$I_{ph} = I_L \quad (2.3)$$

Corriente de oscuridad: debida a la recombinación de portadores que produce el voltaje externo necesario para poder entregar energía a la carga.

$$I_D(V) = I_0 \left[\exp \frac{eV}{KT_c} - 1 \right] \quad (2.4)$$

Los fotones serán los que formaran, al romper el enlace, los pares electrón-hueco y, debido al campo eléctrico producido por la unión de materiales en la célula de tipo P y N, se separan antes de poder recombinarse formándose así la corriente eléctrica que circula por la célula y la carga aplicada.

Algunos fotones pueden no ser aprovechados para la creación de energía eléctrica por diferentes razones.

- Los fotones que tienen energía inferior al ancho de banda prohibida del semiconductor atraviesan el semiconductor sin ceder su energía para crear pares electrón-hueco.
- Aunque un fotón tenga una energía mayor o igual al ancho de banda prohibida puede no ser aprovechado ya que una célula no tiene la capacidad de absorberlos a todos.
- Además, los fotones pueden ser reflejados en la superficie de la célula.

CURVA CARACTERÍSTICA I-V DE ILUMINACIÓN REAL: La curva I-V de una célula fotovoltaica representa pares de valores de tensión e intensidad en los que puede encontrarse funcionando la célula. Los valores característicos son los siguientes:

Tensión de circuito abierto (V_{oc}): que es el máximo valor de tensión en extremos de la célula y se da cuando esta no está conectada a ninguna carga.

Corriente de cortocircuito (I_{sc}): definido como el máximo valor de corriente que circula por una célula fotovoltaica y se da cuando la célula está en cortocircuito.

La siguiente ecuación representa todos los pares de valores (I/V) en que puede trabajar una célula fotovoltaica.

$$I = I_L - I_0 \left[\exp \frac{e(V + IR_s)}{KT_c} - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_F} \quad (2.5)$$

También se puede expresar con:

$$I = I_{sc} \cdot \left(1 - \exp \frac{-e(V_{oc} - V)}{mKT} \right) \quad (2.6)$$

Punto de máxima potencia "PMP" (P_M): Es el producto del valor de tensión máxima (V_M) e intensidad máxima (I_M) para los que la potencia entregada a una carga es máxima.

FACTOR DE FORMA (FF): Se define como el cociente de potencia máxima que se puede entregar a una carga entre el producto de la tensión de circuito abierto y la intensidad de cortocircuito, es decir:

$$FF = \frac{I_M \cdot V_M}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (2.7)$$

Eficiencia de conversión energética o rendimiento: Se define como el cociente entre la máxima potencia eléctrica que se puede entregar a la carga (P_M) y la irradiancia incidente (P_L) sobre la célula que es el producto de la irradiancia incidente G por el área de la célula S :

$$\eta = \frac{P_M}{P_L} = \frac{I_M \cdot V_M}{P_L} \quad (2.8)$$

Dichos parámetros se obtienen en unas **condiciones estándar** de medida de uso universal según la norma EN61215.

Irradiancia: 1000 W/m^2 (1 kW/m^2)

Distribución espectral de la radiación incidente: AM1.5 (masa de aire)

Incidencia normal.

Temperatura de la célula: 25°C .

Otro parámetro es la **TONC o Temperatura de Operación Nominal de la Célula**. Dicho parámetro se define como la temperatura que alcanzan las células solares cuando se someten a las siguientes condiciones de operación:

Irradiancia: 800 W/m^2

Distribución espectral de la radiación incidente: AM1.5 (masa de aire)

Incidencia normal

Temperatura ambiente: 20°C

Velocidad del viento: 1 m/s

Influencia de la temperatura en los parámetros básicos de una célula fotovoltaica: Al aumentar la temperatura de la célula empeora el funcionamiento de la misma:

- Aumenta ligeramente la intensidad de cortocircuito.
- Disminuye la tensión de circuito abierto, aproximadamente: $-2.3 \text{ mV/}^\circ\text{C}$
- El Factor de Forma disminuye.

- El rendimiento decrece.

2.2. Investigación y desarrollo



Figura 2.5. Paneles fotovoltaicos.

La técnica no ha alcanzado la madurez y muchas vías de investigación están siendo exploradas, primero se debe reducir el costo de la electricidad producida, y también avanzar en la resistencia de los materiales, flexibilidad de uso, facilidad de integración en los objetos, en la vida, etc.). Todas las etapas de los procesos de fabricación se pueden mejorar, por ejemplo:

- *La empresa «Evergreen Solar» ha conseguido realizar el depósito de silicio todavía líquido en una película donde se cristaliza directamente con el espesor preciso de la lámina.*
- *La empresa "Nanosolar" ha industrializado la producción de células CGIS mediante una técnica de impresión en continuo, esperando un costo de 1 \$/W en el año 2010.*
- *Todas las compañías han anunciado sucesivos aumentos de la eficiencia de sus células.*
- *El tamaño de las obleas está creciendo de manera constante, reduciendo el número de manipulaciones*
- *Se trata de utilizar mejor todas las longitudes de onda del espectro solar (incluyendo el infrarrojo, lo que abre perspectivas interesantes: la conversión directa de la luz de una llama en electricidad, refrigeración).*
- *Concentradores (ya utilizados en los satélites) se están probando en la tierra. A través de espejos y lentes incrustados en el panel, focalizan la radiación en la célula fotovoltaica. A finales de 2007, Sharp ha anunciado la disponibilidad de un sistema de enfoque hasta 1100 veces la radiación solar (contra 700 veces para la marca previa de 2005); a principios de 2008, Sunrgi ha alcanzado 1600 veces. La concentración permite disminuir la proporción de los grupos de paneles dedicados a la producción de electricidad, y por lo tanto su coste. Por otra parte, estos nuevos materiales soportan muy bien la elevada temperatura debida a la concentración del flujo solar.*

- *Se está estudiando también la posibilidad de unir el silicio amorfo y el cristalino por heterounión en una célula solar más simple de más del 20% de eficiencia. Proyecto de 2 años anunciado a principios de 2008, con la participación del Laboratorio de Innovación para Nuevas Tecnologías Energéticas y Nanomateriales del CEA-Liten y la empresa coreana JUSUNG (proveedor de equipamiento para los fabricantes de semiconductores), con el INES(Savoy) donde la CEA-Liten ha concentrado sus actividades en la energía solar.*
- *Otros semiconductores (selenio; asociación cobre-indio-selenio (CIS) de película fina) se están estudiando por ejemplo en Francia por el instituto de investigación y desarrollo en energía fotovoltaica (IRDEP). El CIS parece ofrecer un modesto rendimiento del 12%, pero con bajo costo de fabricación.*
- *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 sólo 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.*
- *Un equipo de EE.UU. de Boston College en Chestnut Hill (Massachusetts) ha desarrollado paneles solares capaces de recuperar el espectro infrarrojo y convertirlo en electricidad. Esto permitiría la producción de electricidad a partir de cualquier fuente de calor, incluso por la noche. Hasta ahora, sólo una parte de la radiación de la luz visible, predominantemente verde y azul, se transformaba en electricidad y la radiación infrarroja se utilizaba en los paneles térmicos para calentar el agua.*
- *Asimismo, se pretende fabricar células transparentes; modelos impulsados por el Instituto alemán Fraunhofer para la Mecánica de Materiales (IWM; proyecto "METCO" sugieren que las células transparentes bicapa podrían algún día ser producidas industrialmente. Los semiconductores de tipo p transparentes parecen más difíciles de producir (el fósforo podría ser un dopante-P del óxido de zinc, pero el nitrógeno parece ser más prometedor.)*
- *Por último, la escasez de silicio o de productos dopantes (el precio de indio se ha multiplicado por diez desde 2002 hasta 2009 tras su rarefacción) aumenta aún más los incentivos para la innovación de un mercado en fuerte crecimiento que parece enorme, sobre todo si se puede reducir el costo de la electricidad y acercarlo al de los combustibles fósiles.*

2.3. Las cuatro generaciones de células fotoeléctricas

Las células fotoeléctricas se clasifican en cuatro generaciones que indican el orden de importancia y relevancia que han tenido históricamente. En el presente hay investigación en las tres últimas generaciones, mientras que las tecnologías de la primera generación representan el 89.6% de la producción comercial en 2007.

La primera generación de células fotovoltaicas consistía en una gran superficie de cristal simple. Una simple capa con unión diodo p-n, capaz de generar energía eléctrica a partir de fuentes de luz con longitudes de onda similares a las que llegan a la superficie de la Tierra provenientes del Sol. Estas células están fabricadas, usualmente, usando un proceso de difusión con obleas de silicio. Esta primera generación (conocida también como células solares basadas en oblea) son, actualmente, (2007) la tecnología dominante en la producción comercial y constituyen, aproximadamente, el 86% del mercado de células solares terrestres. Las tecnologías de la primera generación no permiten ya avances significativos en la reducción de los costes de producción. Los dispositivos formados por la unión de células de silicio se están acercando al límite de eficacia teórica que es del 31% y tienen un periodo de amortización de 5-7 años.

El silicio es actualmente el material más comúnmente usado para la fabricación de células fotovoltaicas. Se obtiene por reducción de la sílice, compuesto más abundante en la corteza de la Tierra, en particular en la arena o el cuarzo. El primer paso es la producción de silicio metalúrgico, puro al 98%, obtenido de pedazos de piedras de cuarzo provenientes de un filón mineral (la técnica de producción industrial no parte de la arena). El silicio de calidad fotovoltaica debe ser purificado hasta alcanzar más de 99,999%, que se obtiene mediante la conversión del silicio en un compuesto químico que se destila y luego vuelve a transformarse en silicio.

El silicio se produce en barras llamadas «lingotes» de sección redonda o cuadrada. Estos lingotes son luego 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, las obleas son «metalizadas»: unas cintas de metal se incrustan en la superficie y se conectan a contactos eléctricos. Una vez que las obleas se metalizan se han convertido en células solares.

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).

Las técnicas de fabricación y características de los principales tipos de células se describen en los siguientes 3 párrafos. Existen otros tipos de células que están en estudio, pero su uso es casi insignificante.

Los materiales y procesos de fabricación son objeto de programas de investigación ambiciosos para reducir el costo y el reciclado de las células fotovoltaicas. Las tecnologías de película delgada sobre sustratos sin marcar recibió la aceptación de la industria más moderna. En 2006 y 2007, el crecimiento de la producción mundial de paneles solares se ha visto obstaculizado

por la falta de células de silicio y los precios no han caído tanto como se esperaba. La industria busca reducir la cantidad de silicio utilizado. 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 segunda generación de materiales fotovoltaicos se basan en el uso de depósitos epitaxiales muy delgados de semiconductores sobre obleas con concentradores. Hay dos clases de células fotovoltaicas epitaxiales: las espaciales y las terrestres. Las células espaciales, usualmente, tienen eficiencias AM0 (Air Mass Zero) más altas (28-30%), pero tienen un costo por vatio más alto. En las terrestres la película delgada se ha desarrollado usando procesos de bajo coste, pero tienen una eficiencia AM0 (7-9%), más baja, y, por razones evidentes, se cuestionan para aplicaciones espaciales.

Las predicciones antes de la llegada de la tecnología de película delgada apuntaban a una considerable reducción de costos para células solares de película delgada. Reducción que ya se ha producido. Actualmente (2007) hay un gran número de tecnologías de materiales semiconductores bajo investigación para la producción en masa. Se pueden mencionar, entre estos materiales, al silicio amorfo, silicio policristalino, silicio microcristalino, telururo de cadmio y sulfuros y seleniuros de indio. Teóricamente, una ventaja de la tecnología de película delgada es su masa reducida, muy apropiada para paneles sobre materiales muy ligeros o flexibles. Incluso materiales de origen textil.

El silicio durante su transformación, produce un gas que se proyecta sobre una lámina de vidrio. La celda es gris muy oscuro. Es la célula de las calculadoras y relojes llamados de «solares». Estas células fueron las primeras en ser manufacturadas, ya que se podían emplear los mismos métodos de fabricación de diodos.

Ventajas:

- *Funciona con una luz difusa baja (incluso en días nublados),*
- *Un poco menos costosa que otras tecnologías,*
- *Integración sobre soporte flexible o rígido.*

Inconvenientes:

- *Rendimiento a pleno sol bajo, del 5% al 7%.*
- *Rendimiento decreciente con el tiempo (~7%).*

Célula de silicio monocristalino:



Figura 2.6. Célula fotovoltaica basada en silicio monocristalino

Al enfriarse, el silicio fundido se solidifica formando solo un único cristal de grandes dimensiones . Luego se corta el cristal en delgadas capas que dan lugar a las células. Estas células generalmente son de color azul uniforme.

Ventajas:

- *Buen rendimiento de 14% al 16%.*
- *Buena relación $Wp\ m^2$ ($\sim 150\ WC/m^2$, lo que ahorra espacio en caso necesario.*
- *Número de fabricantes elevado.*

Inconvenientes:

- *Coste elevado*

Células de silicio multicristalino:



Figura 2.7. Célula fotovoltaica basada en silicio muticristalino.

Durante el enfriamiento de silicio en un molde se forman varios cristales. La fotocélula es de aspecto azulado, pero no es uniforme, se distinguen diferentes colores creados por los diferentes cristales.

Ventajas:

- *Células cuadradas (con bordes redondeados en el caso de Si monocristalino) que permite un mejor funcionamiento en un módulo,*
- *Eficiencia de conversión óptima, alrededor de 100 Wp/m², pero un poco menor que en el monocristalino*
- *Lingote más barato de producir que el monocristalino.*

Inconveniente

- *Bajo rendimiento en condiciones de iluminación baja.*

¿Policristalino o multicristalino? Hablamos aquí de silicio multicristalino (réf. IEC TS 61836, vocabulario fotovoltaico internacional). El término policristalino se utiliza para las capas depositadas sobre un sustrato (granos pequeños).

La llegada de películas delgadas de Ga y As para aplicaciones espaciales (denominadas células delgadas) con potenciales de eficiencia AM0 por encima del 37%, están actualmente, en estado de desarrollo para aplicaciones de elevada potencia específica. La segunda generación de células solares constituye un pequeño segmento del mercado fotovoltaico terrestre, y aproximadamente el 90% del mercado espacial.

Entre los fabricantes, existe una tendencia hacia las tecnologías de la segunda generación, pero la comercialización de estas tecnologías ha sido difícil.

En 2007, First Solar produjo 200 MW de células fotoeléctricas de CdTe, el quinto fabricante más grande de células en 2007.

Würth Solar comercializó su tecnología de CIGS en 2007 produciendo 15 MW. Nanosolar comercializó su tecnología de CIGS en 2007 y con una capacidad de producción de 430 MW para 2008 en los EEUU y Alemania.

Honda, también comenzó a comercializar su base de paneles solares CIGS en 2008.

En 2007, la producción de CdTe representó 4.7% del mercado, el silicio de película fina el 5.2%, y el CIGS 0.5%.

Las técnicas de fabricación alternativas, como la deposición química de vapor, y la galvanoplastia tienen más ventajas, ya que reducen la temperatura del proceso de forma significativa.

La tercera generación de células fotovoltaicas que se están proponiendo en la actualidad (2007) son muy diferentes de los dispositivos semiconductores de las generaciones anteriores, ya que realmente no presentan la tradicional unión p-n para separar los portadores de carga foto-generados. Para aplicaciones espaciales, se están estudiando dispositivos de huecos cuánticos (puntos cuánticos, cuerdas cuánticas, etc.) y dispositivos que incorporan nanotubos de carbono, con un potencial de más del 45% de eficiencia AM0. Para aplicaciones terrestres, se encuentran en fase de investigación dispositivos que incluyen

células foto-electroquímicas, células solares de polímeros, células solares de nano-cristales y células solares de tintas sensibilizadas.

Se denominan células solares de tercera generación a aquellas que permiten eficiencias de conversión eléctrica teórica mucho mayores que las actuales y a un precio de producción mucho menor. La investigación actual se dirige a la eficiencia de conversión del 30-60%, manteniendo los materiales y técnicas de fabricación a un bajo costo. Se puede sobrepasar el límite teórico de eficiencia de conversión de energía solar para un solo material, que fue calculado en 1961 por Shockley y Queisser en el 31%.

Existen diversos métodos para lograr esta alta eficiencia incluido el uso de célula fotovoltaica con multiunión, la concentración del espectro incidente, el uso de la generación térmica por luz ultravioleta para aumentar la tensión, o el uso del espectro infrarrojo para la actividad nocturna.

Célula Tándem

Apilamiento monolítico de dos células individuales. Mediante la combinación de dos células (capa delgada de silicio amorfo sobre silicio cristalino, por ejemplo) que absorben en el espectro al mismo tiempo se solapan, mejorando el rendimiento en comparación con las células individuales separadas, sean amorfas, cristalinas o microcristalinas.

Ventajas

- *Alta sensibilidad en un amplio rango de longitudes de onda. Excelente rendimiento.*

Desventaja

- *El costo es alto debido a la superposición de dos células.*

Célula multiunión

Estas células tienen una alta eficiencia y han sido desarrolladas para aplicaciones espaciales. Las células multiunión están compuestas de varias capas delgadas usando la epitaxia por haz molecular.

Una célula de triple unión, por ejemplo, se compone de semiconductores GaAs, Ge y GaInP₂. Cada tipo de semiconductores se caracteriza por un máximo de longitud de onda más allá del cual no es capaz de convertir los fotones en energía eléctrica (ver banda prohibida). Por otro lado, por debajo de esta longitud de onda, el exceso de energía transportada por el fotón se pierde. De ahí el valor de la selección de materiales con longitudes de onda tan cerca el uno al otro como sea posible, de forma que absorban la mayoría del espectro solar, generando un máximo de electricidad a partir del flujo solar. El uso de materiales compuestos de cajas cuánticas permitirá llegar al 65% en el futuro (con un máximo teórico de 87%). Los dispositivos de células de uniones múltiples GaAs son más eficaces. Spectrolab ha logrado el 40,7% de eficiencia (diciembre de 2006) y un consorcio (liderado por investigadores de la Universidad de Delaware) ha obtenido un rendimiento de 42,8% (septiembre de 2007). El coste de estas células es de aproximadamente USD 40 \$/cm².

Una hipotética cuarta generación de células solares consistiría en una tecnología fotovoltaica compuesta en las que se mezclan, conjuntamente, nanopartículas con polímeros para fabricar una capa simple multiespectral. Posteriormente, varias capas delgadas multiespectrales se podrían apilar para fabricar las células solares multiespectrales definitivas. Células que son más eficientes, y baratas. Basadas en esta idea, y la tecnología multiunión, se han usado en las misiones de Marte que ha llevado a cabo la NASA. La primera capa es la que convierte los diferentes tipos de luz, la segunda es para la conversión de energía y la última es una capa para el espectro infrarrojo. De esta manera se convierte algo del calor en energía aprovechable. El resultado es una excelente célula solar compuesta. La investigación de base para esta generación se está supervisando y dirigiendo por parte de la DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) para determinar si esta tecnología es viable o no. Entre las compañías que se encuentran trabajando en esta cuarta generación se encuentran Xsunx, Konarka Technologies, Inc., Nanosolar, Dyesol y Nanosys.

Capítulo 3: Investigaciones recientes en células solares

Los semiconductores son materiales que se caracterizan por tener una conductividad que es directamente proporcional a la temperatura, al contrario de los metales. Son peores conductores que estos últimos pero mejores que los aislantes. Se pueden describir como sólidos cuyas bandas de energía (niveles de energía modificados a través de los cuales se mueven los electrones en una red) están divididas en dos por una pequeña brecha denominada *band gap* o banda prohibida. La banda de energía inferior, banda de valencia, contiene electrones que participan en uniones atómicas, mientras que la superior o de conducción contiene electrones involucrados en las corrientes eléctricas. Como en el caso de los aislantes, la banda de valencia de los semiconductores es menor (aproximadamente de 1 eV). Debido a que esta banda es más angosta, es más fácil para los electrones trasladarse de la banda de valencia a la de conducción. Por ejemplo, si aumenta la temperatura, los electrones absorben la energía necesaria para saltar a la banda superior. De esta forma aumenta la cantidad de electrones en la banda de conducción y disminuyen en la de valencia, pareciéndose más a un metal. Que haya menos electrones en la banda de valencia también contribuye a aumentar la conductividad, ya que aumentan los denominados huecos que son considerados como portadores de carga positivos.

En el caso que se hable de banda prohibida óptica, simplemente se refiere a un "*band gap*" cuya medición se ha realizado por medio de un método óptico, en el cual lo que se mide es el coeficiente de transmisión a partir del cual se puede obtener la energía del "*band gap*".

Según un estudio del Laboratorio Nacional de Energías Renovables, es necesario el 15% de eficiencia de conversión eléctrica de energía solar para alcanzar un objetivo competitivo de 0,06\$/kWh, el costo de la energía eléctrica en muchos lugares de EE.UU. hoy en día. Los costes actuales de los sistemas fotovoltaicos basados en las obleas de silicio cristalino se han estimado entre 0,25 \$ y 0,40 \$/kWh. Estos altos costos tienen su origen en gran parte a los altos costos de fabricación de dispositivos fotovoltaicos de silicio cristalino a pesar de las eficiencias razonablemente altas.

3.1. Células solares policristalinas de película delgada

En este momento hay varias opciones de células solares de película delgada de bajo coste que tienen potencial para una mayor eficiencia.

3.1.1. Opción 1 : Silicio amorfo

En comparación con el "*band gap*" del silicio cristalino de 1,1 eV, el silicio amorfo ofrece un "*band gap*" variable de 1,1-1,75 eV, controlado por la composición de la aleación de silicio. Adicionalmente, el silicio amorfo ofrece un coeficiente de absorptividad mayor que el cristalino en el espectro visible. De esta forma, el espesor de silicio amorfo puede ser menor de 1 μm . Generalmente la célula amorfa consiste en una unión p-n (o n-p): una capa transparente de TCO (Óxido conductor transparente) en la parte frontal y una capa metálica como contacto y reflector trasero.

Unas de las ventajas de las células de silicio amorfo es que pueden fabricarse a una temperatura de deposición relativamente baja, generalmente entre 200-500 °C, lo que permite el uso de varios sustratos de bajo coste.

Sin embargo, el silicio amorfo presenta el inconveniente de sufrir una degradación debido a la luz al inicio de su operación.

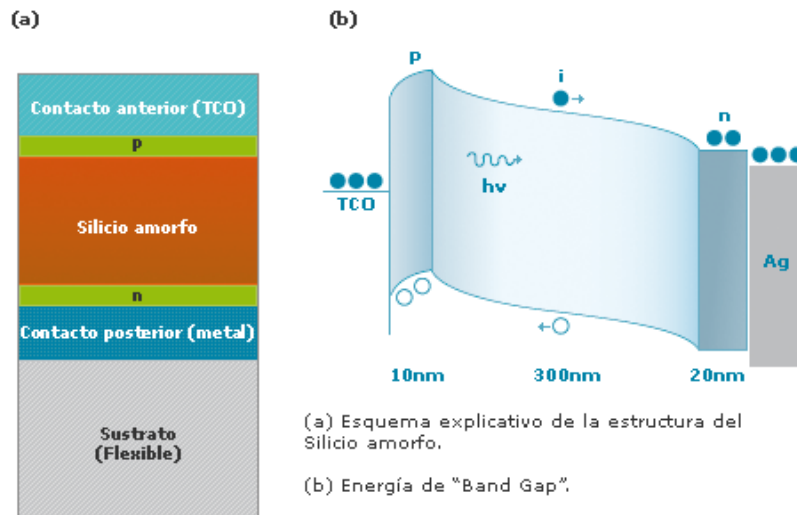


Figura 3.1. Esquema de la célula de silicio amorfo y de su "band gap"

3.1.1.1. Perspectiva actual

El silicio amorfo (α -Si) goza de una tecnología bien establecida con éxito en la deposición de gran superficie (deposición de vapor químico mejorada por plasma). La degradación de la eficiencia de las células solares de silicio amorfo a la luz del sol (inestabilidad Staebler-Wronski), sigue siendo una dificultad importante que requiere de mucha investigación. Un enfoque para la solución de este problema de inestabilidad implica el uso de la técnica del filamento caliente (HW-CVD térmica) para limitar el número de defectos durante la deposición.

En el siguiente punto de este capítulo se analizarán las propiedades de las películas depositadas usando la técnica HW-CVD, puesto que es una de las tecnologías más estudiadas actualmente.

3.1.1.2 Deposición de películas de silicio amorfo hidrogenado (α -Si:H) por el método del filamento caliente deposición química de vapor (HW-CVD): Función de la temperatura del sustrato.

La siguiente información se ha obtenido del artículo "S.R. Jadkar, J.V. Sali, A.M. Funde, Nabeel Ali Bakr, P.B. Vidyasagar, R.R. Hawaldar, D.P. Amalnerkar, (2007) Deposition of hydrogenated amorphous silicon (α -Si:H) films by hot-wire chemical vapor deposition (HW-CVD) method: Role of substrate temperature, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 91, pp 714-720."

Para empezar este apartado, se explicará en qué consisten algunas técnicas que se van a mencionar a lo largo del capítulo.

La deposición química de vapor mejorada por plasma (P-CVD), es una técnica en la cual la deposición sobre un sustrato se consigue mediante la reacción de algunos de los componentes de un gas que se ioniza mediante una descarga eléctrica (en forma de plasma). En efecto se usa la energía que contiene el plasma, en lugar de energía térmica para activar las reacciones químicas. Generalmente, estas descargas se hacen con fuentes de corriente alterna de alta frecuencia, con objeto de aumentar la eficiencia del proceso de deposición. Los equipos disponibles en el laboratorio permiten trabajar a diferentes frecuencias, en el rango de la radiofrecuencia y en el de las microondas. Las ventajas de la P-CVD incluyen: 1) menores temperaturas del sustrato, 2) mejor energía de cobertura, 3) mejor adhesión y 4) velocidades de deposición más altas.

La deposición química de vapor asistida por filamento caliente (HW-CVD) o también llamado método del filamento caliente, al igual que la técnica P-CVD, el objetivo es lograr el depósito de algunos componentes de un gas sobre un sustrato, la diferencia está en que en la técnica HW-CVD, la activación del gas se produce por el calor disipado por la corriente eléctrica que circula a través de un filamento metálico de tungsteno o tantalio, que puede alcanzar temperaturas de 1000-2200 °C. Una desventaja de este método es la posibilidad de contaminación de las películas debido a impurezas metálicas introducidas por el filamento.

Durante las dos últimas décadas y más tiempo, el Silicio amorfo hidrogenado (α -Si:H) ha sido extensamente estudiado como un material básico para aplicaciones de células solares de película delgada. Se han usado varios métodos para producir material con buenas propiedades ópticas y electrónicas y mayores relaciones de deposición. Además de estos, sólo la deposición de vapor químico mejorada por plasma (P-CVD) se ha llegado a establecer para aplicación industrial. Sin embargo, la calidad de las películas α -Si:H del dispositivo preparadas por el método P-CVD con parámetros de deposición optimizados, muestran bajos índices de crecimiento y limitan la deposición de la película a un rango estrecho de temperaturas del sustrato. Los bajos índices de crecimiento aumentan el tiempo de operación del proceso y por consiguiente el coste de la producción. El estrecho rango de temperaturas del sustrato implica la complejidad del control del hidrógeno, el cual es responsable de la degradación de las propiedades electrónicas producida por la luz. Además de la posibilidad de varias reacciones en fase gas induce a la formación de silanos en plasma de mayor orden y el bombardeo de las películas en crecimiento con iones de mayor energía acrecenta la creación de defectos en las películas de α -Si:H, los cuales dificultan las propiedades eléctricas. En consecuencia, es deseable, la investigación de métodos de deposición alternativos que permitan mayores relaciones de deposición y mayor calidad del dispositivo.

Depósito químico en fase vapor asistido por filamento caliente (HW-CVD) o simplemente "método de filamento caliente" ha recibido una considerable atención en los años recientes como un método de deposición alternativo para α -Si:H porque es capaz de mejorar la estabilidad de la película y lograr mayores relaciones de deposición. En el método del filamento caliente no hay que mantener ninguna emisión y sólo las partículas con energías térmicas están involucradas. Este método parece ser capaz de proporcionar un fácil control en la producción de mayores ordenes desconocidos de silanos, cuyas reacciones en fase gas, generalmente conducen a la incorporación de un exceso de hidrógeno en la película. Así mismo, este método requiere pocos parámetros que pueden ser fácilmente optimizados y el proceso de crecimiento

de la película necesita radicales primarios comunes (Si atómico y H atómico) producidos por el filamento caliente. Sin embargo, algunos informes indican que las películas depositadas por el método de filamento caliente no muestran una correlación sistemática entre los parámetros de deposición y las propiedades resultantes de las películas. Por otro lado, algunos informes han mostrado que las películas con un muy bajo contenido en hidrógeno tienen casi la misma calidad que las películas producidas mediante P-CVD, las cuales contienen una gran cantidad de hidrógeno (> 15 at%). Además, las películas obtenidas con el método del filamento caliente muestran menos degradación inducida por la luz.

En este apartado del capítulo, se presentarán las propiedades eléctricas, ópticas y estructurales de películas α -Si:H depositadas por el método del filamento caliente en función de la temperatura del sustrato. Se hizo un intento de depositar películas muy foto sensitivas con bajo contenido en hidrógeno mediante HW-CVD. En el presente estudio, se obtendrán películas de α -Si:H más foto sensibles, con bajo contenido de hidrógeno a mayores relaciones de deposición.

3.1.1.3. Procedimientos experimentales

Las películas fueron depositadas simultáneamente en vidrio "corning #7059" y en obleas c-Si en un sistema HW-CVD. Se utilizó como fuente gas silano puro (SiH_4) y "Matheson Semiconductor Grade". La presión durante la deposición se mantuvo constante usando una válvula reguladora manual. La temperatura del filamento se mantuvo a 1900 ± 25 °C. La temperatura del sustrato se varió desde 50 a 400 °C en intervalos de 50 °C.

Otros parámetros de deposición se enumeran en la **Tabla 3.1**.

Tabla 3.1. Condiciones de formación de las películas de Si:H

Table 1
Deposition conditions for α -Si:H films

| | |
|---|---------------|
| Substrate temperature, T_{sub} (°C) | 50–400 |
| Filament temperature, T_{fil} (°C) | 1900 ± 25 |
| Chamber pressure, P (mTorr) | 20–21 |
| Silane flow rate, F_{SiH_4} (sccm) | 5 |
| Substrate to filament distance, $d_{\text{s-f}}$ (cm) | 6 |
| Deposition time, t (min) | 10 |

En el método del filamento caliente, los sustratos algunas veces se calientan a mayor temperatura que el nivel permisible mediante radiación térmica del filamento caliente. Por ello es crucial un control preciso de la temperatura del sustrato. Se ha informado que el control preciso de la temperatura del sustrato se puede lograr con un amplio espaciado entre el filamento caliente y el soporte del sustrato y con la reducción de la capacidad térmica del soporte del sustrato en el que se monta el sustrato. Sin embargo, una desventaja de este método es la disminución del ratio de deposición. Para mantener la temperatura del sustrato independiente del calor del filamento caliente, se mantiene una distancia entre ellos de 6 cm. Con el fin de garantizar una temperatura estable del sustrato, antes de cada deposición, el soporte del sustrato y la cámara de deposición se hornean durante 2 horas a 200 °C. Esto además ayuda a eliminar cualquier vapor de agua absorbido en el sustrato y a reducir la

contaminación de oxígeno en la película. Después de esto, la temperatura del sustrato se lleva al valor deseado mediante un ajuste apropiado del controlador de temperatura. La temperatura del sustrato se mantiene constante en el valor deseado durante la deposición usando un termopar y un controlador de temperatura con un error de $\pm 2^\circ\text{C}$ con circulación de agua de refrigeración con un caudal de 2400 litros por hora a través del soporte de acero inoxidable del sustrato. Con esta configuración, todavía se observó un pequeño aumento de la temperatura del sustrato de ($\sim 5\text{-}10^\circ\text{C}$) durante los 10 minutos del periodo de deposición para una temperatura del sustrato menor de 150°C .

La conductividad oscura (σ_{dark}) y la foto conductividad (σ_{photo}) se miden con un electrodo coplanar de Al. El espectro FTIR (espectro de infrarrojos por transformada de Fourier) se registró en un Perkin-Elmer espectrofotómetro FTIR. Los enlaces de hidrógeno contenidos (C_H) son calculados a partir de la flexión asimétrica de los picos absorción en el infrarrojo del Si-H usando el método proporcionado por Brodsky et al. La banda prohibida óptica se midió usando una gráfica de Tauc convencional. El espectro de Raman se registró con un Spex tercer láser Espectrómetro Raman. El espesor de la película se determinó con un perfilómetro Talystep (Taylor-Hobson). Para investigar la degradación de las películas optimizadas intrínsecas de a-Si:H, las películas fueron expuestas directamente a una intensa luz solar teniendo una media insolación solar de 860 mW cm^{-2} y la foto corriente fue monitorizada.

3.1.1.4. Resultados y discusiones

3.1.1.4.1 Variación en la velocidad de deposición

La **Figura 3.2** muestra la variación de la velocidad de deposición en función de la temperatura del sustrato (T_{sub}) para las películas de a-Si:H depositadas por el método del filamento caliente. Como se puede ver en la **Figura 3.2**, la velocidad de deposición en películas a-Si:H decrece desde 35 a 12.5 Ås^{-1} mientras la temperatura del sustrato aumenta desde 50 a 400°C . El decrecimiento del ratio de deposición con aumento en la temperatura de sustrato se puede atribuir a la dependencia de la temperatura de la probable reacción o a un aumento en la desorción de silano de la superficie de la película. A una baja temperatura de sustrato, la movilidad de la superficie radial de los átomos añadidos es baja. Como resultado de esto, numerosos átomos añadidos son incorporados en el crecimiento de la película. Con un aumento en la temperatura del sustrato, cada átomo añadido recibe suficiente energía y su movilidad superficial aumenta. Esto aumenta su longitud de difusión permitiéndoles elegir lugares favorables de baja energía. Como resultado de esto, el ratio de deposición disminuye con el aumento de la temperatura de sustrato.

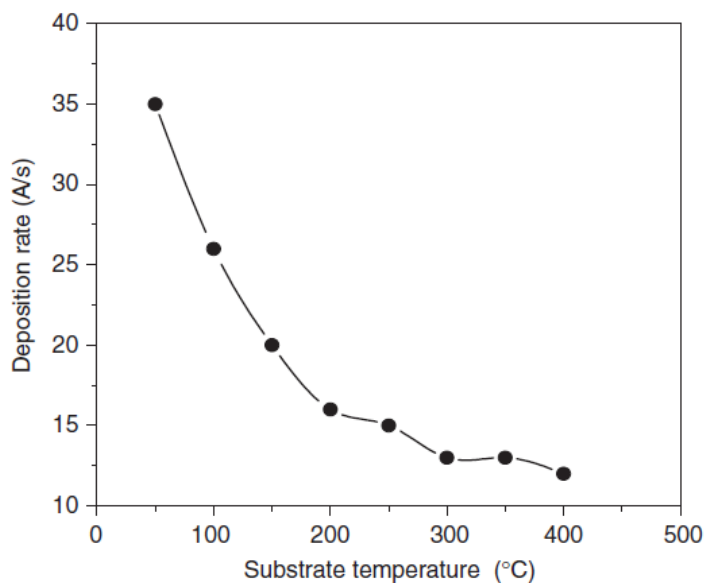


Figura 3.2. Velocidad de deposición frente a la temperatura de sustrato

3.1.1.4.2 Análisis espectroscópico FTIR

El interferómetro de Michelson constituye el corazón de los espectrómetros FTIR, y sustituye a la red de difracción como elemento seleccionador de frecuencias. Un interferómetro de Michelson está constituido por un divisor de haz (beamsplitter), un espejo fijo y un espejo móvil.

El divisor de haz (normalmente se trata de una película delgada de germanio) genera dos ondas en fase viajando en direcciones diferentes, hacia los espejos. Una vez reflejados en éstos, las dos ondas se recombinan nuevamente en el divisor de haz, produciéndose una interferencia entre ambas. Una vez recombinadas, el detector registrará una intensidad que dependerá de la diferencia de camino impuesta por la posición de los espejos.

La señal que recibe el detector en el interferómetro de Michelson corresponde a la transformada de Fourier de la distribución espectral de la fuente infrarroja en estudio. Esta señal recibe el nombre de interferograma.

Una vez que se conoce el interferograma por medida directa, se obtiene la distribución espectral de irradiancia de la fuente infrarroja sin más que calcular la transformada de Fourier inversa.

Un interferómetro de Michelson presenta una serie de ventajas frente a los sistemas dispersivos.

- 1.- Simplicidad mecánica: sólo existe un componente en movimiento (el espejo móvil).
- 2.- Elevada sensibilidad y velocidad (ventaja de Fellgett). Todas las frecuencias se miden simultáneamente. Un espectro completo se puede obtener en un espacio de tiempo muy corto, pudiéndose tomar muchos barridos para realizar promedios y reducir el ruido.
- 3.- Mayor flujo de energía (ventaja de Jacquinot)

4.- Utiliza un láser como referencia interna (ventaja de Connes). La calibración en frecuencias del interferómetro es muy precisa y estable, al utilizar un láser de He-Ne

5.- Elimina la luz difusa. Debido a cómo el interferómetro modula cada frecuencia, no hay equivalente en un FTIR a la luz difusa en los sistemas dispersivos.

6.- Resolución constante a todas las frecuencias.

7.- Ausencia de discontinuidades en el espectro, al no haber cambios de red de difracción.

8.- No hay contribuciones debidas a la reemisión de la muestra, al encontrarse ésta detrás del interferómetro y su emisión no ser modulada por éste.

Con el fin de investigar la configuración del enlace de hidrógeno del silicio y determinar el contenido de hidrógeno en las películas de α -Si:H se usó la espectroscopia FTIR. El espectro FTIR (normalizado por espesor) de películas de α -Si:H depositas mediante el método del filamento caliente en c-Si a varias temperaturas de sustrato (T_{sub}) se muestran en la **Figura 3.3**.

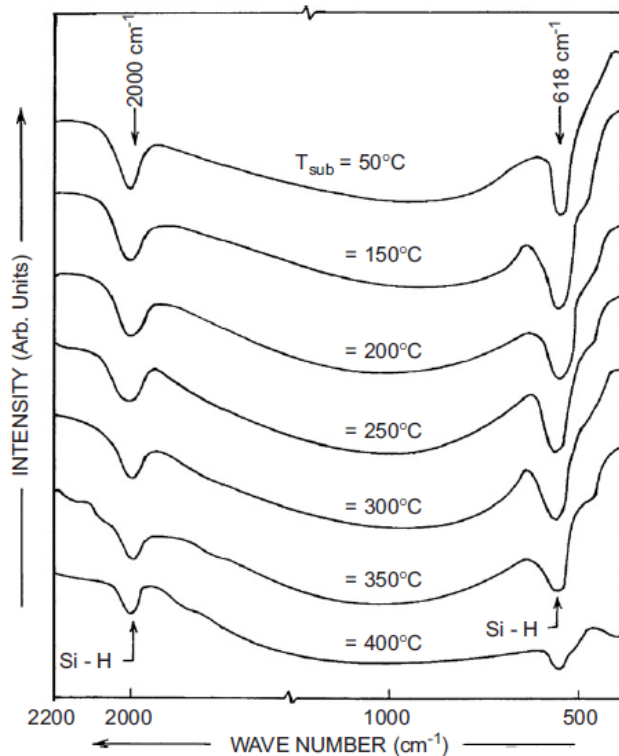


Figura 3.3. Intensidad frente a número de onda para la espectroscopia FTIR realizada a las películas de α -Si:H

De donde se pueden sacar las siguientes observaciones:

1. Todas las películas tienen la mayor banda de absorción en IR centrada cerca de 618 cm^{-1} que corresponden a especies con enlace simple de hidrógeno (Si-H) con vibraciones locales de los modos flexiones simétricas en el plano (balanceo, "rocking")/ flexiones simétricas fuera del plano (aleteo, "wagging"). Esta amplitud de absorción depende de la temperatura de

deposición. Se ve claramente que la amplitud de absorción del aleteo de Si-H disminuye con un aumento de la temperatura del sustrato.

2. La banda de absorción a $1900\text{-}2250\text{ cm}^{-1}$ se observa para todas las películas y puede asignarse a vibraciones locales de las especies Si-H, Si-H₂, SiH₃ del tipo tensión o elongación ("stretching"). Como se ve en el espectro, al aumentar T_{sub} , la intensidad de la banda a $1900\text{-}2250\text{ cm}^{-1}$ también disminuye.

3. Una característica importante del espectro FTIR es la ausencia de la banda de absorción 2090 cm^{-1} debido al di-hidruro (grupo Si-H₂ aislado) o al enlace de hidrógeno arracimado en (Si-H₂)_n forma (grupo Si-H₂ acoplado) encima de todo el rango de T_{sub} estudiado.

4. Todas las bandas están fuertemente ensanchadas, indicando la naturaleza amorfa de las películas.

Estos resultados indican que la configuración del enlace (Si-H) del mono-hidruro de silicio, es predominante en las películas a-Si:H depositadas por el método del filamento caliente. El SiH₄ puede ser descompuesto en Si atómico y H atómico muy efectivamente a la temperatura del filamento $1900 \pm 25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Estos radicales son radicales primarios disponibles para el proceso de crecimiento de la película. Para la deposición de películas de a-Si:H mediante el método HW-CVD, se empleó baja presión de deposición $20 \pm 1\text{ mtorr}$ y una distancia de 6 cm entre el filamento y el sustrato. Bajo estas condiciones, se espera que estos radicales primarios alcancen el sustrato directamente sin ninguna reacción gas. Así pues el crecimiento de a-Si:H en el método del filamento caliente se espera que sea de Si caliente y especies de H. Por lo tanto, sólo se espera una configuración de enlace (Si-H) del mono-hidruro de silicio. La ausencia de la banda de absorción de 2090 cm^{-1} debida a Si-H₂ o SiH₃ en el espectro FTIR en todo el rango de temperaturas de sustrato estudiadas, refuerza esto.

Se observó que el contenido de hidrógeno enlazado en las películas estimadas de métodos diferentes, es bastante diferente. Sin embargo, se ha publicado que el camino más adecuado para estimar el contenido de hidrógeno enlazado, es el pico a $\sim 618\text{ cm}^{-1}$ (rocking/wagging).

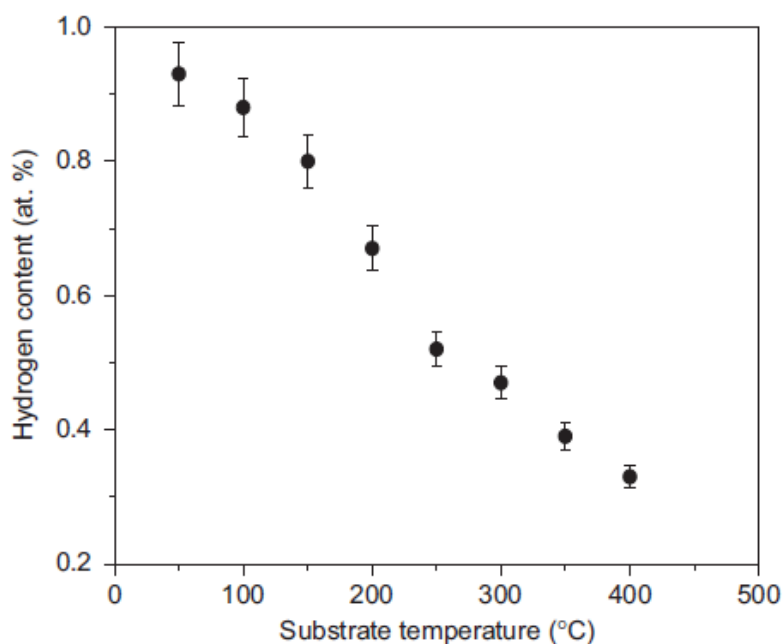


Figura 3.4. Variación en el contenido total de hidrógeno (CH) estimado usando la integrada de la intensidad de la banda de $\sim 618 \text{ cm}^{-1}$ como función de la temperatura de sustrato (T_{sub})

Figura 3.4 muestra la variación en el contenido total de hidrógeno (CH) estimado usando la integrada de la intensidad de la banda de $\sim 618 \text{ cm}^{-1}$ como función de la temperatura de sustrato (T_{sub}). Es interesante tomar nota de que el contenido total de hidrógeno enlazado en las películas se encontró ser menor que 1 at% en todo el rango de temperaturas de sustrato estudiadas. La reproducibilidad del contenido en hidrógeno de las películas se confirmó depositando películas bajo los mismos ajustes de parámetros tres veces. Los valores del contenido en hidrógeno fueron los mismos con un error ($\pm 5\%$). Los errores en el diagrama de la **Figura 3.4** se derivan de las diferencias obtenidas en las medidas FTIR del contenido de hidrógeno, por repetición de la deposición de películas $\alpha\text{-Si:H}$ bajo los mismos ajustes de los parámetros. Sin embargo, las películas $\alpha\text{-Si:H}$ con un muy bajo contenido en hidrógeno (0.07 at%) como informó Mahan et al. no se pueden reproducir. Se cree que el bajo contenido en hidrógeno en las películas $\alpha\text{-Si:H}$ depositadas por el método del filamento caliente es debido a dos factores, es decir, alta densidad de hidrógeno atómico durante la deposición y la ausencia de bombardeo con iones de gran energía de la superficie creciente. Una molécula de SiH_4 cuando se descompone en el filamento caliente produce 4 átomos de H y uno de Si. Por consiguiente, aun sin dilución de hidrógeno, una cantidad significativa de H atómico está presente en la cámara de deposición. El hidrógeno atómico juega un papel crucial en el crecimiento de $\alpha\text{-Si:H}$ mediante el método del filamento caliente. El filamento caliente termaliza estos átomos de hidrógeno. La fracción de estos átomos de hidrógeno calientes colisionaran en la superficie en crecimiento con la suficiente energía para substraer hidrógeno de la superficie de crecimiento de la película. En consecuencia, se evita apropiadamente la generación de un silano mayor, el cual conlleva a una mayor cantidad de hidrógeno en la superficie en crecimiento. El hidrógeno atómico estabiliza la estructura de la película rompiendo los débiles enlaces Si-Si y promocionando uniones cruzadas. Esto permite la deposición de dispositivo $\alpha\text{-Si:H}$ de calidad con bajo contenido de hidrógeno. Además, el calentamiento local de la película en crecimiento, debido a radicales primarios calientes

evaporados del filamento caliente, causan la evaporación de hidrógeno de la superficie en crecimiento. Sin embargo, la temperatura de tales calentamientos locales no se conoce todavía.

3.1.1.4.3. Análisis de la espectroscopía de Raman

La espectroscopia de Raman es una técnica fotónica de alta resolución que proporciona en pocos segundos información química y estructural de casi cualquier material o compuesto orgánico y/o inorgánico permitiendo así su identificación. El análisis mediante espectroscopía Raman se basa en el examen de la luz dispersada por un material al incidir sobre él un haz de luz monocromático. Una pequeña porción de la luz es dispersada inelásticamente experimentando ligeros cambios de frecuencia que son característicos del material analizado e independientes de la frecuencia de la luz incidente. Se trata de una técnica de análisis que se realiza directamente sobre el material a analizar sin necesitar éste ningún tipo de preparación especial y que no conlleva ninguna alteración de la superficie sobre la que se realiza el análisis, es decir, es no-destructiva.

Con el fin de investigar el efecto de tan bajo contenido de hidrógeno en el orden estructural de las películas α -Si:H se ha empleado la espectroscopia de Raman.

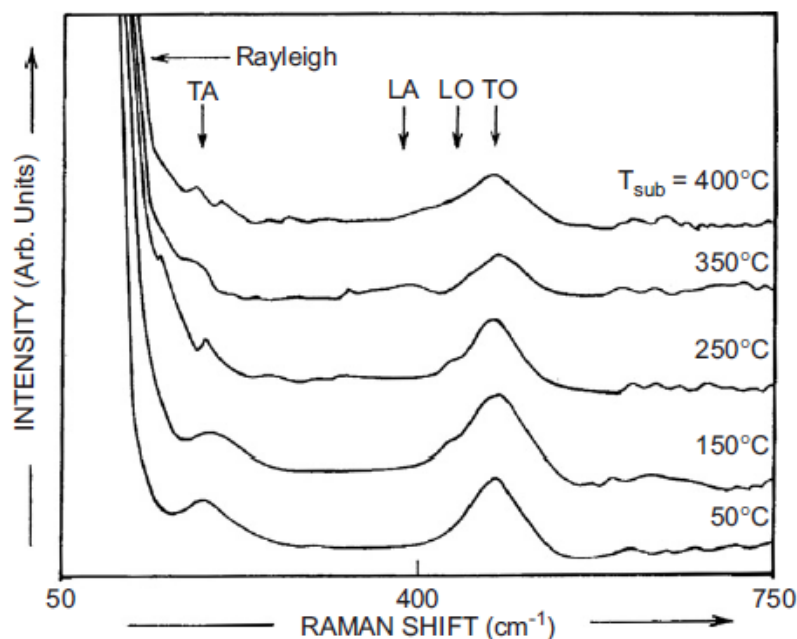


Figura 3.5. Espectro de Raman de películas α -Si:H depositadas en c-Si a diferentes temperaturas de sustrato (T_{sub}) mediante el método del filamento caliente.

La **Figura 3.5** muestra el espectro de Raman de películas α -Si:H depositadas en c-Si a diferentes temperaturas de sustrato (T_{sub}) mediante el método del filamento caliente. La banda ancha y lisa natural del modo transversal óptico (TO) de Raman indica que todas las películas son amorfas. Otro efecto apreciable es el aumento de la dispersión Rayleigh con el aumento en la temperatura del sustrato, el cual se ve en la superposición con la banda transversal acústica (TA) posicionada cerca de 100 - 150 cm^{-1} . La variación de la posición del pico TO (ω_{TO}), su

anchura completa a la mitad del máximo (Γ_{TO}) y la desviación del ángulo de unión ($\Delta\theta$) determinados por el modelo de cálculo de Beeman et al. son representados en la **Figura 3.6**.

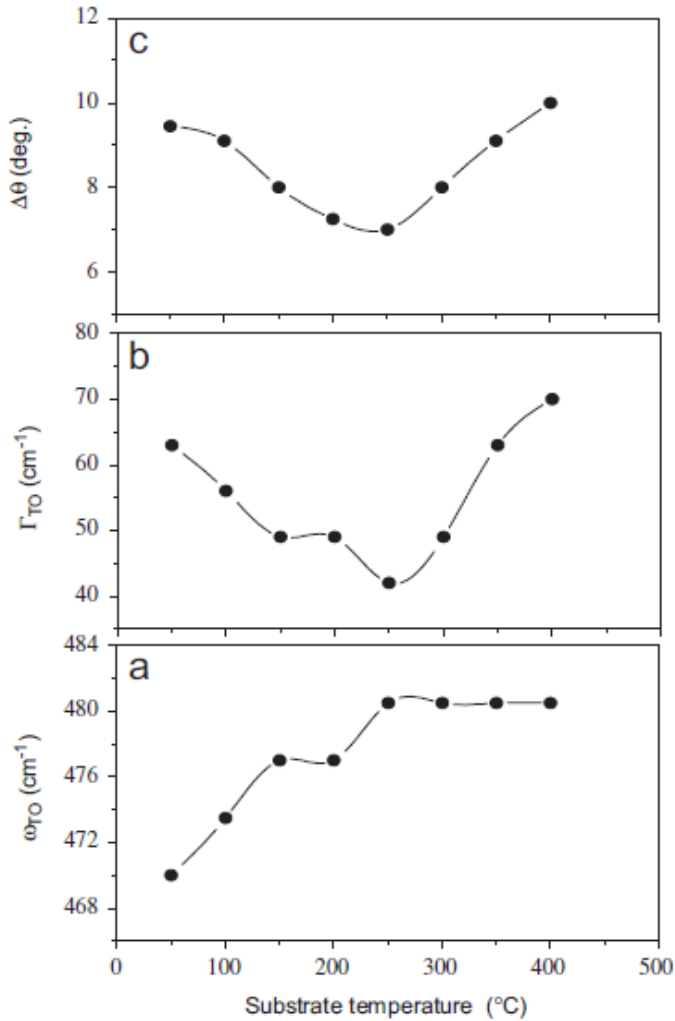


Figura 3.6. Variación de la posición del pico TO (ω_{TO}), su anchura completa a la mitad del máximo (Γ_{TO}) y la desviación del ángulo de unión ($\Delta\theta$) determinados por el modelo de cálculo de Beeman et al.

Como se puede ver en la **Figura 3.6.a**, el pico TO se localiza a 470.0 cm^{-1} para la película preparada a $T_{sub} = 50$ °C, cambiando a 480.5 cm^{-1} para la película preparada a $T_{sub} = 250$ °C y posteriormente se satura a 480.5 cm^{-1} cuando T_{sub} se incrementa aun más a 400 °C. Adicionalmente, se puede observar en la **Figura 3.6.b y c** que tanto Γ_{TO} y $\Delta\theta$ disminuyen con un aumento de la temperatura del sustrato hasta alrededor de 250 °C, a partir de esta temperatura ambas cantidades aumentan. Los mínimos de Γ_{TO} y $\Delta\theta$ son 42 cm^{-1} y 7.00 °, respectivamente. Todas estas variaciones indican que $T_{sub} = 250$ °C es una temperatura de sustrato óptima para la síntesis de películas de a-Si:H por el método del filamento caliente a la cual el desorden estructural es mínimo. Se piensa que la movilidad de los átomos añadidos y la desorción de hidrógeno juegan un papel importante durante el crecimiento de estas películas. Se cree que por debajo de 250 °C, la baja movilidad de los átomos añadidos a la superficie es importante, mientras que por encima de esta temperatura de sustrato empieza a ser más importante debido al aumento de la desorción de hidrógeno durante el proceso de crecimiento.

Se ha observado un aumento de la desorción de hidrógeno durante el proceso de crecimiento debido a un aumento en la temperatura de sustrato para las películas HW-CVD. Durante un pequeño régimen alrededor de $T_{sub} = 250$ °C, las condiciones son tales que los beneficios y los perjuicios del aumento de la temperatura de sustrato, resultan en una estructura de la película de calidad de dispositivo. La conclusión anterior se ve reforzada por la variación observada en la conductividad oscura y en la fotoconductividad en función de la temperatura del sustrato para las películas α -Si:H crecidas mediante HW-CVD (**Figura 3.8**). La película depositada a $T_{sub} = 250$ °C muestra la foto-sensibilidad máxima de ~ 106 debido al mínimo desorden estructural. Más recientemente, experimentos XRD (difracción de rayos X) realizados por Sahu et al. han mostrado que el estrés interno de los materiales HW-CVD es mínimo para las películas depositadas a $T_{sub} = 250$ °C debido a la mejor estructura de las películas. Además, los estudios en tiempo real de elipsometría espectroscópica revelaron que las mejores propiedades de materiales se obtienen cuando las películas HW-CVD α -Si:H son depositadas a $T_{sub} = 250$ -350 °C. Desde que ω_{TO} , Γ_{TO} y $\Delta\theta$ se relacionan con el trastorno topológico en la película, otras técnicas como la microscopía electrónica de transmisión (TEM) ayudaran a aclarar aún más los cambios estructurales y se informará en los futuros trabajos. Es interesante observar que los valores de Γ_{TO} y $\Delta\theta$ son menores que los obtenidos en las películas α -Si:H depositadas por el método de deposición de vapor químico por plasma (P-CVD), en el mismo rango de temperaturas de sustrato. Por lo tanto, según lo sugerido por Mahan y sus compañeros de trabajo, las películas HW-CVD α -Si:H, tienen otra estructura de red Si-Si mejor en comparación con las películas P-CVD α -Si:H.

3.1.1.4.4. Propiedades ópticas

La banda prohibida óptica (E_{opt}) de películas α -Si:H depositadas por el método del filamento caliente a diferentes temperaturas de sustrato (T_{sub}) se muestra en la **Figura 3.7**. La banda prohibida óptica disminuye casi linealmente con el aumento de temperatura de sustrato. Disminuye de 1,86 a 1,70 eV al aumentar la temperatura de sustrato de 50 a 400 °C, típica de una película α -Si:H. En las películas P-CVD α -Si:H, la banda prohibida óptica disminuye a 1.5 eV al reducir el contenido de hidrógeno al 2 at%. Por otro lado, la banda prohibida óptica de las películas HW-CVD α -Si:H sigue siendo tan alta como 1,70 eV o incluso mucho más alta cuando el contenido de hidrógeno en las películas es inferior al 1 at%. Por lo tanto, sólo el número de enlaces Si-H no puede explicar la banda prohibida alta. El alto valor de la banda prohibida óptica en películas HW-CVD α -Si:H puede ser debido a la presencia de microporos en las películas. Los espectros Raman de las películas α -Si:H depositados a diferentes temperaturas de sustrato, indican claramente el aumento de la dispersión de Rayleigh con el aumento de temperatura del sustrato. Esta característica se puede atribuir al aumento de la fracción de huecos en la película. Los microporos reducen la densidad efectiva del material y aumentan el promedio de la distancia Si-Si. Esto reduce la absorción en la película y desplaza la curva de transmisión hacia una mayor energía fotónica. Esto produce una mayor banda prohibida óptica, la cual se calcula mediante la extrapolación de la curva de absorción en el eje de la energía. Por lo tanto, la presencia de microporos en la película previene que la banda prohibida óptica reduzca su valor de 1,70 eV. En el método del filamento caliente, el Si atómico es una de las principales especies responsables del crecimiento de películas α -Si:H a bajas presiones. Se cree que el Si resultará un material rico en poros con un gran factor de estructura (R^*). Los poros se crean en el método del filamento caliente en el crecimiento de las películas α -Si:H.

principalmente por la presencia de efectos de sombreado y al mismo tiempo por la ausencia de bombardeo de partículas cargadas lo que ayuda a aumentar la densidad de las películas por la compactación inducida por impacto de residuos como la pila UPS debido a los efectos de sombreado. Por otra parte, con el aumento de la temperatura del sustrato, la pasivación de la superficie con hidrógeno durante el crecimiento disminuye. Esto aumenta la probabilidad de formación de poros en las películas. Experimentos de dispersión de rayos X en ángulo pequeño (SAXS) calculados por Mahan et al. y experimentos de resonancia magnética nuclear realizados por Wu et al. han revelado que el material obtenido por HW-CVD generalmente, tiene mayor fracción de poros que el material obtenido por P-CVD.

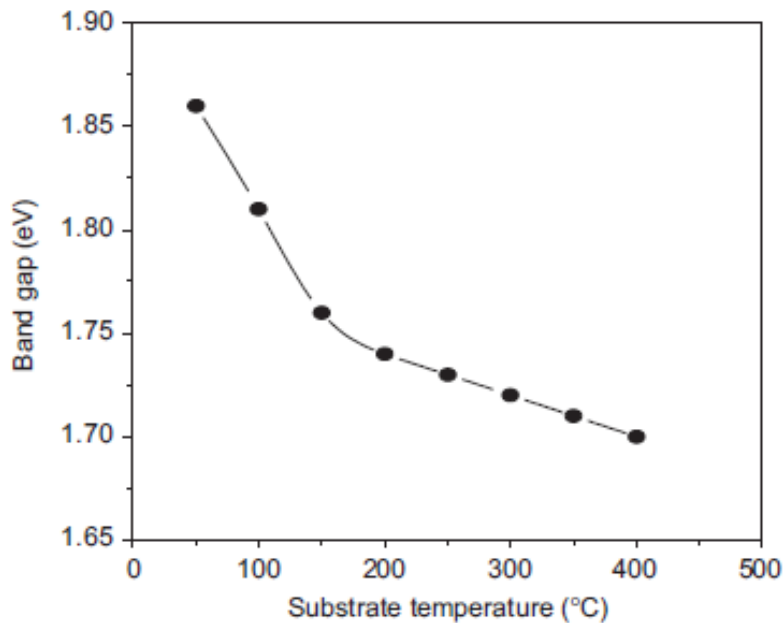


Figura 3.7. "Band gap" óptico en función de la temperatura de sustrato para películas a-Si:H depositadas mediante HW-CVD

3.1.1.4.5. Propiedades eléctricas

La conductividad oscura (σ_{dark}) y la foto-conductividad (σ_{photo}) son dos propiedades opto-electrónicas del silicio hidrogenado, de difícil explicación, por lo que se pasará por alto la misma.

La variación de la conductividad oscura (σ_{dark}) y la foto-conductividad (σ_{photo}) en función de la temperatura de sustrato (T_{sub}) para las películas HW-CVD a-Si:H se muestra en la **Figura 3.8**. Como se puede observar en la figura, σ_{dark} para la mayoría de las películas se encuentra en el rango 10^{-10} a $10^{-11} \text{ Scm}^{-1}$. Estos valores son comparables con los optimizados para las películas P-CVD a-Si:H. Se observa en la curva de σ_{photo} que su valor es máximo ($\sim 10^{-5} \text{ Scm}^{-1}$) para la película depositada a $T_{sub} = 250 \text{ }^{\circ}\text{C}$ mientras que disminuye tanto para valores más bajos como para valores más altos de temperatura de sustrato. A baja T_{sub} ($>200 \text{ }^{\circ}\text{C}$), la desviación del ángulo de enlace es amplia, como se puede ver en la espectroscopia de Raman (**Fig. 3.6**). La densidad de los diferentes estados, los cuales resultan de la desviación en el ángulo de enlace y su longitud, en las últimas bandas, es también amplia. Estos niveles de energía localizados actúan como centros de captura e impiden la foto-conductividad. Cuando T_{sub} está entre 200 y

250 °C, la desviación del ángulo de enlace es mínimo y de ahí la densidad de los estados en las ultimas bandas. Películas depositadas a estas temperaturas de sustrato muestran altas foto-conductividades. A altas temperaturas de sustrato, la película se vuelve más desordenada como sugieren los valores más altos de desviación del ángulo de enlace, y resulta en foto-conductividades más bajas. Por lo tanto, la foto-sensibilidad ($\sigma_{photo} / \sigma_{dark}$) de la película depositada muestra un máximo de $\sim 10^6$ a $T_{sub} = 250$ °C.

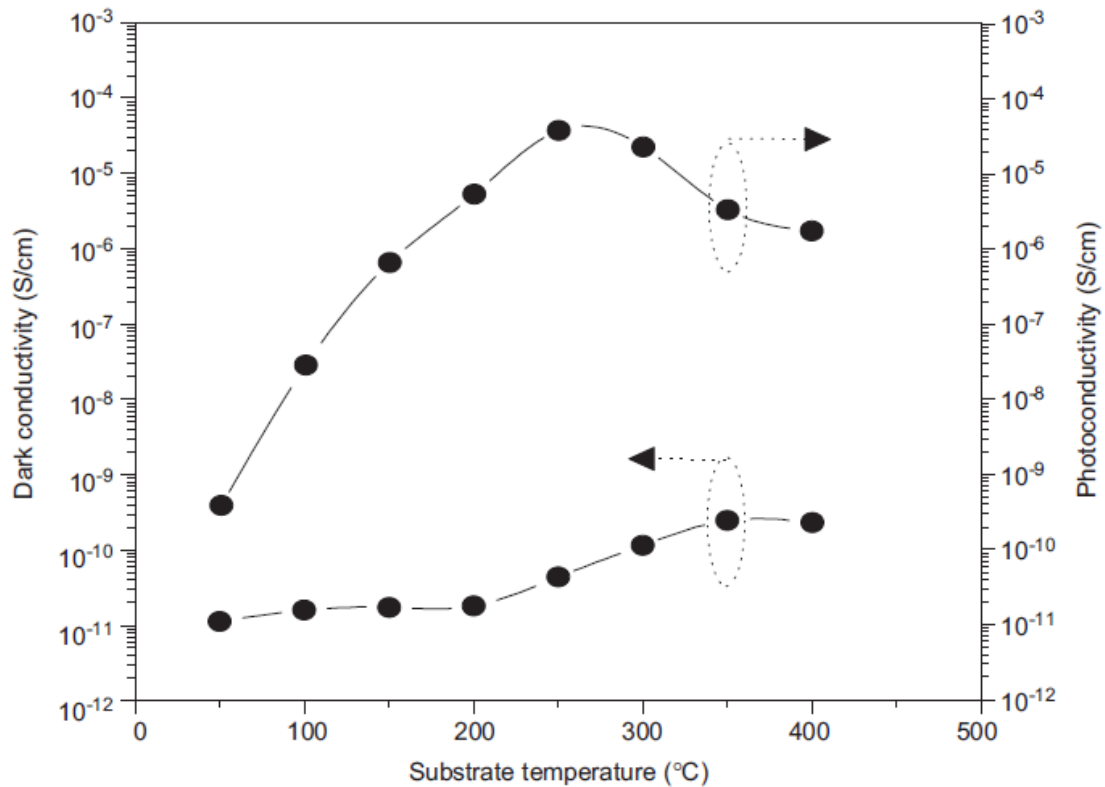


Figura 3.8. Muestra la conductividad oscura y la fotoconductividad en función de la temperatura de sustrato para películas a-Si:H depositadas mediante HW-CVD

Por último, se ha investigado el comportamiento de la degradación de la foto-conductividad óptima intrínseca de una película HW-CVD a-Si:H ($T_{sub} = 250$ °C, espesor = 9000 Å, bajo una radiación de luz solar con una media de insolación de 860 mW cm^{-2}) y se muestra en la **Figura 3.9**. Como se ve en la figura, inicialmente la degradación de la foto-conductividad es bastante alta y luego disminuye poco a poco. El bajo contenido en hidrógeno y las redes más relajadas de Si en las películas HW-CVD a-Si:H pueden ser responsables del comportamiento de degradación de la foto-conductividad.

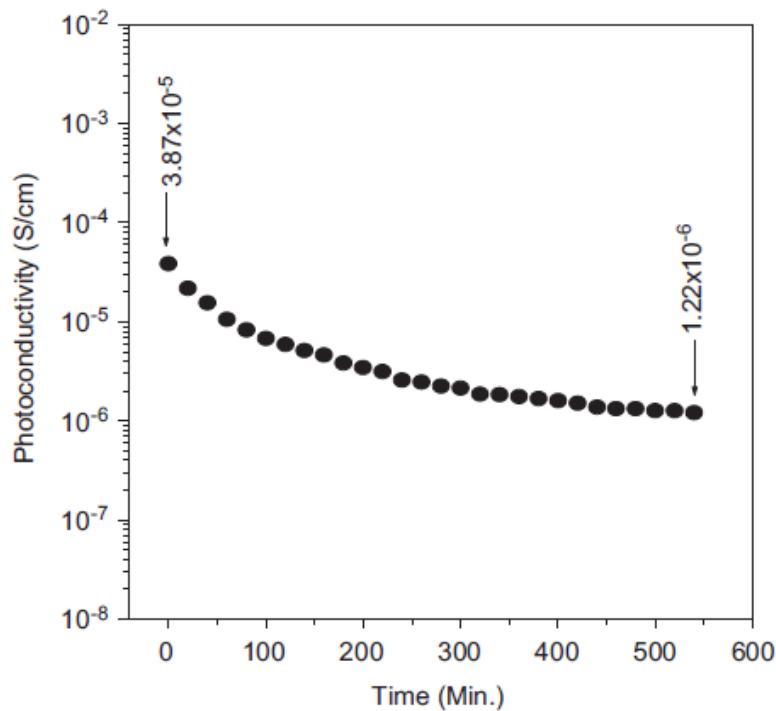


Figura 3.9. Degradación de la foto-conductividad óptima intrínseca de una película HW-CVD a-Si:H en función del tiempo de exposición

3.1.2. Opción 2 : Teluro de Cadmio

Otra de las tecnologías de película delgada que está siendo investigada últimamente es el Teluro de Cadmio.

Una célula típica de Teluro de Cadmio está formada por una capa (tipo p) de Teluro de Cadmio, unida a una fina capa tipo n de CdS y finalmente formada por una capa de TCO (generalmente SnO₂) la cual está conectada con el contacto eléctrico. Un esquema se representa en la **Figura 3.10**.

Ventajas: Existen multitud de técnicas para la fabricación de esta tecnología de película delgada, la mayoría de los cuales tiene un gran potencial para producciones a gran escala.

Desventajas: El coste de los materiales

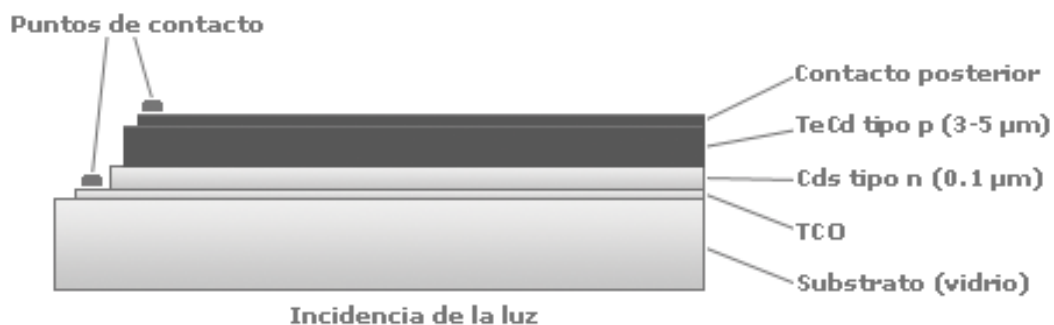


Figura 3.10. Esquema de una célula típica de Teluro de Cadmio

En el siguiente apartado se analizarán las características y propiedades de las células CdTe/CdS obtenidas mediante un nuevo proceso capaz de producir estas células de alta eficiencia.

3.1.2.1. Sublimación en espacio cerrado (CSS), un proceso innovador, adecuado para producir módulos de película delgada CdTe/CdS de alta eficiencia.

La siguiente información ha sido obtenida del artículo científico "N. Romeo, A. Bosio, A. Romeo, (2010) An innovative process suitable to produce high-efficiency CdTe/CdS thin-film modules, Solar Energy Materials and Solar Cells, 94, pp 2-7."

Para empezar este apartado, se explicarán algunas técnicas de deposición, que serán nombradas más adelante.

La deposición por evaporación simple consiste en el calentamiento del material a depositar a temperaturas elevadas hasta alcanzar una presión vapor suficientemente alta, de forma que una fracción apreciable de átomos o moléculas de la superficie pasa al estado de vapor antes de condensarse en capa delgada sobre el sustrato. Este tipo de deposición a de llevarse a cabo en vacío para evitar los problemas asociados a la oxidación de metales a altas temperaturas.

La electrodeposición es un procedimiento electroquímico mediante el cual se logra cubrir una pieza con una fina capa de determinado metal. Para lograrlo se sumerge la pieza a cubrir en una solución electrolítica que contiene los iones del metal que formará la capa. El sustrato se pondrá en contacto con una fuente de corriente continua y con un electrodo que cumplirá la función de ánodo, cediendo electrones para que los iones metálicos se reduzcan y se depositen sobre el sustrato, que cumple la función de cátodo.

La sublimación de un elemento o compuesto es una transición de la fase gas a la fase sólida sin pasar por una etapa líquida intermedia. La sublimación es una transición de fase que ocurre a temperaturas y presiones por debajo del punto triple.

La técnica de deposición de películas finas por sublimación en espacio cerrado consiste en un proceso de sublimación que se lleva a cabo en una cámara cerrada para mantener las condiciones de presión adecuadas.

La técnica de depósito por baño químico (CBD) es una técnica en fase líquida, análoga al CVD en fase vapor, que se basa en la precipitación controlada de un compuesto insoluble en solución acuosa o no acuosa, generalmente alcalina, por medio de la liberación lenta de iones metálicos. La técnica es utilizada para obtener películas sólidas mediante una sola inmersión del sustrato en la solución, permitiendo utilizar las variables tiempo y temperatura como control de la cinética de formación de la película. Entre las ventajas de esta técnica se encuentran: 1) las temperaturas de crecimiento son mucho más bajas que las requeridas en otros métodos como la evaporación al vacío o el CVD. 2) la estequiometría del producto es alcanzada por el producto de solubilidad, lo cual conduce a obtener películas homogéneas. 3) se pueden introducir fácilmente agentes impurificantes (proceso de dopado) como un proceso posterior. 4) el proceso es simple, reproducible a gran escala y de bajo costo.

CdTe con su diferencia de energía de 1.45 eV es un material ideal para ser usado como absorbedor en células solares. Además esta diferencia es "directa", lo cual significa que solo

unas pocas micras de material son necesarias para absorber el 90% de los fotones con energías mayores que 1.45 eV. Su diagrama de fase es bastante simple y solo el compuesto estequiométrico puede ser formado a temperaturas superiores a 300 °C. Mayores temperaturas, unos 500-600 °C, son usadas cuando se deposita por sublimación en espacio cerrado (CSS), crece tipo-p con una concentración de cargas superior que 10^{14} cm^{-3} que son suficientes para formar una buena unión con un socio tipo-n. Esto es bastante importante desde que el dopaje de células policristalinas de película delgada tuvo que ser eludido debido al hecho de que elementos extraños, especialmente metales, generalmente tienden a segregarse dentro de los límites de grano. Películas finas de CdTe pueden ser preparadas por diversos métodos, como evaporación simple, electrodeposición y CSS. Entre éstos CSS ha demostrado ser el más efectivo para conseguir células solares de gran eficiencia desde que esto permite a la película crecer a altas temperaturas de sustrato (500-600 °C) a las cuales el CdTe crece policristalino con un gran tamaño de grano (2-10 μm). Células solares de película delgada de gran eficiencia son obtenidas usando CdS como un n-socio (menos de 100nm de grosor) en la configuración del sustrato. La mayor eficiencia hasta el momento reportada para una célula solar de película delgada del tipo CdTe/CdS es 16.5%. Aquí, la película de CdTe es depositada por la técnica CSS y el CdS es depositado mediante deposición en baño químico (CBD), el contacto delantero es una capa de Cd_2SnO_4 cubierto por un tampón de Zn_2SnO_4 y el contacto trasero está hecho con una capa que contiene una pequeña cantidad de Cu. Debido a las buenas propiedades fotovoltaicas del CdTe y a la buena escalabilidad de las técnicas usadas para producir células solares de película delgada del tipo CdTe/CdS, estos dispositivos son producidos ya en módulos de 60 x 120 cm^2 por dos compañías llamadas Antec Solar en Alemania y First Solar en los Estados Unidos. Hasta ahora, los módulos de CdTe/CdS exhiben eficiencias entre el 7% y el 10%. Se puede lograr un incremento de la eficiencia de los módulos si el proceso de fabricación se simplifica para lograr disminuir la diferencia entre la escala de laboratorio y la industrial. Aquí se describe un proceso que es simplificado notablemente respecto a los usados habitualmente.

3.1.2.1.1. Estructura de la célula.

La célula solar de película delgada del tipo CdTe/CdS está compuesta de cuatro capas(Fig.3.11):

- La capa TCO (óxido conductor transparente) que actúa como contacto delantero.
- La capa de CdS que es el socio de tipo-n
- La capa de CdTe que es el absorbente de tipo-p
- El contacto trasero.

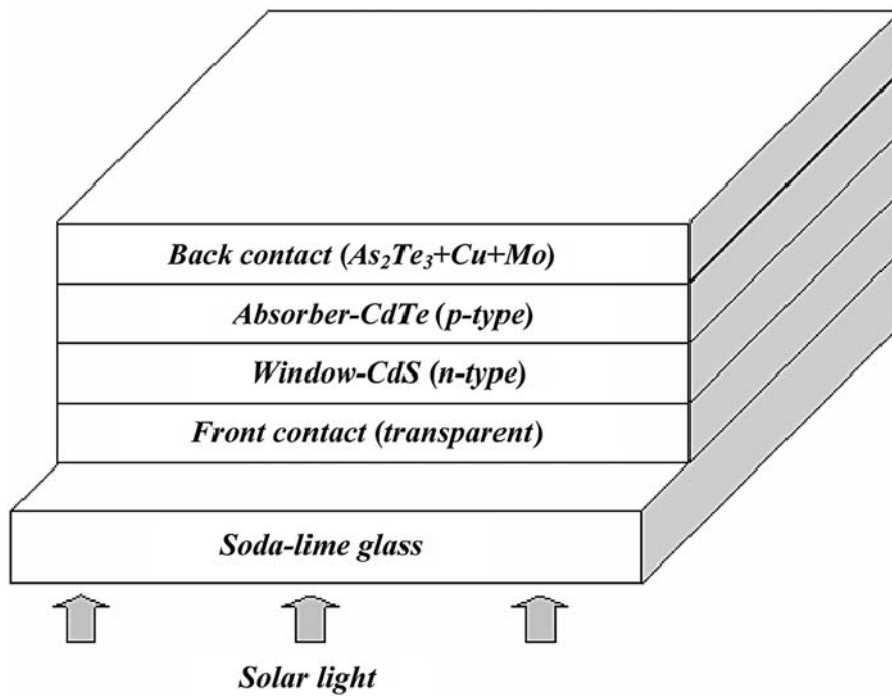


Figura 3.11. Estructura de una célula solar de película delgada del tipo CdTe/CdS

La configuración es del tipo "superestrato", lo que significa que la luz entra por el sustrato de vidrio. Tanto los contactos delantero y trasero están compuestos de dos sub-capas que se explicaran después.

3.1.2.1.2. La capa TCO

Las características más importantes que un contacto delantero de TCO deben ser son una baja resistencia de lámina y una gran transparencia en la región visible. El óxido de Indio y estaño con un 10% de masa de estaño satisface estos requerimientos. Sin embargo debido a la alta temperatura a la que se deposita el CdTe y/o tratado en presencia de cloro, algo del indio puede difundirse desde el ITO a las subsiguientes capas depositadas. El uso de una capa tampón de SnO_2 o ZnO de 100-200 nm de grosor entre ITO y CdS, puede impedir la difusión del In. Recientemente se ha demostrado, mediante Espectrometría de Masas de Iones Secundarios (SIMS) midiendo perfiles de profundidad, que el In tiene una concentración de $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ en CdTe cuando se usa SnO_2 como capa tampón mientras su concentración aumenta a valores de 8×10^{16} - 10^{17} cm^{-3} cuando no se usa la capa tampón. Además, debido a su relativamente alta resistividad, la capa tampón reduce el efecto de un cambio de resistencia proveniente de los pequeños agujeros en la muy delgada capa de CdS.

El ITO es un óxido de estaño dopado con óxido de indio, es transparente e incoloro en capas delgadas. Es uno de los óxidos conductores transparentes más usados debido a sus dos propiedades principales, su conductividad eléctrica y su transparencia óptica, así como la facilidad con que puede ser depositado como una película delgada.

En previsión de una producción industrial, ITO es depositado mediante "DC magnetron sputtering" que es más barato que "RF magnetron sputtering" mientras el SnO_2 y el ZnO son

preparados mediante reactiva "DC magnetron sputtering" en presencia de O_2 usando Zn o Sn puro.

Además de ser la tecnología más limpia que las demás técnicas de revestimiento, el Sputtering proporciona una combinación de ventajas inigualables: en primer lugar el Sputtering es un método de producción económicamente eficiente capaz de generar el revestimiento más sutil y uniforme posible. Es un proceso seco de bajas temperaturas. Construye un enlace indestructible entre la película y el substrato (ya que su soldadura ocurre a nivel molecular) Ofrece una gran versatilidad con respecto a los otros revestimientos ya que, tratándose de una transferencia en frío, puede ser utilizada para depositar materiales conductores o aisladores sobre todo tipo de substrato, incluso los metales, la cerámica y los materiales plásticos sensibles a las temperaturas. Además, el proceso proporciona un control de la deposición repetible automáticamente.

El revestimiento mediante el método de pulverización catódica en alto vacío (denominado Sputttering) es uno de los más flexibles para la deposición física en fase vapor, denominada "PVD" (Physical Vapour Deposition).

El material de revestimiento se introduce en una cámara de vacío como cátodo, bajo la forma de placa metálica. Tras haber vaciado la cámara, se introduce el gas de proceso (normalmente se utiliza argón por su elevado peso atómico).

Se aplica un alto voltaje y se introduce el gas.

Los iones positivos de argón al sufrir un proceso de aceleración sobre el cátodo negativo liberan a su vez los átomos de la placa metálica [material evaporado] que sucesivamente bajan sobre los substratos presentes ya en la cámara y los condensan.

El impacto de los átomos sobre el material evaporado produce el "sputtering" como resultado de la aceleración dada por la partícula expulsada.

Diferentemente de muchas otras técnicas de deposición en vacío, aquí no ocurre fusión de material, por lo cual todos los metales y aleaciones pueden depositarse con una alta eficiencia y bajo un elevado control.

Si, junto al gas de proceso, se introduce en la cámara un gas reactivo, por ejemplo azoto o acetileno, el nitruro reactivo al carburo provocará la deposición del material sobre los substratos.

Cátodos diversos, constituidos por materiales diferentes, pueden ser introducidos en un sistema de revestimiento en vacío produciendo, de tal forma, sistemas multiestrato.

Además es posible modificar la combinación de los simples estratos variando la combinación de los gases reactivos.

RF magnetron sputtering es un proceso de sputtering inducido por radio frecuencia.

DC magnetron sputtering es un proceso de sputtering inducido por una fuente de corriente continua.

3. 1.2.1.3. La capa de CdS

Se pueden obtener células solares de película delgada del tipo CdTe/CdS de altos rendimientos con CdS preparado mediante 3 técnicas diferentes llamadas deposición por baño químico, sublimación en espacio cerrado y RF sputtering. Se eligió esta última técnica puesto que es la más adecuada para producción industrial. Sin embargo, con el fin de tener películas de CdS rociado para conseguir células de alta eficiencia, esto se hace con algo de flúor (F) en la cámara de rociado. Se prepararon películas de CdS dopado con flúor, introduciendo en la cámara de rociado Argón con un contenido del 3% de CHF_3 . Este gas se descompone en la cámara de rociado, siendo negativo es dirigido al sustrato. Se esperaba que el flúor disminuya la resistividad de las películas de CdS, pero esto no sucede. Por otro lado CdS dopado de flúor muestra una distancia prohibida un poco mayor que el CdS sin dopar, una emisión de luminiscencia catódica más fuerte, una fotoconductividad más fuerte y lo que es más importante, da células solares con mayor eficiencia. Posiblemente, el flúor bombardea la película de CdS durante su crecimiento, eliminando cualquier exceso de Cd y S y da una película más estequiométrica. Por otro lado, debería formarse algo de CdF_2 , el cual debería pasivar los límites de grano. CdS dopado con flúor pone de manifiesto ser más estable con respecto a la mezcla CdS-CdTe cuando la estructura CdTe/CdS es tratada a 400°C en presencia de cloro.

3. 1.2.1.4. La capa de CdTe

El método más adecuado para depositar CdTe es sublimación en espacio cerrado (Fig.3.12), aunque la electrodeposición también ha demostrado ser una técnica muy adecuada. Sin embargo, CSS permite mayores relaciones de deposición del orden de varias micras por minuto y ha sido usada para la preparación de las células solares del tipo CdTe/CdS con las mayores eficiencias. Se usó una hendidura de 60 cm de largo y 2.5 cm de ancho y el vapor fue abastecido desde arriba tal como el sustrato de vidrio es bien sostenido en los rodillos portadores. Esto se hace para evitar que el vidrio se curve a 500°C . La temperatura típica del sustrato son 500°C y la distancia sustrato-crisol son ≈ 5 mm. La deposición se hace en atmósfera de Argón con una presión de 10^{-1} -1 mbar. Con una temperatura de crisol de 700°C , se pueden obtener ratios de deposición entre 1 y $4\ \mu\text{m}/\text{min}$.

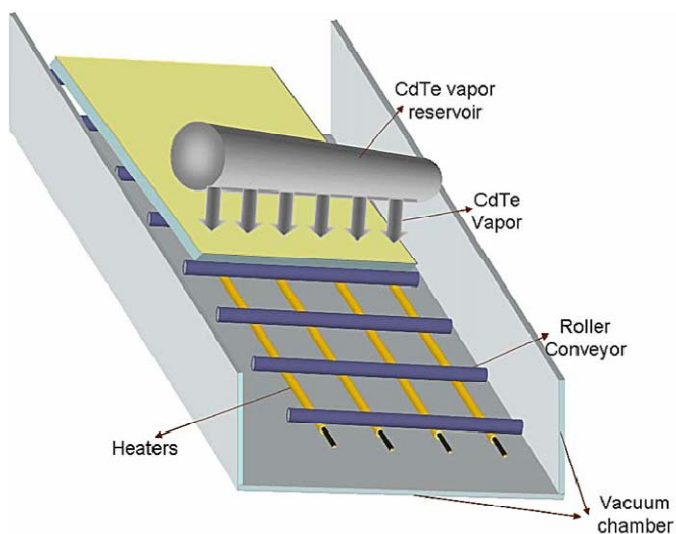


Figura 3.12. Esquema de la deposición de CdTe mediante sublimación en espacio cerrado

3.1.2.1.5. Tratamiento de la estructura CdTe/CdS en presencia de Cl₂

Para conseguir altas eficiencias es necesario el tratamiento del CdTe en presencia de Cl₂. Este tratamiento generalmente se hace depositando CdCl₂ encima del CdTe mediante evaporación o mediante inmersión del CdTe en una solución de CdCl₂-metanol y con un posterior recocido a 400 °C en aire o en gas inerte como el argón. En vistas a una producción industrial, se ha encontrado otro método para llevar a cabo el tratamiento de Cl₂ en el que no se usa CdCl₂.

La estructura de CdTe/CdS se recuece en una mezcla de 100-500 mbar de Ar y 20-50 mbar de un gas no tóxico que contiene Cl₂ tal como difluoroclorometano (HCF₂Cl). La duración del recocido fueron ≈ 5-10 min a 400 °C. Después del tratamiento, se cambia completamente la morfología del CdTe con un aumento en tamaño (Fig.3.13). Puesto que el HCF₂Cl se descompone a 400 °C y el CdTe empieza a descomponerse alrededor de los 400 °C, se supone que sucede la siguiente reacción, especialmente para los pequeños granos que son los primeros en descomponerse:

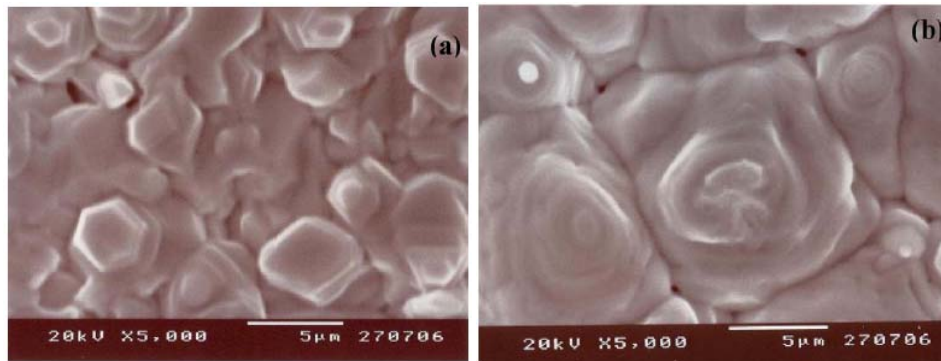
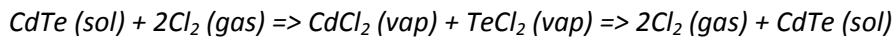


Figura 3.13. Aumento de tamaño en la morfología del CdTe después del tratamiento de recocido

Después del tratamiento de Cl₂, la muestra se mantiene en vacío unos pocos minutos a 400 °C para evitar que CdCl₂ se forme en la superficie del CdTe por re-evaporación y para tener una superficie de CdTe limpia y lista para el contacto trasero.

El tratamiento de Cl₂ puede llevarse a cabo con cualquier gas de la familia del freón. El único requerimiento es que el gas contenga Cl. Este método es muy efectivo para producir células de alta eficiencia. Esto evita el uso de CdCl₂ que puede ser peligroso y en cambio se usa un gas estable, inerte y no tóxico a temperatura ambiente. Además se elimina el paso de la evaporación del CdCl₂ y por ello es mucho más apropiado para producción industrial.

Se sabe que un gas de la familia del freón conteniendo Cl es peligroso para la capa de ozono. Sin embargo, en producción industrial el freón puede recuperarse completamente y ya hay máquinas para ello disponibles.

3.1.2.1.6. El contacto trasero

El contacto trasero de una célula solar de película delgada del tipo CdTe/CdS es una parte muy importante en la fabricación del dispositivo. Un contacto no óhmico causa un vuelco en la

curva I-V característica, lo que disminuye el factor de relleno y, en consecuencia, la eficiencia de la célula. Puesto que el CdTe muestra una gran afinidad electrónica (χ), la mayoría de los metales forman la barrera de Schottky lo que limita el transporte de huecos en el CdTe de tipo-p. El metal usado normalmente para hacer un contacto no rectificado con el CdTe es el cobre. Sin embargo, antes de la deposición del cobre, es necesario un grabado químico para crear una superficie rica en Te que reacciona con el Cu, formando el compuesto Cu_xTe ($1 \leq x \leq 2$). El contacto óhmico no se hace directamente con Cu, el cual se difunde fácilmente en la matriz de CdTe, pero con el compuesto Cu_xTe que se forma en la superficie del CdTe. Cu_xTe con $x > 1.4$ no es un material estable y en consecuencia, libera cobre, el cual siendo un rápido difusor, penetra dentro de la matriz de CdTe causando dos inconvenientes: (1) segrega en las fronteras de grano formando derivación de caminos y (2) llega dentro de la interfase CdTe/CdS y forma un profundo nivel en CdS que captura electrones, incrementando la resistividad del CdS. Puesto que Cu es ión positivo, su difusión dentro de la estructura CdTe/CdS depende de la confluencia del campo interno, a su vez depende del hecho de que la célula es estimulada por un voltaje de polarización externo o es iluminada por una o más fuentes. La degradación del dispositivo se acelera si es calentada a temperaturas superiores a 60 °C o si es iluminada por varias fuentes. Cuando se usa cobre para hacer un contacto óhmico, hay que ser muy cuidadoso para evitar la difusión de cobre. Por esta razón, First Solar usa solo 2 nm de Cu sobre la superficie grabada de CdTe para hacer el contacto trasero en sus células solares de película delgada de CdTe/CdS. En el pasado, para evitar cualquier degradación, no se utilizó cobre, pero se usó un material tipo-p, llamado Sb_2Te_3 . Este compuesto muestra una muy baja resistividad, del orden de $10^{-4} \Omega \text{ cm}$. Si este material es depositado mediante sputtering a una temperatura de sustrato cercana a los 300 °C, puede hacer un buen contacto con el CdTe y puede dar células solares con una eficiencia cercana al 16%. Este tipo de contacto ha logrado ser muy estable aun cuando el dispositivo es iluminado por 10-20 fuentes y a temperaturas superiores a los 100 °C. Recientemente se ha desarrollado un novedoso contacto, el cual a pesar de contener Cu, mantiene la estabilidad del dispositivo y no presenta ningún vuelco en la curva I-V característica. El novedoso contacto está constituido por una capa de As_2Te_3 depositada directamente en la superficie CdTe sin grabado químico, seguida por una capa fina de Cu depositada en el As_2Te_3 a una temperatura de sustrato cercana a los 200 °C. El Cu es entonces cubierto por 150 nm de Mo, que se comporta como contacto trasero externo. As_2Te_3 es un semiconductor tipo-p con una banda prohibida sobre 0.6 eV y muestra una resistividad de $10^3 \Omega \text{ cm}$ a temperatura ambiente. Se funde a 360 °C y puede evaporarse a temperaturas superiores a 250 °C en vacío. Con el fin de conseguir un buen contacto, se tienen que seguir las siguientes pautas: el espesor del As_2Te_3 se puede variar entre 100 y 300 nm, mientras que el espesor del Cu se puede variar entre 2 y 20 nm. As_2Te_3 puede ser depositado a una temperatura de sustrato entre temperatura ambiente y 200 °C, mientras que el Cu tiene que ser depositado a una temperatura de sustrato entre 100 y 200 °C. En experimentos, tanto el As_2Te_3 y el Cu son depositados mediante sputtering, As_2Te_3 con un ratio de deposición entre 10 y 20 Å/s y Cu con un ratio de deposición de 5 Å/s. Si tanto el As_2Te_3 como el Cu son depositados a temperatura ambiente, el contacto es rectificado como se puede ver en la Fig.3.14, curva (a). Aquí el "vuelco" es claramente visible en el primer cuadrante de la curva I-V característica. Si el Cu es depositado a una temperatura de sustrato próxima a 200 °C, el "vuelco" desaparece y el factor de relleno es mucho mayor (Fig. 3.14, curva (b)). Con el fin de comprender el funcionamiento de la doble capa $\text{As}_2\text{Te}_3 + \text{Cu}$, algunas muestras son preparadas por deposición $\text{As}_2\text{Te}_3 + \text{Cu}$

directamente en vidrio con Cu depositado a una temperatura de sustrato de 200 °C. Además, algunas muestras fueron preparadas por deposición de una capa de Cu sobre As_2Te_3 de hasta 20 nm de espesor, mientras otras muestras fueron preparadas por deposición de una capa de 50 nm de espesor. En todos los casos el espesor de As_2Te_3 fue 200 nm. Estas muestras se analizaron mediante Rayos-X y fueron comparadas con muestras que sólo contenían As_2Te_3 . Como se puede ver en Fig. 3.15 y 3.16, curvas (a) y (b), las muestras que contienen Cu hasta 20 nm muestran varias fases de Cu_xTe con $1 \leq x \leq 1.4$, mientras que las muestras que contienen 50 nm de Cu muestran también la fase de $\text{Cu}_{1.9}\text{Te}$. Los contactos traseros de células solares de película delgada del tipo CdTe/CdS fabricadas usando 50 nm de Cu resultan no ser muy estables, mientras que las células fabricadas con 20 nm de Cu o menos resultan ser muy estables y más eficientes. Esto está en concordancia con lo reportado por Wu et al., es decir, las fases de Cu_xTe con $x > 1.4$ no son estables. Una característica célula solar de película delgada del tipo CdTe/CdS, en la cual el contacto trasero se haya hecho por deposición, secuencialmente, a una temperatura de sustrato de 200 °C, 200 nm de As_2Te_3 y 20 nm de Cu, se muestra en la Fig. 3.14, curva (b). Sin grabado químico del CdTe. El factor de relleno de esta célula es ~0.7. La célula es estable aún si se somete a una iluminación de 10 soles en modo de circuito abierto y a una temperatura de 100 °C durante 8 horas. Con la finalidad de comprender más el comportamiento de la doble película $\text{As}_2\text{Te}_3 + \text{Cu}$, se hicieron algunos experimentos sustituyendo As_2Te_3 por Sb_2Te_3 . En este caso, se varió la temperatura del sustrato entre 200 y 350 °C tanto para el Sb_2Te_3 como para el Cu. En todas las células terminadas, el contacto trasero no fue estable aún a pesar de que el espesor del Cu sólo fue de 2 nm. La eficiencia de la célula es bastante alta al principio, pero disminuye muy rápido. Estos resultados pueden ser explicados de la siguiente manera. Cuando el Cu es depositado sobre As_2Te_3 a una temperatura suficientemente alta, 200 °C, Cu produce una reacción en estado sólido con el As_2Te_3 en la cual el Cu sustituye al As formando Cu_xTe . Dependiendo tanto del espesor del As_2Te_3 como del Cu, se pueden formar fases de Cu_xTe con $x \leq 1.4$ o $x \geq 1.4$. La fase estable con $x \leq 1.4$ se puede formar usando un espesor de As_2Te_3 de 200 nm y un espesor de Cu de 20 nm o menos a una temperatura de sustrato próxima a los 200 °C. Este tipo de reacción no puede suceder con el Sb_2Te_3 debido a que el Sb_2Te_3 es un material mucho más estable que el As_2Te_3 . Con Sb_2Te_3 , el Cu continua libre y difunde dentro de la estructura CdTe/CdS dañando la célula. Este novedoso método de hacer el contacto trasero de CdTe es similar, en algunos aspectos, al comunmente usado en el que primero se crea una superficie rica en Te mediante grabado químico del CdTe y entonces se deposita una muy fina capa de Cu con la finalidad de formar el Cu_xTe con $x \leq 1.4$. Sin embargo, una diferencia sustancial se halla en el hecho de que, en nuestro caso, no se graba químicamente el CdTe debido a que no se necesita una superficie rica en Te (esta es sustituida por As_2Te_3) y se puede usar un espesor de Cu 10 veces mayor. Este da una formación menos crítica del contacto no rectificado dando células solares de película fina del tipo CdTe/CdS con una buena estabilidad.

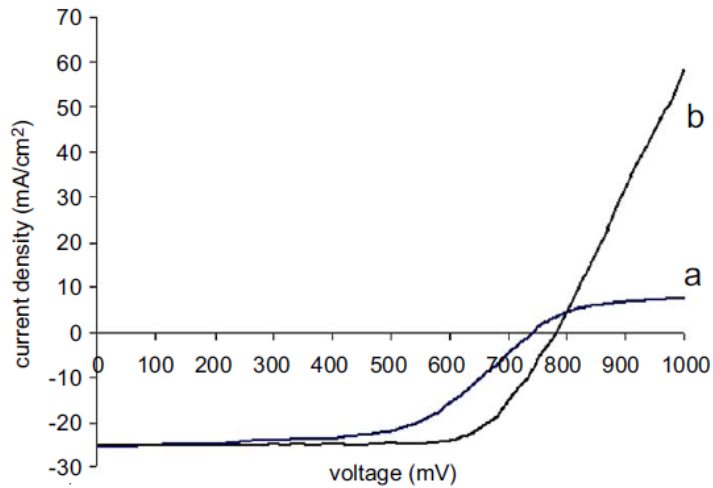


Figura 3.14. Puntos de inflexión o "vuelcos" de la curva I-V característica de las películas de CdTe en las que se ha depositado Cu a una temperatura de sustrato diferente, para la curva a, T_{sub} = temperatura ambiente, para la curva b, T_{sub} = 200 °C.

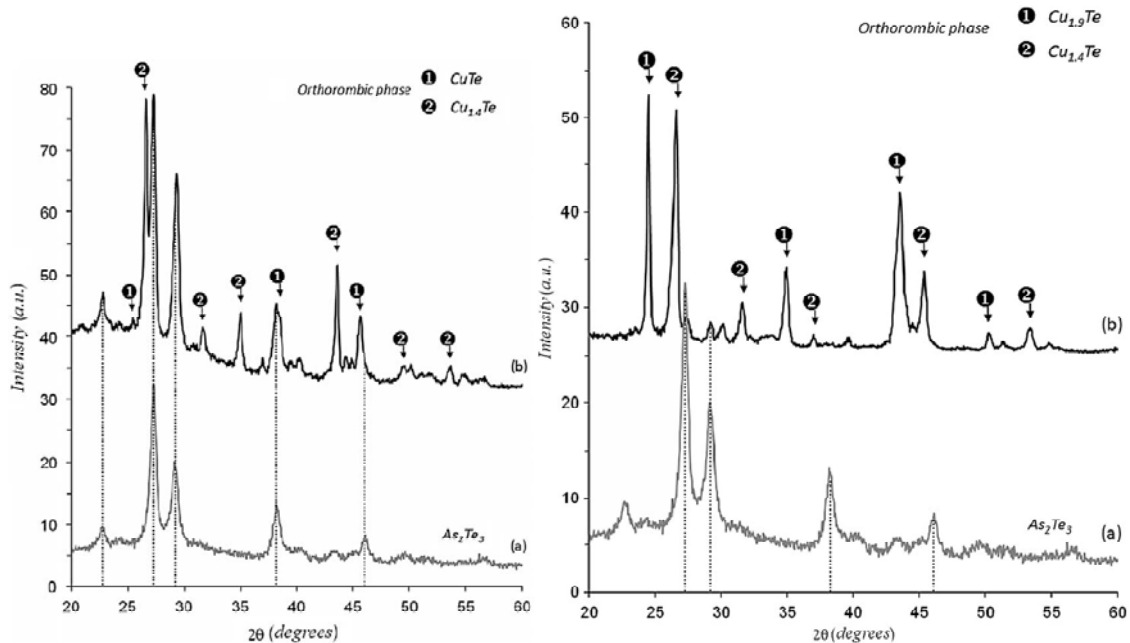


Figura.3.15. y Figura 3.16. Curvas a y b tras exposición de Rayos X, de películas con distinto contenido de Cu.

3.1.2.1.7. La célula solar CdTe/CdS

Se ha preparado una célula solar del tipo CdTe/CdS de 1 cm², usando las capas descritas antes sobre 1 pulgada² de vidrio sódico-cálcico. Estas células se probaron usando un simulador solar Oriel (con una célula de Si calibrada de referencia) bajo un AM1.5, 100 W/cm² luz solar simulada. Un rango de voltajes de circuito abierto entre 840 y 870 mV, corriente de corto circuito entre 24 y 27 mA/cm² y el factor de relleno entre 0.6 y 0.72. La mayor eficiencia conseguida fue 15.8%. La curva I-V característica de la célula se muestra en la Figura 3.17. Las

pruebas de estabilidad se han llevado a cabo, dejando las células varias horas bajo 10 o más soles a temperaturas mayores de 100 °C y no se observó ninguna degradación. En algunos casos, se obtuvo un incremento en el voltaje de circuito abierto.

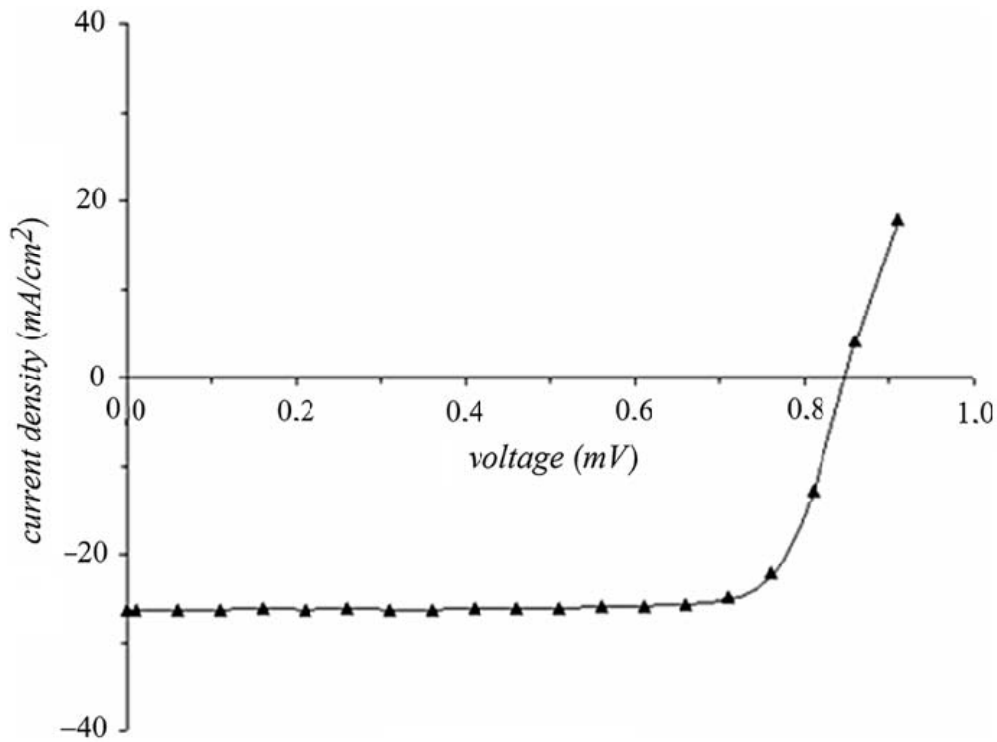


Figura 3.17. Curva I-V característica para una célula solar del tipo Cd/CdS de 1 cm², usando las capas CdTe y CdS descritas antes.

3.1.2.1.8. El proceso de fabricación en línea.

El proceso en línea junto con el perfil de temperatura se muestra en la figura 8. Se usará un vidrio con un tamaño de 0.6 x 1.2 m². El proceso se divide en 3 secciones.

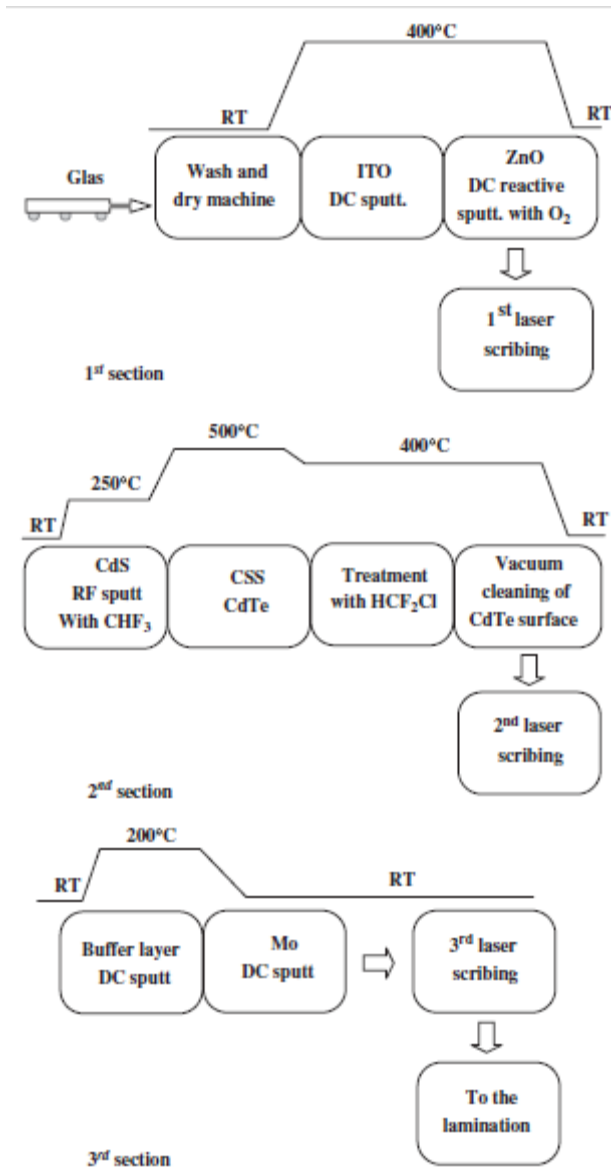


Figura 3.18. Esquema del proceso de fabricación en línea de células del tipo CdTe/CdS

3.1.3. Opción 3 : Células solares de Cobre Indio Galio y Diselenuro (CdS / Cu(In, Ga)Se₂ (CdS /CIGS)

Es una de las tecnologías de película delgada o thin-film, con mayor potencial debido a su alta eficiencia y bajo coste.

Las células CIGS ofrecen un “band gap” variable dependiendo de la composición de In-Ga para maximizar la absorción del espectro solar. El band gap varía desde 1,02 eV a 1,68 eV. Las células CIGS ofrecen el mayor coeficiente de absorción dentro de la tecnología película delgada, lo que permite que alrededor del 99% de los fotones sean absorbidos por los primeros micrómetros del material.

Una célula de silicio convencional está formado por una capa de contacto de molibdeno, mientras que el CIGS, por una fina de CdS o ZnS y una bicapa de aluminio y óxido de zinc como TCO.

Ventajas: Reducción de costes en materiales.

Desventajas: Método de fabricación complicado y con necesidad de inversión importante. Otro problema que se plantea con esta tecnología es la disponibilidad de materiales y la toxicidad de la capa CdS.

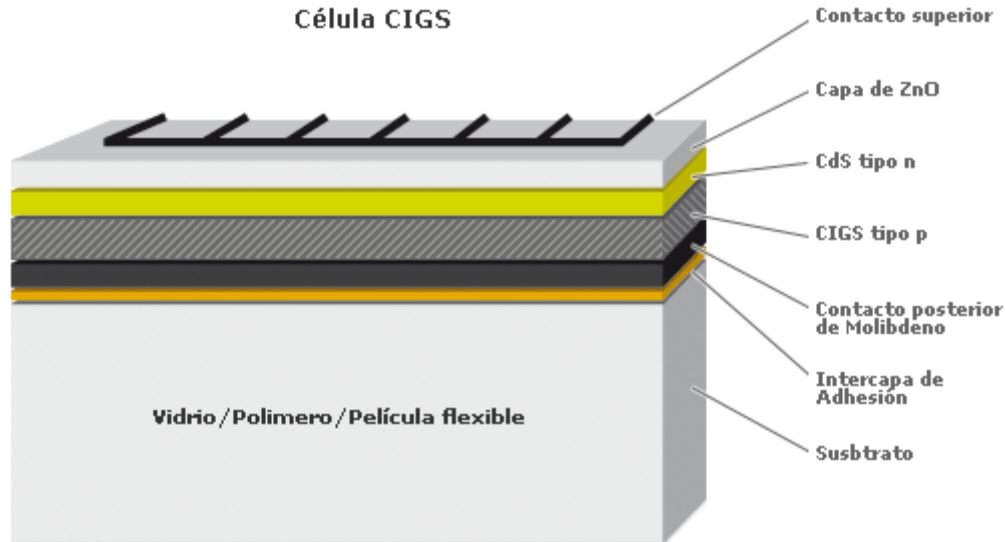


Figura 3.19. Esquema de una célula típica de Cobre Indio Galio Diselenuro (CIGS)

3.1.3.1. Resultados recientes (CdS/CuIn_{1-x}Ga_xSe₂)

Tabla 3.2. Compilación de los resultados recientes de células de película delgada del tipo CdS/CuIn_xGa_{1-x}Se₂

| Table 1 Small area cell results for cells of the type CdS/CuIn _x Ga _{1-x} Se ₂ at AM 1.5 illumination, 25°C | | | | | | | | | | |
|---|------|---------------------|---------------------------------------|--------|-------|-------------------------|------|--|---|--|
| Group | x | V _{oc} (V) | J _{sc} (mA/cm ²) | FF (%) | η (%) | area (cm ²) | Ref. | Absorber deposition process | Comments | |
| IEC ^a | 0.3 | 0.623 | 32.8 | 73.1 | 14.9 | 0.4 | [8] | elemental vacuum evaporation | Uniform Ga content | |
| IPE ^b , Stuttgart | – | 0.661 | 29.7 | 78.6 | 15.4 | – | [9] | elemental vacuum evaporation | Uniform Ga content | |
| Tokyo Institute of Tech. | ~0.2 | 0.595 | 30.4 | 72.0 | 13.0 | 0.179 | [10] | elemental vacuum evaporation | ZnO/In-Se/CIGS, more Ga at Mo contact | |
| Nordic Solar | – | 2.9 | 31.5 | – | 12.4 | 15.0 | [11] | moving source elemental vacuum evaporation | Small area module | |
| NREL ^c | ~0.2 | 0.674 | 34.0 | 77.2 | 17.7 | 0.41 | [12] | elemental vacuum evaporation | Record efficiency for all non-single-crystal thin films | |
| NREL ^c | 0.39 | 0.689 | 27.6 | 71.6 | 13.6 | 0.419 | [13] | Electro-deposited CIGS precursor followed by elemental vacuum evaporation | – | |
| Energy Photo-voltaics | – | 0.633 | 31.55 | 69.6 | 13.9 | 0.422 | [14] | Cu sputtered, selenides and Se evaporated | – | |
| Solarex | – | 0.592 | 34.54 | 75.6 | 15.5 | 0.413 | [15] | Sputtering/evaporation of binaries and elements with subsequent co-evaporation | – | |

^aInstitute for Energy Conversion, University of Delaware.

^bInstitut für Physikalische Elektronik, Universität Stuttgart.

^cNational Renewable Energy Laboratory.

La **Tabla 3.2** muestra una compilación de los resultados recientes de células de película delgada del tipo CdS/CuIn_xGa_{1-x}Se₂. Algunos autores señalan que estos sistemas materiales como las células de óxido de indio y estaño (ITO)/CdS/CuIn_{1-x}Ga_xSe₂ con CdS, denotadas como capa de amortiguación, pero la nomenclatura más común es como se especifica aquí con ITO,

denotadas como capa de ventana, a menudo no se mencionan en la designación de células. Vale la pena observar en la **Tabla 3.2** que una entrada, la del Instituto de Tecnología de Tokio, tiene In-Se, en forma de una capa de amortiguación, sin embargo, sin presencia del Cd. También las entradas de NREL son dignas de mención especial. El récord de eficiencia para una célula de pequeño laboratorio, se acerca al 18%, es un resultado notable. Esta eficiencia del 13,6% para el NREL electro-depositado precursor de CIGS también es importante, ya que la electrodeposición representa una gran promesa para la deposición de gran superficie. Esta entrada particular, corresponde a un proceso híbrido en el que In, Ga y Se han sido añadidos posteriormente mediante un proceso de deposición al vacío al electro-depositado precursor. Una entrada que corresponde a un módulo multi-célula de área pequeña de 15 cm² de la empresa (Nordic Solar) también se ha incluido en la Tabla 1. Una gran variedad de técnicas de deposición se utilizaron para la fabricación de células correspondientes a las entradas en la **Tabla 3.2**. Algunas celdas tienen contenido uniforme de Ga, otras no.

Tabla 3.3. Versión actualizada que muestra los últimos resultados publicados de los módulos / submódulos que van en la zona de 40 a 3.830 cm²

Table 2

Module results for CdS/CuIn_xGa_{1-x}Se₂ structures at AM 1.5, 25°C [16]

| Group | Efficiency (%) | Area (cm ²) | Power (W) |
|-------------------|----------------|-------------------------|-----------|
| Siemens Solar | 11.2 | 3830 | 43.1 |
| EPVs ^a | 6.9 | 3746 | 25.7 |
| ISET ^b | 6.9 | 845 | 5.8 |
| Solarex | 13.0 | 40.4 | 0.525 |

^aEnergy Photovoltaics.^bInternational Solar Electric Technology.

La **Tabla 3.3** es una versión actualizada de lo reportado por K. Zweibel et al. y muestra los últimos resultados publicados de los módulos / submódulos que van en la zona de 40 a 3.830 cm². De especial interés es el área de apertura de la eficiencia del 11,2% del módulo de 3830 Siemens Solar que entregó 43,1 W.

3.1.3.2. Problemas de fabricación de CIGS

Se puede obtener una gran cantidad de información sobre fabricación de los experimentos de pequeña área a escala de laboratorio. El fabricante potencial debe, por supuesto, estar informado de la gran variedad de técnicas de fabricación (de vacío y no vacío) que pueden producir altos rendimientos de la célula. La relativa insensibilidad de los parámetros de celda a una variación del 10% del contenido de Ga ha motivado más aún a I + D orientadas a dispositivos de gran superficie. La reducción de los requisitos de control de Ga debería mejorar la fabricación. El desarrollo de células pequeñas de alta eficiencia tanto las células de Ga escalado como las células no escaladas de Ga es otro indicador de la facilidad de fabricación.

Sin embargo, es necesario abordar algunas cuestiones. La menor resistencia de lámina de la capa ventana de ZnO es sobre~ 10 Ω/cuadrado de la transparencia relativa de las capas. Esto pone restricciones en el desarrollo del módulo, debido al trazado de las interconexiones, y produce dispositivos de mayor voltaje que el deseable. Una solución es desarrollar células con

un mayor contenido de Ga y correspondientemente "band gap" más altas, pero esto no se ha hecho con éxito hasta la fecha.

Otros temas que se abordan actualmente incluyen la necesidad de difusión de Na a partir del vidrio sódico-cálcico a través del contacto trasero de Mo y la correspondiente optimización del espesor del Mo. El costo y la disponibilidad de In y Ga para el despliegue a gran escala puede ser también un tema relevante.

Capítulo 4: Células solares de polímero

Las células solares de polímeros tienen ciertas características atractivas. Debido a que los materiales activos utilizados para la fabricación de dispositivos son solubles en la mayoría de los disolventes orgánicos comunes, células fotovoltaicas de polímero tienen potencial para ser flexible y estar fabricados en un proceso de impresión continua, como la impresión de periódicos. Varias tecnologías de impresión y de recubrimiento han demostrado su compatibilidad con el procesamiento de polímeros semiconductores. **Fig.4.1** muestra que las células solares de polímeros se pueden fabricar utilizando los procesos de impresión estándar.

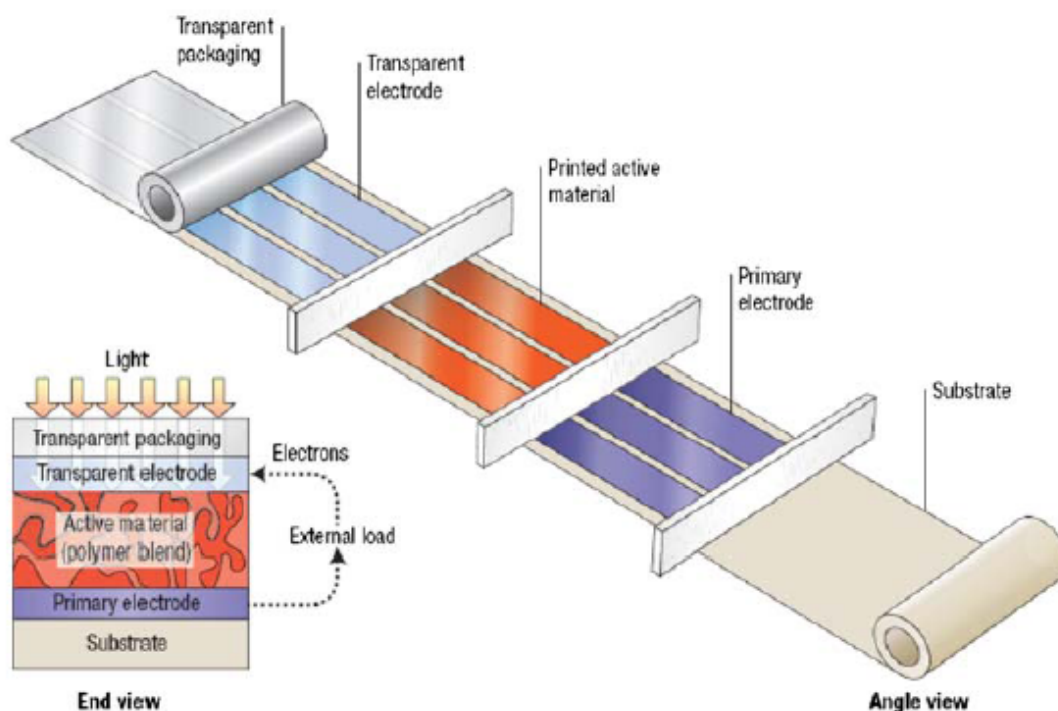


Fig.4.1. Ilustración esquemática de la fabricación de células solares de polímeros mediante procesos de impresión estándar.

La eficiencia de conversión de energía (PCE) más allá de un 6% fue anunciada recientemente, pero este valor está muy lejos de las aplicaciones diarias. Una investigación profunda del mecanismo de funcionamiento y la síntesis creativa de nuevos materiales para acercarse al polímero de alto rendimiento las células solares están resumidas en publicaciones. Mejorar PCE es el primer objetivo de la presente investigación. Al mismo tiempo, algunos científicos visionarios ya han puesto su atención en la vida útil de estas células solares flexibles. Hasta el momento el mejor informe sobre la duración fue de Konarka tecnología hace más de un año.

Este artículo ("Polymer solar cells: Recent development and possible routes for improvement in the performance") da una visión global del reciente desarrollo de células fotovoltaicas de polímero y discute las posibles vías de mejora en el rendimiento de células fotovoltaicas de polímero. Se presenta una introducción de los principios básicos de funcionamiento y materiales poliméricos células solares. Destaca el sistema en curso de los materiales actuales más destacados, son una mezcla de poli (3-hexiltiofeno) (P3HT):1 - (3-met-oxicarbonil) propil-1-fenil [6,6] C₆₁ (PC₆₀BM). El reciente desarrollo de células fotovoltaicas de polímero se resume en

el apartado 4.2. En el apartado 4.3, se discuten las posibles vías de mejora en el rendimiento de células solares de polímeros, es decir, la mejora de la absorción, la ampliación de voltaje de circuito abierto, hacia una morfología controlable, usando nuevas estructuras de dispositivos. También se explica la estabilidad de las células solares de polímeros, células solares libres de ITO y los efectos entorno a la fabricación de células fotovoltaicas de polímero. Se termina este capítulo con una conclusión y perspectivas.

4.1. Principios de operación

Hay tres mecanismos operativos que determinan que las células solares de polímeros tengan capacidad para generar electricidad: la absorción de un fotón, ya sea por los donantes de electrones y / o receptores de electrones, dando lugar a la formación de un estado de excitación, es decir, la creación de pares por el agujero que queda tras el salto de los electrones; difusión excitón en la interfase entre el donante de electrones y el receptor de electrones, es decir, se produce una separación de carga y el transporte de la carga dentro de la mezcla de polímeros a los electrodos respectivos.

El PCE (eficiencia de conversión eléctrica) de una célula solar es definido como:

$$PCE = J_{sc} V_{oc} FF / P_{in} \quad (4.1)$$

Donde J_{sc} es la corriente de cortocircuito, V_{oc} es el voltaje de circuito abierto, FF es el factor de relleno y P_{in} es la potencia de la luz incidente que es estandarizada como 100 mW/cm^2 .

J_{sc} puede ser obtenido mediante:

$$J_{sc} = \frac{q}{h c} \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} EQE P_{in} P(\lambda) \lambda d\lambda \quad (4.2)$$

donde q es la carga elemental, h es la constante de Planck, c es la velocidad de la luz y EQE es la eficiencia cuántica externa, que es la relación entre los electrones de salida y los fotones incidentes. EQE es igual a la multiplicación de todas las eficiencias en los procesos de transferencia de energía.

$$EQE = \eta_{abs} \eta_{diff} \eta_{tc} \eta_{tr} \eta_{cc} \quad (4.3)$$

Donde η_{abs} es la eficacia de absorción de fotones. Los últimos cuatro parámetros, a saber, η_{diff} , η_{tc} , η_{tr} y η_{cc} son la eficiencia cuántica interna (IQE), que representa la eficiencia del proceso de difusión excitón, el proceso de separación agujero-electrón, el proceso de transporte y el proceso de recogida de carga, respectivamente. La eficiencia de transferencia de energía en el proceso de las células solares puede ser descrita en la **Figura. 4.2**.

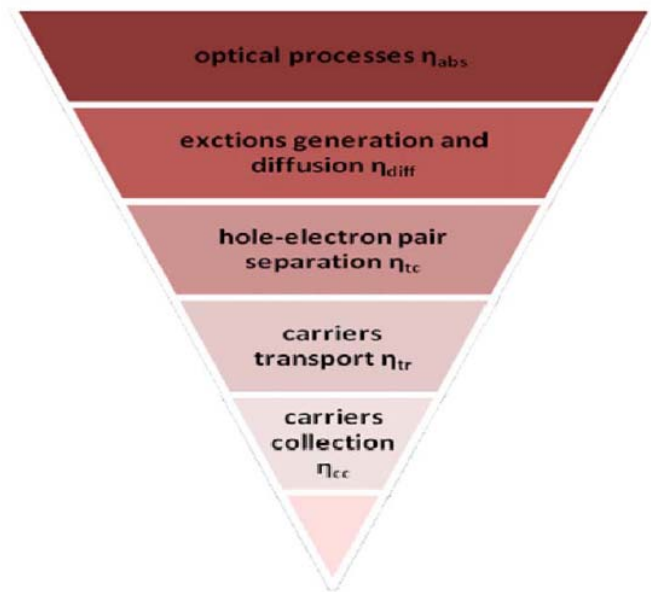


Fig.4.2. Ilustración esquemática de la eficiencia en la transferencia de energía en una célula solar de polímero.

La manera más efectiva para mejorar la J_{sc} es ampliar η_{abs} . En el espectro solar estándar (AM 1.5 G), la energía de radiación máxima es a ~ 500 nm, el flujo de fotones máxima es a ~ 670 nm. Por lo tanto, los materiales poliméricos de células solares necesitan no sólo absorber los fotones de la radiación máxima, sino también tener un amplio espectro de absorción y un alto coeficiente de absorción.

Polímeros semiconductores tienen una menor constante dieléctrica que los semiconductores inorgánicos. La fuerza electrostática de atracción entre los agujeros y los electrones, atracción de Coulomb, es proporcional a $1/\epsilon$, $\epsilon \approx 3$ (valores típicos para los polímeros semiconductores). La atracción de Coulomb en los semiconductores inorgánicos con una mayor constante dieléctrica se puede descuidar. Por el contrario, los polímeros semiconductores requieren una fuerza de más de 0.4 eV para separar el excitón. El área está dividida en la interfase entre el donante de electrones y receptor de electrones. La diferencia entre el orbital molecular desocupado de menor nivel de energía (LUMO) de estos dos tipos de materiales es el origen de los portadores de carga.

Los polímeros semiconductores tienen una mayor constante de extinción que la de los materiales fotovoltaicos inorgánicos. Aproximadamente 300 nm de película es lo suficientemente gruesa como para absorber la mayoría de la luz incidente. Sin embargo, debido a la baja movilidad de los portadores de carga, el espesor optimizado para la mayoría de las células solares de polímeros es menos de 100 nm. Las células solares de polímeros con una nueva configuración de dispositivo se construyeron para la absorción de más fotones y para mejorar la movilidad de los portadores de carga. Cuando un fotón es absorbido por un donante de electrones, el electrón se excita a un estado de energía excitón que está dentro del intervalo de energía. El electrón se une con el agujero con una energía de enlace de 0.4 eV, y esta cuasi-partícula se difundirá en su tiempo de vida hasta que es recombinada y / o separada. La longitud típica de difusión excitón en los polímeros semiconductores es inferior a

20 nm. Si el excitón no se separa a tiempo, se recombinará a un fotón o se descompondrá a través de la termalización. η_{diff} en la ecuación. (3) representa la eficiencia de la difusión de excitaciones hasta el punto de separación.

Cuando el excitón se encuentra en la interfase entre el receptor de electrones con alta afinidad electrónica y los donantes de electrones con alta energía de ionización, serán separados en la escala de tiempo de femto-segundo (~ 50 fs). Este proceso es mucho más rápido que otros procesos de competencia como la fotoluminiscencia (ns) y la recombinación de carga (μ s). Como resultado, η_{tc} es de aproximadamente el 100%. Pero los pares geminados polaron son foto-inducidos en lugar del excitón, los cuales no están separados en la interfase entre el donante de electrones y el receptor de electrones. Debido a la característica intrínseca de las moléculas del polímero, trampas de alta densidad, callejón sin salida en la red de transporte y de pronto, la movilidad es baja y desequilibrada.

Por lo tanto, la eficiencia en el transporte de la carga η_{tr} en células fotovoltaicas de polímero no es la unidad. Debido a un contacto ohmico entre la capa activa y los electrodos y un amplio campo eléctrico incorporado, se creó un estado de transporte de carga mejor, como resultado, la eficiencia del transporte de carga se ha visto comprometida.

La función de trabajo del electrodo está sujeta al nivel de energía del correspondiente material. El V_{oc} de la gran cantidad de hetero uniones de las células está directamente relacionada con la diferencia de energía entre el orbital molecular más alto ocupado (HOMO) de los donantes de electrones y el nivel LUMO de los receptores de electrones. V_{oc} es empíricamente descrito por la siguiente fórmula:

$$e V_{oc} = (|E_{HOMO}^{Donor}| - |E_{LUMO}^{Receptor}|) - 0.3 \quad (4.4)$$

4.2. El reciente desarrollo de células fotovoltaicas de polímero

4.2.1. Materiales poliméricos células solares

En general, los materiales orgánicos que tienen electrones p deslocalizados, absorben la luz del sol, creando portadores de carga foto generados y el transporte de estos portadores de carga pueden ser usados para la fabricación de células fotovoltaicas de polímero. Estos materiales se clasifican en donantes de electrones y receptores de electrones.

La mayoría de los polímeros semiconductores son conductores de huecos. Este tipo de polímeros semiconductores fue denominado como polímeros donantes de electrones. Cuatro representantes importantes de los polímeros donantes de electrones son MEH-PPV, P3HT, PFO-DBT y PCDTBT. Hay un número de excelentes revisiones en profundidad que cubren la selección de materiales para células fotovoltaicas de polímero. Los polímeros de baja diferencia de energía entre bandas y los precursores de polímero también fueron objeto de la investigación de células fotovoltaicas de polímero.

Los polímeros aceptores de electrones, como CN-MEH-PPV, F8TB, y moléculas pequeñas, C_{60} y los derivados solubles de C_{60} y C_{70} , llamados, $PC_{60}BM$ y $PC_{70}BM$. Los fulerenos son considerados como los mejores aceptores de electrones hasta el momento. Esto se debe a: (i) ultrarrápida (~ 50 fs) transferencia foto inducida de carga que sucede entre los polímeros donantes y los fulerenos, (ii) los fulerenos exhibieron una gran movilidad, por ejemplo, $PC_{60}BM$ muestra movilidad de los electrones hasta $1 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$, medido mediante transistores de efecto de campo, (iii) los fulerenos muestran una mejor segregación de fases en la película de mezcla. Los nombres completos de los anteriormente citados materiales orgánicos representativos son:

MEH-PPV: poli [2-methoxy-5-(2'-etil-hexiloxi)-1,4-fenileno vinileno]

P3HT: poly (3-hexiltiofeno)

PFO-DBT: poli [2,7-(9,9-dioctil-fluoreno)-alt-5,5-(4,7'-di-2- tienil-2',1',3'-benzotiadiazole)

PCDTBT: poli [N-9'-hepta-decanil-2,7-carbazole-alt-5,5-(4',7'- di-tienil-2'1',3'-benzotiadiazole)

CN-MEH-PPV: poli-[2-metoxi-5,2'-etilhexiloxi]-1,4-(1-cianovinileno) - fenileno

F8TB: poli (9,9'-dioctilfluoreno-co-bis-N,N'-(4-butilfenil)- bis-N,N'-fenil-1,4-fenilenodiamino

$PC_{60}BM$: 6,6-fenil- C_{61} -butírico ácido metil ester

$PC_{70}BM$: 6,6-fenil- C_{71} -butírico ácido metil ester

4.2.2. La mezcla P3HT: PCBM

En los últimos años, P3HT fue un prominente polímero semiconductor en células fotovoltaicas de polímero. La facilidad de auto-montaje es la ventaja de P3HT. El recocido térmico con la temperatura por encima de su temperatura de transición vítrea puede mejorar la J_{sc} y FF significativamente, por lo que resulta una mayor PCE. La mejora se debe probablemente a la mejor organización de las moléculas P3HT. La difracción de rayos X demostró que parte de las moléculas P3HT están orientadas en paralelo con su cadena principal y las cadenas laterales son perpendiculares al sustrato. El aumento de la movilidad del agujero en la fase de P3HT en la mezcla de los dispositivos de recocido es un factor importante que se traducen en una mejora de PCE. Se observó que la movilidad del agujero es considerablemente mejorada en más de tres órdenes de magnitud, hasta $4.4 \times 10^{-2} \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$. Otras aportaciones para la mejora en el rendimiento fueron el fuerte desplazamiento al rojo de la absorción, la recombinación reducida, bajo relación de composiciones de $PC_{60}BM$.

Blom et al. dedujo que un EQE mayor en condiciones de cortocircuito se debió probablemente al cociente de la disociación del 90% al cierre par hueco-electrón en la interfase entre el donante de electrones y el aceptor de electrones. Mediante el uso de espectroscopía de absorción transitoria, Clarke y sus colegas encontraron que el rendimiento de la fotogeneración de cargas está significativamente mejorado en la escala del tiempo de microsegundos, es una escala de tiempo superior que la división del excitón. Se encontró también que el potencial de ionización de P3HT se redujo después del recocido térmico. Mediante el uso de tiempo ultrarrápido con resolución espectroscopia, Hwang et al. encontraron que el tratamiento térmico de películas de P3HT: PCBM da lugar a una vida más corta del estado par radical

vinculado. Este hallazgo se encontraba en buen acuerdo con que un desplazamiento del nivel inferior LUMO corresponde a una diferencia energética entre bandas de P3HT menor.

También se encontró que los rendimientos de células solares de P3HT: PCBM se vieron afectados por los pesos moleculares, polidispersidad, regioquímica, solventes mezclados sin tratamiento térmico, la aplicación de un campo eléctrico externo, solvente apropiado, el tratamiento con disolvente de vapor, la adición de aditivos como ácido oleico. Todos estos resultados indicaron que era muy complejo controlar la morfología de la película.

En conclusión, los dispositivos de P3HT: PCBM se investigaron bien. Quedo claro que P3HT: PCBM no era un sistema adecuado para aproximarse al alto rendimiento debido a que la diferencia energética entre bandas de P3HT (1.85 eV) es demasiado grande. Esta diferencia energética entre bandas sólo coincide con el 46% del espectro de la radiación solar. Suponiendo que el EQE del dispositivo de P3HT: PCBM es de 100% y su máximo J_{sc} es de 18.7 mA cm^{-2} , FF es del 65%, V_{oc} es de 0,6 V, el PCE máximo proyectado es de 7,2% Este valor está muy por debajo del PCE objetivo.

4.2.3. Desarrollos recientes

El desarrollo de células fotovoltaicas de polímero es muy rápido. Se informó recientemente del PCE de 6% a partir de una sola capa de células solares de polímeros activos. **Tabla 4.1** resume las mejores representaciones de células fotovoltaicas de polímero. Las células solares de polímeros-fullereno han aumentado significativamente su rendimiento.

Tabla 4.1. Resumen de los últimos desarrollos en células solares de polímeros.

| PCE (%) | V_{oc} (V) | FF (%) | J_{sc} (mA/cm ²) | Active materials |
|---------|--------------|--------|--------------------------------|--|
| ~5 | ~0.6 | ~60 | ~11 | P3HT:PCBMs |
| 5.4 | 0.9 | 50.7 | 9.5 | PSiF-DBT:PCBM |
| 5.3 | 0.56 | 63.3 | 15 | PTB1:P ₇₁ CBM |
| 5.2 | 0.62 | 55 | 16.2 | PCPDTBT:PCBM |
| 4.76 | 0.58 | 65.4 | 12.5 | PTB1:PCBM |
| 2.18 | ~0.6 | ~50 | ~7 | Hyperbranched CdSe nanoparticle:P3HT |
| 2.8 | 0.76 | 40 | 9.1 | OC ₁ C ₁₀ -PPV: CdSe tetrapods |
| 6.5 | 1.24 | 67 | 7.8 | PCPDTBT:PCBM/TiO _x /PEDOT:PSS/P3HT:PCBM |
| 6 | 0.88 | 66 | 10.6 | PCDTBT:PC ₇₀ BM/TiO _x |

4.3. Posibles rutas para mejorar el rendimiento

4.3.1. Mejorando la absorción

Uno de los parámetros limitados en células fotovoltaicas de polímero fue la mala absorción. Los materiales con una gran diferencia energética entre bandas poseen una falta de coincidencia con el espectro solar terrestre. Por ejemplo, poli (p-fenileno vinilenos) (PPVs) y politiofenos, sus diferencias energéticas entre bandas son ~ 1,85 y 2,2 eV. La diferencia energética entre bandas de 1,85 eV (el borde absorbente estaba en 670 nm) sólo permite la recogida de un 46% de los fotones. Una diferencia energética entre bandas de 1.1 eV (Si) permitía que más del 90% de los fotones se recogieran. Se muestra la pérdida óptica debida a la desigualdad entre el "band gap" del polímero y el espectro solar en la **Figura. 4.3**.

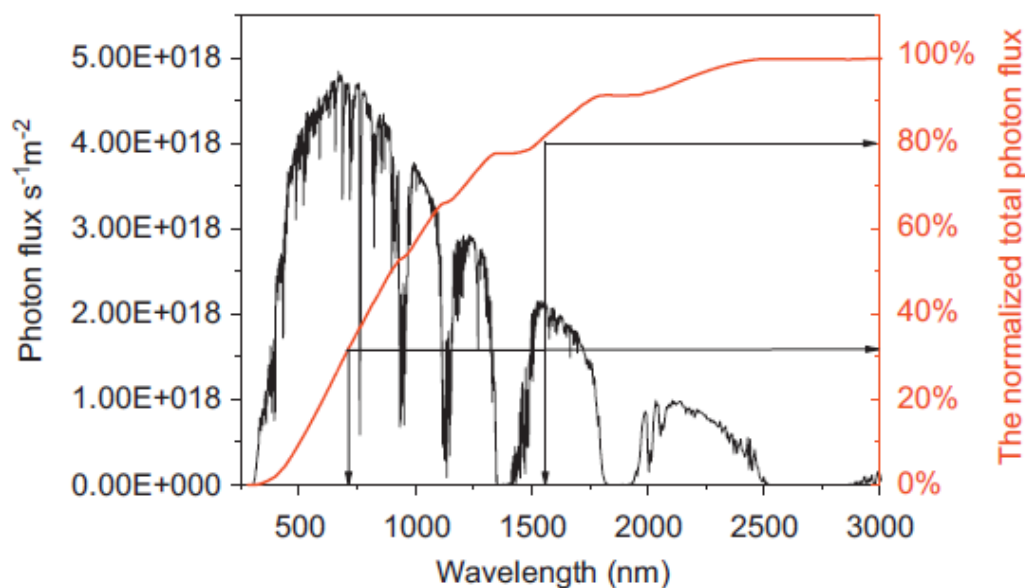


Figura 4.3. Pérdida óptica debida a la desigualdad entre el "band gap" del polímero y el espectro solar

Con el fin de superar el PCE más del 10% a partir de una sola capa de células solares de polímeros, la diferencia energética entre bandas de los polímeros donantes debe ser ~ 1.7 eV y el LUMO de este polímeros donante debe ser ~ -3.9 eV si PCBM se utiliza como aceptor de electrones. La discusión de la alineación de bandas en detalle se resume en la literatura. Los enfoques actuales más novedosos para realizar estos polímeros donantes de baja diferencia energética entre bandas se basan en estructuras de moléculas dador-aceptor. La estrategia para la síntesis de estos polímeros es a menudo la selección de unidades de donantes con alto potencial de ionización y unidades con receptores de alta afinidad electrónica. Los acontecimientos recientes en materiales orgánicos para aplicaciones fotovoltaicas se resumen en la literatura.

Otro enfoque para realizar sistemas de mezcla de polímeros que cubran una amplia región de absorción es tener nuevos receptores de electrones cuya absorción cubriese una amplia región. $PC_{71}BM$ [59] y $PC_{85}BM$ según los informes, tienen una mejor absorción en la región visible, pero tienen peor miscibilidad con los polímeros donantes. Fullerenos derivados endohedral fullerenos, $Lu_3N@C_{80}-PCBM$ se prevé que tengan mayor PCE que las células solares de $P3HT:Lu_3N@C_{80}-PCBM$ porque $Lu_3N@C_{80}-PCBM$ tiene características similares en solubilidad y miscibilidad como $PC_{60}BM$, pero más negativo LUMO que el de $PC_{60}BM$. Un nuevo receptor de electrones (99'BF) que da una tensión en circuito abierto de 1.20 V a partir de células fotovoltaicas de polímero realizadas por mezcla de P3HT con 99'BF está bajo investigación en la Universidad de California en Santa Bárbara.

El aumento de la miscibilidad de la composición del receptor de electrones, disminuyendo la proporción de donante de electrones y receptor de electrones, puede mejorar la densidad óptica. Nano-materiales inorgánicos con gran movilidad y una mejor absorción que el fullereno es otra buena alternativa. Pero el inconveniente era la foto corriente que tiene que transportar a través del surfactante que recubre la superficie de las nano-partículas, resultando en un

limitado transporte de la corriente foto-inducida de la mezcla de polímero con nano-partículas semiconductores inorgánicos. Sin embargo, el surfactante es ciertamente necesario para la dispersión de las nano-partículas en disolventes orgánicos, dando una película fina y uniforme de la solución que contiene el polímero semiconductor y las nano-partículas inorgánicas.

La introducción de un espaciador óptico en los dispositivos es otro método para aumentar el grosor total de la capa activa. El grueso del dispositivo con un separador óptico no es suficiente para atrapar todos los fotones incidentes. Sin embargo, la intensidad de la luz en el interior del dispositivo fue redistribuida espacialmente debido al efecto de interferencia óptica. Una mejor distribución de la intensidad de luz formada por el espaciador óptico dará como resultado un alto rendimiento de células fotovoltaicas de polímero. En la **Tabla 4.2** se resumen los rendimientos de células fotovoltaicas de polímero con un separador óptico.

Tabla 4.2. Rendimientos de células fotovoltaicas de polímero con separador óptico

| Active layer | Optical spacer | | PCE (%) | V _{oc} (V) | J _{sc} (mA/cm ²) | FF (%) |
|----------------|------------------|----------------|---------|---------------------|---------------------------------------|--------|
| Thickness (nm) | Materials | Thickness (nm) | | | | |
| P3HT:PCBM | | | 2.3 | 0.51 | 7.5 | 54 |
| 100 | TiO _x | 30 | 5 | 0.61 | 11.1 | 66 |
| P3HT:PCBM | | | 4.0 | 0.62 | 10.7 | 60 |
| 200 | TiO _x | 35 | 4.1 | 0.62 | 10.8 | 61 |
| P3HT:PCBM | | | ~3.1 | ~0.58 | ~9.0 | ~64 |
| 100 | TiO _x | 20 | 3.9 | 0.58 | 11.52 | 58 |
| P3HT:PCBM | | | 3.95 | 0.65 | 10.61 | 57.1 |
| 100 | CuPc | 8 | 4.13 | 0.64 | 12.54 | 51.1 |

El separador óptico no siempre trae una mejora observable en el PCE. La mejora en el separador óptico es más pequeña de lo que esperábamos. Dado la debilidad del transporte eléctrico y la pobre acumulación transportadora, la contribución de la absorción por el separador óptico se reducirá. Además, una superficie rugosa de la capa activa se reducirá por un separador óptico.

Se señaló que el espesor de la capa activa es limitado debido a la baja movilidad transportadora de los polímeros semiconductores. Como resultado, el coeficiente de absorción óptica de polímeros semiconductores no es lo suficientemente grande y una gran cantidad de flujo de fotones se perdió.

Las mayores pérdidas en células fotovoltaicas de polímero son la transmisión del sub-band-gap y la termalización de los portadores de carga en caliente. La arquitectura de tándem puede eludir por encima los efectos de forma simultánea. El V_{oc} será la suma de las células individuales y el FF será adecuadamente descargado con el aumento de espesor de los dispositivos. Las células superiores con baja diferencia de energía entre bandas y las células del fondo con grandes diferencias de energía entre bandas están en serie en la interfase con una función de recombinación central. El promedio de densidad óptica aumentará a medida que las células en tándem recojan una amplia fracción del espectro de emisión solar. Las células Orgánicas tándem fueron fabricados en primer lugar, por moléculas orgánicas pequeñas. El proceso de evaporación es una manera fácil de fabricar la estructura de múltiples capas con una interfase clara entre las capas, pero la limitación es que será muy caro para el tamaño grande por el enorme costo en la fabricación de sistemas grandes de sedimentación. El uso de

solventes ortogonales es uno de los enfoques para realizar la estructura de múltiples capas por la transformación de una solución, pero es difícil conseguir una interfase fuerte. Krebs con sus colegas han utilizado materiales con propiedades termo-inteligentes para la fabricación de células tándem por el proceso de solución. Después del tratamiento térmico, la película procesada por centrifugado de capas a partir de las soluciones correspondientes se convertirá en insoluble para el disolvente utilizado para las capas que siguen al tratamiento del dispositivo expuesto la estabilidad operativa al aire sin ningún tipo de encapsulación. Gilot y sus colegas informan en primer lugar de que toda la solución procesada ocupa las heterouniones de las células tándem. La capa intermedia se combinó con una iluminación de UV tratados con nanopartículas de ZnO con PEDOT PH neutro. V_{oc} de una célula de triple unión solar llegó a 2,19 V, que corresponde a la suma del COV de las células individuales simples. La mejor solución total a los dispositivos en tándem procesados fue registrada por Kin et al. . La clave para la fabricación de las células tándem es optimizar la capa intermedia. Un tipo de capa intermedia era una interfase de material de tipo p y material de tipo n, tales como ZnO / PEDOT y $SnCl_2Pc/F_{16}CuPc$. Usando $SnCl_2Pc/F_{16}CuPc$ como unidad recombinada se observó más del 60% de aumento en el PCE. Se encontró que el tunelamiento tenía lugar en la interfase $SnCl_2Pc/F_{16}CuPc$, proporcionando un centro de combinación eficaz para electrones y huecos. Las uniones túnel por dopaje habían sido ampliamente aplicado en las células tándem inorgánicas debido a su baja resistencia. Au, Ag, de múltiples capas como LiF / Al / Au / PEDOT: PSS, ITO / PEDOT: PSS, Al/MoO₃ y TiOx / PEDOT: PSS se utilizaron como intercapas para la realización de células solares tándem. Los mecanismos de funcionamiento de estas diferentes capas intermedias todavía no se han entendido totalmente.

Con el fin de lograr un PCE del 15%, el mejor enfoque es probablemente a través de la optimización de las células solares en tándem. Además para hacer intercapas funcionales, el encuentro de los donantes y receptores de electrones con los espectros de absorción complementarios, diferencias energéticas entre bandas y EQE se deberían tener en cuenta. Excelentes revisiones se llevaron a cabo en los dispositivos físicos y el desarrollo de la situación de las células solares orgánicas tándem. Tvingstedt con los colegas tienen presente una interesante arquitectura de dispositivo. Dos células espectralmente diferentes una frente a la otra en un ángulo determinado. La luz incidente es atrapada y el espectro de absorción de todas las células es ampliado. El PCE se ve reforzado por un factor de $1,8 \pm 0,3$.

4.3.2. Mejorar la tensión en circuito abierto

El valor de V_{oc} está limitado principalmente por la sustracción del LUMO del aceptor de electrones y el HOMO del donante de electrones como se describe anteriormente. Al mismo tiempo también es influenciada por los contactos entre la capa activa con los electrodos y la morfología de la capa activa. En la **tabla 4.3 a y b** se resume el rendimiento de células fotovoltaicas de polímero con capas de amortiguación.

Tabla 4.3.a. Rendimiento de células fotovoltaicas de polímero con capas de amortiguación.

| Active layer | Buffer layer | | J _{sc} (mA/cm ²) | V _{oc} (V) | FF (%) | PCE (%) |
|---|---------------------------------|--------|---------------------------------------|---------------------|--------|---------|
| | layer | d (nm) | | | | |
| m-MTD ATA /Nd(DBM) ₃ bath/LiF | LiF | 0 | 0.081 | 1.69 | 31 | 1.1 |
| | LiF | 0.6 | 0.145 | 1.96 | 32 | 2.2 |
| MDMO-PPV/PCBM/LiF | LiF | 0 | | 0.759 | 53 | |
| | LiF | 1.2 | | 0.832 | 61.1 | |
| MDMO-PPV/PCBM/SiO _x | SiO _x | 0 | | 0.759 | 53 | |
| | SiO _x | 1.2 | | 0.796 | lower | |
| MDMO-PPV/PCBM/LiF | LiF | 0 | | 0.62 | 51 | |
| | LiF | ~ | | 0.763 | 54 | |
| PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/LiF | LiF | 0 | 8.38 | 0.49 | 52 | |
| | LiF | ~ | 8.07 | 0.57 | 63 | |
| PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/CaO | CaO | 0 | 8.38 | 0.49 | 52 | |
| | CaO | ~ | 8.53 | 0.57 | 59 | 2.85 |
| PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/TiO _x | TiO _x | 0 | 10.7 | 0.62 | 60 | 4.0 |
| | TiO _x | 35 | 10.8 | 0.62 | 61 | 4.1 |
| PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Cs ₂ CO ₃ | Cs ₂ CO ₃ | 0 | | | | 2.3 |
| | Cs ₂ CO ₃ | ~ | | | | 3.1 |
| PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Pentacene | Pentacene | 0 | 7.61 | 0.61 | 43.19 | 2 |
| | Pentacene | 1 | 9.56 | 0.63 | 51.3 | 3.09 |
| PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/TiO _x | TiO _x | 0 | 7.5 | 0.51 | 54 | 2.3 |
| | TiO _x | 30 | 11.1 | 0.61 | 66 | 5 |
| PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/F-PCBM | TiO _x | 5 | | 0.6 | 70 | 4.05 |
| | F-PCBM | 0 | 8.72 | 0.55 | 64 | 3.09 |
| | F-PCBM | 2 | 9.51 | 0.57 | 70 | 3.70 |

Tabla 4.3.b. Rendimiento de células fotovoltaicas de polímero con capas de amortiguación.

| Active layer | Buffer layer | | J _{sc} (mA/cm ²) | V _{oc} (V) | FF (%) | PCE (%) |
|--|-------------------------------|--------|---------------------------------------|---------------------|--------|---------|
| | layer | d (nm) | | | | |
| PEDOT: DSS/a-PANINs/P3HT:PCBM | PANIN | 0 | 8.83 | 0.64 | 55 | 3.39 |
| | PANIN | ~ | 10.96 | 0.64 | 60 | 4.26 |
| TFB:TPDSi ₂ /MDMO:PPV:PCBM | TFB:TPDSi ₂ | 0 | 4.56 | 0.74 | 43.4 | 1.46 |
| | TFB:TPDSi ₂ | 10 | 4.62 | 0.89 | 54.4 | 2.29 |
| Gold nanoparticle (GNPs)/P3HT:PCBM | GNPs | 0 | 5.29 | 0.58 | 57 | 2.07 |
| | GNPs | ~ | 6.15 | 0.54 | 57 | 2.21 |
| V ₂ O ₅ /P3HT:PCBM | V ₂ O ₅ | 0 | 8.95 | 0.59 | 59.6 | 3.18 |
| | V ₂ O ₅ | 3 | 8.83 | 0.59 | 59.1 | 3.10 |
| MoO ₃ /P3HT:PCBM/Al | MoO ₃ | 0 | 8.95 | 0.59 | 59.6 | 3.18 |
| | MoO ₃ | 5 | 8.94 | 0.60 | 61.9 | 3.33 |
| PEDOT: PSS/CuPc/P3HT:PCBM | CuPc | 0 | 10.61 | 0.65 | 57.1 | 3.95 |
| | CuPc | 8 | 12.54 | 0.64 | 51.1 | 4.13 |
| AgO _x /PEDOT: PSS/P3HT:PCBM | AgO _x | 0 | 10.8 | 0.61 | 66 | 4.4 |
| | AgO _x | ~ | 12.7 | 0.60 | 63 | 4.8 |
| PEDOT: PSS/SWNT/P3HT:PCBM | SWNT | 0 | 21.6 | 0.51 | 47 | 4 |
| | SWNT | ~ | 21.0 | 0.59 | 51 | 4.9 |
| SWNT/PEDOT: PSS/P3HT:PCBM | SWNT | 0 | 21.6 | 0.51 | 47 | 4 |
| | SWNT | ~ | 24.1 | 0.59 | 44 | 4.9 |

PEDOT: PSS fue una de las capas de relleno más utilizados. PEDOT: PSS fue estudiado conversionalmente en diodos de polímeros emisores de luz (PLED). Para las células solares de polímeros, la investigación se centró en la mejora de la conductividad eléctrica del PEDOT: PSS. Se encontró que la conductividad, la morfología y la productividad de los PEDOT: PSS fueron influenciados por el tratamiento de deposición posterior. El tratamiento de alta temperatura de PEDOT: PSS puede cambiar la estructura paracristalina que era consistente con las laminillas moleculares de PEDOT y PSS. La eficacia de la inyección para los contactos macroscópicos de las superficies de PEDOT: PSS se puede mejorar mediante el control de la orientación laminar en la interfase polímero-metal. Dopaje PEDOT: PSS con diferentes componentes, tales como el sorbitol, glicerol, manitol puede controlar la conductividad y el rendimiento de PEDOT: PSS. También se constató que la conformación de las cadenas de PEDOT en la película cambió cuando el etilenglicol, el meso-eritritol y 2-nitroetanol fueron dopados en PEDOT: PSS. Como

resultado, la conductividad de PEDOT: PSS fue mayor. Mediante dopaje de glicerol en PEDOT: PSS, se observó que aumenta hasta cien veces la conductividad y disminuye el rendimiento, en comparación con las películas sin dopar.

LiF fue otro de los rellenos de capas más utilizados. Sin embargo, el mecanismo operativo de LiF todavía estaba en debate. La formación de una unión túnel para aumentar el potencial intrínseco, una capa de dipolo entre las caras (unos pocos nanómetros) para cambiar los rendimientos del electrodo y del LiF disociado (sub-nanómetro) dopado en semiconductores orgánicos fueron propuestos como mecanismos de funcionamiento.

Usando una capa intermedia de pentaceno delgada (~ 10 nm) en el dispositivo de P3HT: PCBM, Kim et al. encontraron que el V_{oc} se incrementó a 0.73V. El mejor rendimiento se observó desde el dispositivo con una capa intermedia de 1 nm de espesor en lugar de 10 nm, pero 0,73 V es una gran tensión en circuito abierto observada desde las células solares de P3HT: PCBM.

En conclusión, una capa tampón de unos pocos nanómetros de espesor no sólo amplía el V_{oc} , sino que también actúa como una capa de madera para evitar la reacción entre los electrodos con la capa activa. Sin embargo, la funcionalidad de las capas tampón varía con diferentes materiales.

4.3.3. Hacia una morfología controlable

Como se describe en lo anterior, la eficiencia en el transporte de carga η_{tr} se ve muy afectada por la morfología de la capa fotoactiva. La morfología adecuada no sólo proporciona una interfase suficiente con gran fuerza independiente para la disociación del excitón, sino que también la continuidad y una correcta interpenetración de las redes para un transporte efectivo de los electrones y los agujeros. La condición previa para conseguir la morfología optimizada es la buena miscibilidad de los dos materiales, que es el carácter inherente de la materia y también depende del solvente.

La morfología de polímeros fullereno ha sido investigada durante mucho tiempo. Muchos artículos de revisión han hecho una presentación clara de la formación de la morfología y la evolución. Janssen et al. ha señalado que tanto la naturaleza cristalina mejorada de las películas como la incrementada pero controlada desmezcla entre los dos componentes después del recocido es la razón del aumento del PCE observado en los dispositivos P3HT: PCBM.

Un método ampliamente utilizado para controlar la morfología es añadir aditivos de procesamiento. Lee et al. sugiere que hay dos criterios para los aditivos de procesamiento: (i) la solubilidad selectiva de los componentes fullereno y (ii) el punto de ebullición más alto que el de acogida del disolvente. Utilizando estos criterios, se puede obtener una mejor red de interpenetración. **Fig. 4.4** muestra una representación esquemática de la función del aditivo de proceso en el auto-ensamblaje de la hetero-unión de la mezcla de materiales a granel. En su artículo, se argumentó que tres fases distintas se forman durante el proceso de separación de fases líquido-líquido y secado: una fase de fullereno-alkanedithiol, una fase de polímero agregado y una fase de polímeros fullereno. El aditivo con el punto de ebullición más alto que el de acogida que el clorobenceno disolvente seguirá siendo el PCBM en la solución ya que el polímero semiconductor. Por lo tanto permiten el control de la separación de fases.

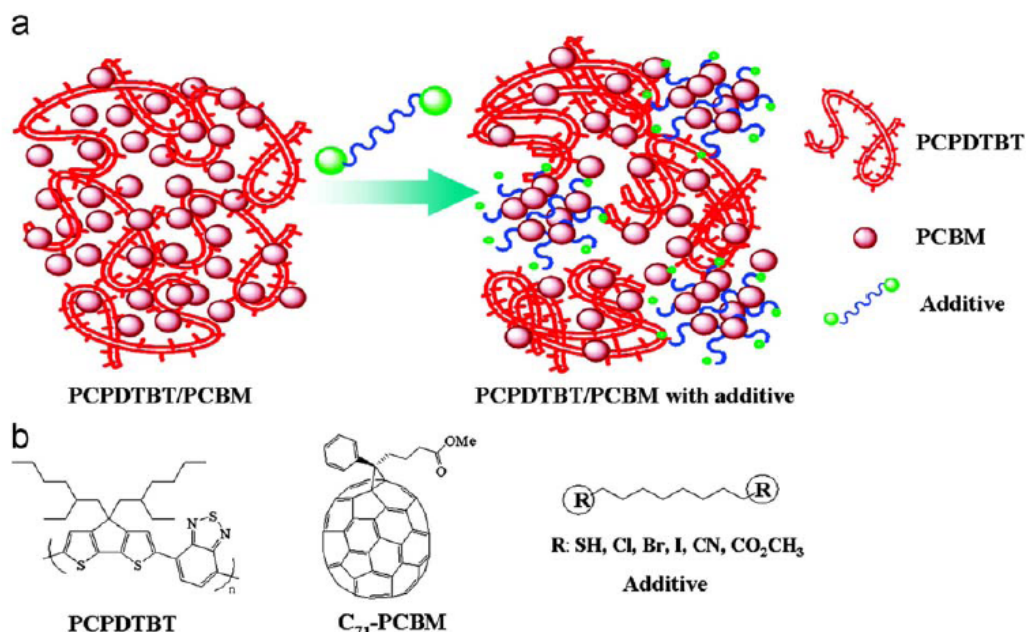


Figura 4.4. Representación esquemática de la función del aditivo de proceso en el auto-ensamblaje de la hetero-unión de la mezcla de materiales a granel

En el sistema P3HT: PCBM, un modelo propuesto para la segregación de los procesos de revestimiento para el que Yang con sus colegas han sugerido: en primer lugar, los compuestos que tienen una menor presión de vapor que la del principal disolvente a temperatura ambiente, que corresponde a un alto punto de ebullición, en segundo lugar, el compuesto debe tener menor solubilidad de PCBM que el disolvente, en tercer lugar, el compuesto debe ser miscible con el disolvente. Todos estos puntos fueron controvertidos con los hallazgos de Lee.

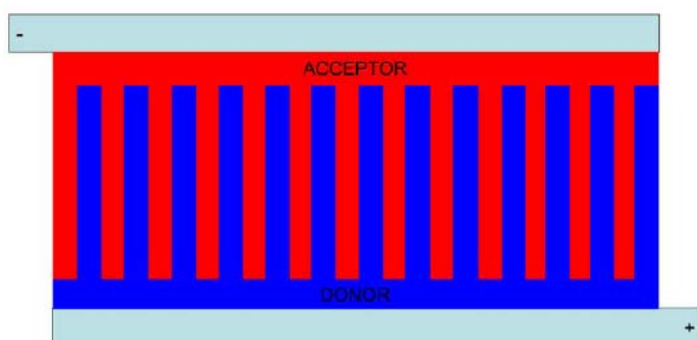
4.3.4. Nuevas estructuras de dispositivos

Se ha demostrado que la capa ácida de PEDOT: PSS era perjudicial para la capa de polímero activo, y el bajo rendimiento del cátodo de metal era fácilmente oxidado en el aire, incluso con una delicada encapsulación. Las células solares de polímeros con una estructura invertida se descubrieron para superar la escasez. **Tabla 4.4** se resume el rendimiento de células fotovoltaicas de polímero con una estructura invertida. Mediante el uso de capas interfásicas de carbonato de cesio, encima de ITO, Liao y sus colegas han logrado un 4,2% de PCE a partir de células solares de P3HT: PCBM. Sin embargo, el PCE de la mayoría de las células solares de P3HT: PCBM con una estructura invertida, como se muestra en la **Tabla 4.4** era del ~ 50% de los valores (~ 5% de PCE) de las células solares de P3HT: PCBM con una estructura normal.

Tabla 4.4. Rendimiento de células fotovoltaicas de polímero con una estructura invertida

| Structure | PCE (%) | J_{sc} (mA/cm ²) | V_{oc} (V) | FF (%) |
|--|---------|--------------------------------|--------------|--------|
| ITO/nano-TiO ₂ /P3HT:PCBM/V ₂ O ₅ /Al | 2.71 | 0.59 | 10.96 | 42 |
| ITO/Cs ₂ CO ₃ /P3HT:PCBM/V ₂ O ₅ /Al | 2.25 | 0.56 | 8.42 | 62.1 |
| | 4.2 | 0.59 | 11.22 | 47.5 |
| ITO/TiO _x /P3HT:PCBM/PEDOT:PSS/Al | 3–3.5 | 0.57–0.56 | 10–8.6 | 63–63 |
| ITO/ZnO/P3HT:PCBM/Ag | 2.97 | 0.556 | 11.22 | 47.5 |
| ITO/TiO _x /P3HT:PCBM/PEDOT:PSS/Au | 3.1 | 0.56 | 9.0 | 62 |
| ITO/TiO _x /SAM/P3HT:PCBM/PEDOT:PSS/Al | 3.8 | 0.62 | 10.6 | 57.2 |
| ITO/nc-TiO ₂ /P3HT:PCBM/MoO ₃ /Ag | 2.57 | 0.628 | 6.57 | 62.3 |
| ITO/nano-ZnO/P3HT:PCBM/VO _x /Ags | 3.9 | 0.58 V | 10.4 | 65 |
| ITO/nano-ZnO/P3HT:PCBM/Ag | 2.7 | 0.57 | 9.6 | 50 |
| ITO/ZnO-NP/P3HT:PCBM/PEDOT:PSS/Ag | 3.61 | 0.623 | 10.69 | 54.2 |

Con el fin de optimizar el rendimiento de células fotovoltaicas de polímero, se propuso una estructura del dispositivo ideal basada en una hetero-unión masiva de células solares de polímeros. La estructura de micro escala ideal de células solares de polímeros se muestra en la **Figura. 4.5**. En esta estructura, las nanoestructuradas fases tipo n y tipo p con un espacio cercano a la longitud de difusión excitón (5–20 nm) facilitaría una separación eficaz de las cargas. La circulación interdigitalizada y filtrada puede asegurar el libre transporte de portadores de carga a los electrodos. Sin embargo, tales nanoestructuras bien organizadas no son fáciles de obtener en la mezcla del polímero clásica, debido a la naturaleza desordenada de los polímeros. Günes ha resumido las estrategias utilizadas en la actualidad para la realización de esta estructura.

**Figura 4.5.** Estructura de micro escala ideal de células solares de polímeros

Takanezawa et al. expuso una estructura de la célula invertida por la introducción de una capa de ZnO nanovarillas entre el electrodo de ITO y la capa activa. La estructura esquemática del dispositivo y la imagen de la sección cortada de las nanovarillas de ZnO se muestran en la **Figura. 4.6** Se encontró que FF aumentó notablemente desde el 50% a 65%, junto con un pequeño cambio en la J_{sc} y V_{oc} . Las nanovarillas de ZnO funcionan como recolectores de electrones por el acortamiento de la distancia media de difusión electrónica en la red PCBM en la gran cantidad de hetero-uniones. Las nanovarillas de ZnO también funcionan como rutas de acceso directo para el transporte de carga al electrodo ITO, dando lugar a una recombinación de carga disminuida. Por lo tanto, se observó un FF más grande.

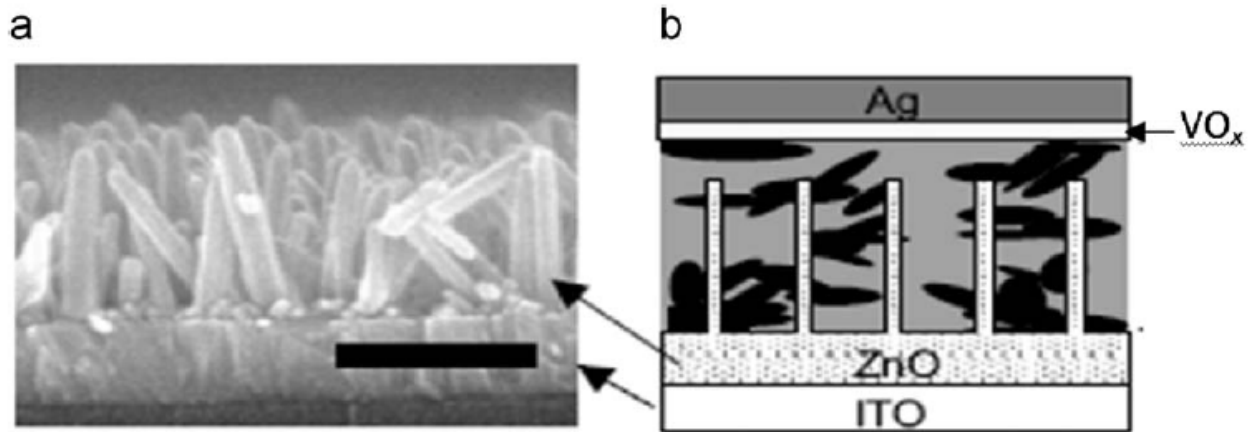


Fig.4.6. Estructura esquemática del dispositivo y la imagen de la sección cortada de las nanovarillas de ZnO

La sustitución de magnesio en un receptor de óxido de zinc ($\text{Zn}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}$) da como resultado un método sencillo para ajustar sistemáticamente la banda de desplazamiento en un óxido de metal-polímero *p*-conjugados sistema híbrido donante-aceptor con el fin de maximizar el V_{oc} . Olson y sus colegas han encontrado que la V_{oc} se incrementó de 500 mV en $x = 0$ hasta valores superiores a 900 mV en $x = 0.35$. Su trabajo proporciona una herramienta para entender el papel del desplazamiento de banda de los donantes-receptores en híbridos fotovoltaicos.

El rendimiento de estas matrices de nanovarillas (o llamadas estructuras porosas) está limitado por la pobre infiltración de polímero en los poros de óxido de metal con dimensiones nanoestructuradas controlables. El proceso del polímero tiene una influencia significativa en la condición de infiltración. Usando diclorobenceno en lugar de cloroformo se conseguirá una mayor infiltración que aumenta el tamaño del poro y el orden vertical permitiendo al polímero tener un espacio integrado ampliado, mejorando el factor de relleno. La morfología de las nanoestructuras de ZnO en el nanocompuesto tiene un impacto directo sobre el rendimiento del dispositivo. Se registró un aumento de voltaje en circuito abierto, sacrificando la corriente de cortocircuito a partir de ZnO tratados con agentes tensoactivos. Sin embargo, hubo un pequeño aumento en la eficiencia global del dispositivo.

4.3.5. La estabilidad de las células solares de polímeros

Mientras que el PCE de la PVC (células fotovoltaicas convencionales) se mejora paso a paso, la solicitud de comercialización de células fotovoltaicas orgánicas (OPVs) ha obligado a los científicos a hacer frente a la estabilidad de la OPVs. Igual que otros dispositivos orgánicos, los OPVs sin encapsulación tienen vidas muy cortas, que van desde unos pocos minutos hasta varios días.

El mecanismo de la degradación de la OPV a través de diferentes vías fue investigado por Jørgensen et al. . **Fig. 4.7** muestra los procesos de degradación. Los materiales orgánicos y metálicos utilizados como los electrodos reaccionan con el oxígeno y el agua que se difunden desde los dos electrodos o laterales del dispositivo, se cree que es la razón principal que causa la corta vida de los OPVs.

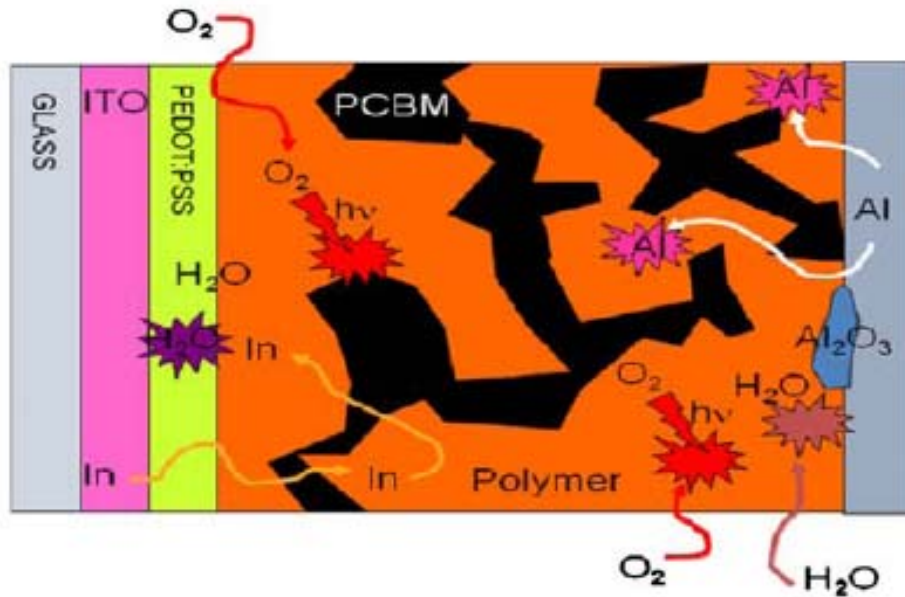


Figura 4.7. Proceso de degradación de una célula fotovoltaica orgánica

Usando el método de análisis de superficies (TOF-SIMS) durante el cual la superficie es bombardeada con una radiación pulsada de iones, Krebs con sus colegas han demostrado que el oxígeno se difunde en el electrodo de Aluminio a través de los granos de Al y agujeros microscópicos en la película de Al. Una vez dentro del dispositivo, el oxígeno continúa difundiéndose en el plano lateral y vertical hasta alcanzar el contra electrodo. Otra vía de degradación importante resultó ser la difusión de los materiales del electrodo en los dispositivos. La degradación se debe también al cambio de la interfase de los dispositivos. Krebs y Norrman observó que el Indio se difundió en la capa en un OPV con una estructura de Al/C₆₀/P3CT/ITO, donde P3CT es el poli (3-carboxitio-feno-co-tiofeno). Kawano et al. también encontró que la resistencia de la ITO fue mayor debido a que la capa higroscópica PEDOT: PSS absorbe la humedad de la atmósfera ambiente.

Materiales termo-inteligentes se utilizan para fabricar células solares estables al aire. La capa activa está formada por materiales con cadenas laterales termo-inteligentes, el tratamiento térmico convierte estos materiales solubles en películas sólidas insolubles. Se creía que la película formada por estos materiales termo-inteligentes es más estable que otros polímeros comunes. Krebs et al. han constatado una gran cantidad de hetero-uniones en las células solares de polímero fabricadas con materiales termo-inteligentes. Al principio, poli-(3 - (2-metilhex-2-il)-oxi-carbonilditiofeno) (P3MHOCT) se mezcló con PCBM y después con capas centrifugadas recubriendo la parte superior de PEDOT: PSS que fue cubierto en la superficie de los sustratos de vidrio de ITO. La capa de película delgada fue a continuación, recocida a altas temperaturas hasta 250 ° C durante 10 segundos. Una gran superficie del dispositivo genera un PCE de 1.5% con un largo tiempo de operación estable, 500 h. También se estudió la estabilidad de los dispositivos cambiando diferentes grupos frente a las diferentes temperaturas eliminadas.

Hauch con sus colegas han investigado el rendimiento de un módulo flexible de P3HT: PCBM basado en la atmósfera al aire libre. Sorprendentemente, el rendimiento total de los módulos

no ha disminuido, pero aumentó un 3,3%. Este aumento se debió a un aumento relativo de FF en un 10,8%, con una caída de V_{oc} en un 6,8%. No hay ningún cambio aparente en J_{sc} .

También se constató que el dispositivo con una estructura con gran cantidad de hertero-uniones es más estable que el dispositivo con la estructura de doble capa. Esto es probablemente debido a la rápida transferencia de electrones que desemboca en un estado excitado altamente reactivo del polímero.

4.3.6. Dispositivo libre de ITO

ITO es el candidato más popular usado para el ánodo para recoger los agujeros generados. Sin embargo, se están desarrollando muchos nuevos materiales para reemplazar el ITO sustrato debido al alto costo de la ITO. Los materiales tienen como objetivo ser usados para futuros electrodos, los cuales deberían tener alta conductividad, alta transparencia y una buena estabilidad mecánica sobre sustratos flexibles. Uno de los materiales orgánicos destacado es PEDOT: PSS. Los investigadores han hecho muchas modificaciones para mejorar su conductividad. La conductividad hasta $1E + 3 \text{ S/cm}$ ha sido constatada. Una nueva fórmula de PEDOT: PSS también se ha investigado y desarrollado.

La rejilla de metal es otro material candidato utilizado para electrodos transparentes. Se han registrado que las rejillas de Ag como un electrodo transparente para PLED tienen un rendimiento comparable al de la ITO. Nanotubos de pared simple de carbono (SWCNTs) fue otro de los candidatos. Las redes de malla de SWCNTs depositados al azar desde la solución se utilizaron recientemente como los electrodos transparentes para los dispositivos electrónicos orgánicos, pero tiene una resistencia de lámina relativamente alta. Mezcla con otros materiales para mejorar la conductividad de SWCNTs es uno de los enfoques. Por ejemplo, mallas SWCNT se mezclaron con rejillas metálicas para presentar la absorción óptica de SWCNT y la alta conductividad de las rejillas metálicas. Alta conductividad PEDOT: PSS mezclado con una película de rejilla metálica de Ag es un candidato interesante alternativa utilizada para células solares orgánicas.

*Peumans con sus colegas reportaron que electrodos de malla de nanocables de Ag mostraron semi-transparencia y baja resistencia laminar. Las mallas de nanocables son compatibles con sustratos flexibles. Las células solares orgánicas con mallas de nanocables como el electrodo mostraron una fotocorriente 19% más alta. **Fig. 4.8** resume la conductividad de la mezcla de CNT con aditivos adicionales.*

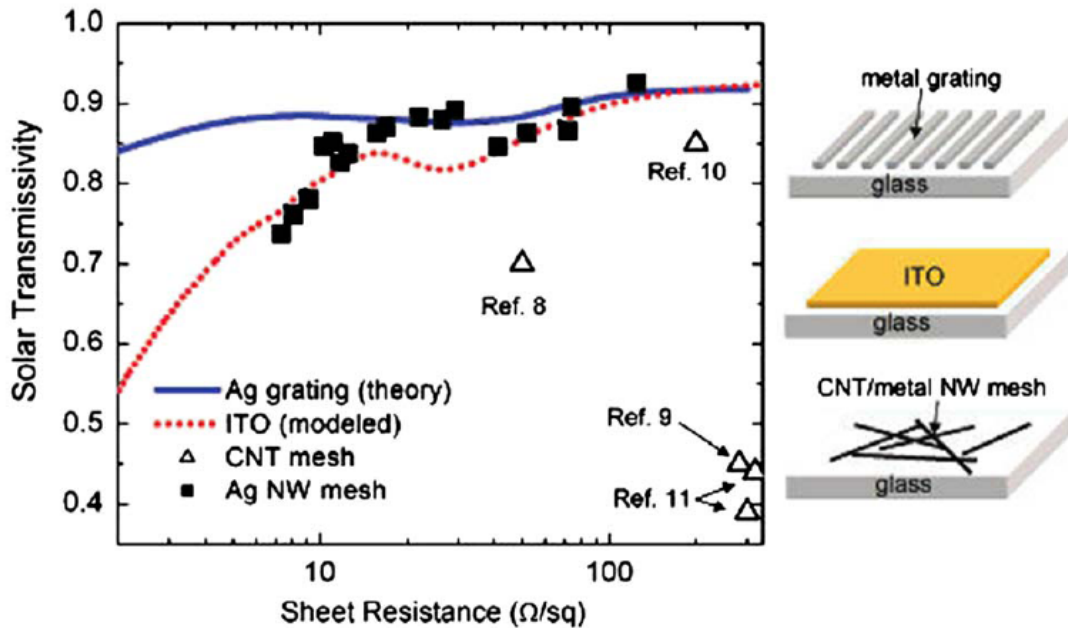


Figura.4.8. Resume la conductividad de la mezcla de nano tubos de carbono con aditivos adicionales

Se ha logrado el uso de inversión de la secuencia de capas para evitar el uso de ITO, sin pérdida de rendimiento del dispositivo. Alternativamente se discutió sobre las células fotovoltaicas de polímero basadas en plataformas biodegradables y se encontraron soluciones potenciales para resolver los problemas relacionados con su eliminación en el medio ambiente de un modo que las tecnologías convencionales, tales como baterías nunca lo han logrado.

4.3.7. Procesos de fabricación

Las células solares de polímeros podrían en principio, ofrecer la producción de grandes volúmenes a un costo de proceso bajo. La investigación sobre el tema se ha centrado principalmente en mejorar la eficiencia de conversión de energía para pequeñas células de laboratorio mediante la optimización de los materiales y el protocolo utilizado para la preparación. Es igualmente importante tratar la producción a gran escala para afirmar los posibles beneficios que la tecnología puede tener para ofrecerlos en términos de facilidad de procesamiento y costo. Krebs con sus colegas describieron la posibilidad del proceso de fabricación de células solares orgánicas. Otros científicos e ingenieros también abordaron este tema.

Fig. 4.9 muestra un diagrama de flujo de procesos típicos que detalla todas las medidas, junto con el tiempo de proceso a partir de 200 m de PEDOT / ITO sustrato que dio un rendimiento final de 2.124 módulos realizados. El proceso crítico fue imprimir PEDOT: PSS en la parte superior de la capa de polímero.

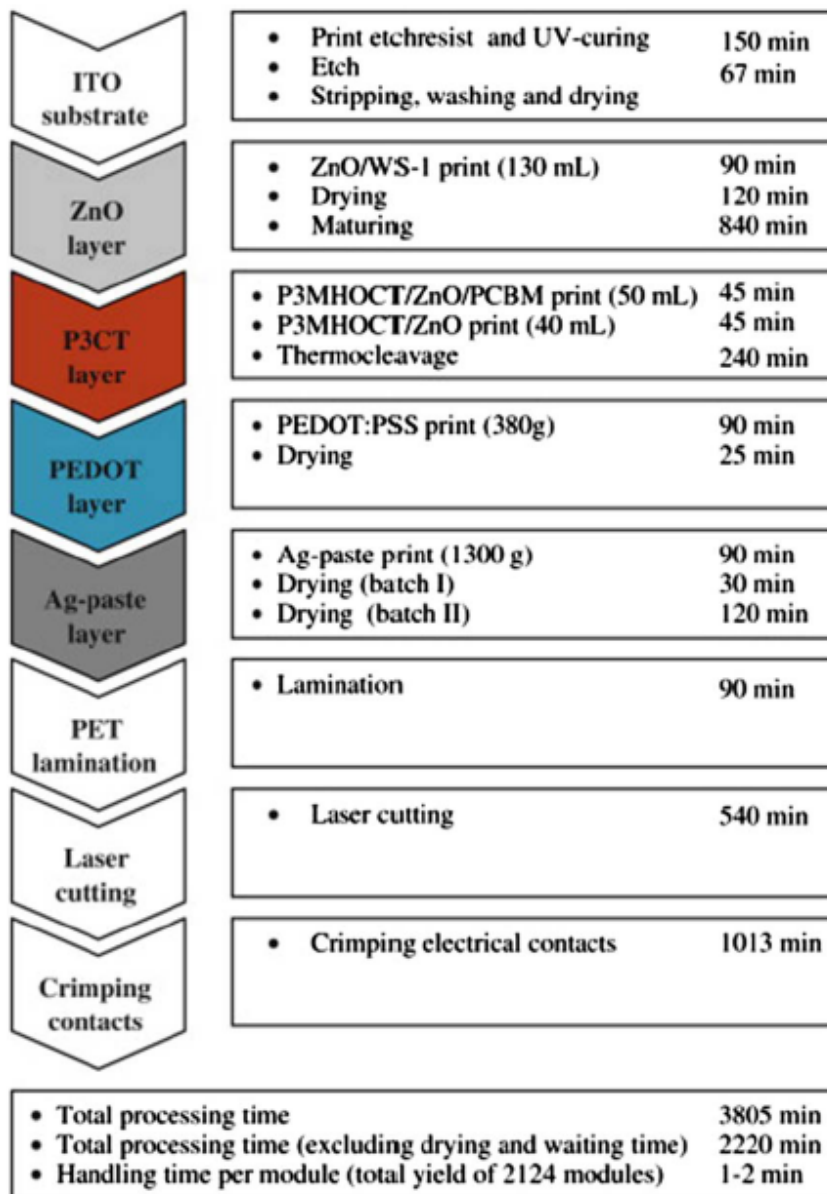


Figura 4.9. Diagrama de flujo de procesos típicos que detalla todas las medidas, junto con el tiempo de proceso a partir de 200 m de PEDOT / ITO sustrato que dio un rendimiento final de 2.124 módulos realizados

Se informó de que varios métodos habían sido probados para la fabricación de grandes módulos de OPV y con una vida útil de 5000 horas. Con la síntesis de materiales optimizados, la formulación fotoactiva de la capa de tinta y el diseño y la fabricación del módulo, se prevé que será demostrada una larga vida útil con una alta eficiencia de conversión de energía solar, en células OPV. Sin embargo, las células solares OPV no son producidas comercialmente en la actualidad. Una excepción es la empresa Konarka tecnologías que en 2008 abrió una fábrica con capacidad para producir el equivalente a un gigavatio de células solares de polímeros fullereno cada año. Las células iniciales de la fábrica son de 3-5% de eficiencia, y sólo duran un par de años, pero la compañía ha declarado que con el tiempo sería capaz de mejorar tanto la eficiencia y durabilidad. La compañía espera vender inicialmente las células en un número de aplicaciones ecológicas: Por ejemplo, en maletines con posibilidad para recargar la

computadora portátil, en tiendas de campaña, sombrillas, toldos y como ventana tintada (ya que las células se pueden hacer transparente).

4.4. Conclusión y Perspectivas

Las células solares de polímero con gran cantidad de hetero-uniones donante-receptor están mostrando una eficiencia energética de conversión de más del 6%. El recocido térmico, el secado lento, el procesamiento de aditivos, la morfología de autoensamblaje controlable, la adición de la capa de amortiguación y la nueva estructura del dispositivo pueden desempeñar un papel importante en el logro de una alta eficiencia energética de conversión. Con el fin de obtener más del 10% de eficiencia energética de conversión a partir de células solares de polímeros de capa simple, aún debe llevarse a cabo más investigación para explorar los mecanismos fundamentales y desarrollar nuevos materiales. El desarrollo de nuevos materiales es un tema urgente. Muchos científicos creen que hay una mejor manera de conseguir una mayor absorción y una mayor tensión en circuito abierto, y una condición de transferencia de carga mejor. Hacia una red interpenetrante y controlable en las películas es también importante para la optimización del funcionamiento de la célula solar. Además, el diseño de nuevas estructuras para obtener una mayor absorción y el orden local de materiales controlables son los posibles enfoques para lograr la eficacia alta y alta estabilidad de las células solares de polímeros.

Capítulo 5. Resumen y conclusiones

A lo largo de este proyecto se ha visto la gran importancia que el sol tiene para la vida en la Tierra, ya que dirige los ciclos biofísicos, geofísicos y químicos que la sustentan, como los ciclos del oxígeno, del agua, del carbono y del clima.

Este último, según parece, en los años recientes está sufriendo un importante cambio, el "cambio climático", que como los científicos avisan puede tener consecuencias dramáticas. De ahí, la necesidad de evitar que continúe, para ello el ser humano ha aprendido diferentes formas de aprovechar la energía del sol, origen de la mayoría de fuentes de energía renovables, como puede ser la energía eólica, la hidroeléctrica, la biomasa, y la de las olas y las corrientes marinas, como también de la energía solar propiamente dicha.

Esta última es en la que se ha centrado este proyecto. Se ha visto que se puede aprovechar directamente o pasivamente, para enfriar o para calentar, a pequeña escala o a gran escala, en fin, de muy diversas maneras.

Se puede diferenciar entre la Energía solar térmica y la Energía solar fotovoltaica. Se han expuesto una gran cantidad de usos y aplicaciones de ambas, tanto a nivel industrial como doméstico.

La Energía solar térmica tiene la característica de poder aprovechar la energía solar de forma pasiva, mediante el diseño arquitectónico para el calentamiento edificios, lo que se denomina "viviendas bioclimáticas", o de forma activa captando la energía de la radiación solar mediante un captador o colector y así calentar un fluido caloportador, el cual transferirá esa energía a un sistema para su aprovechamiento posterior para el calentamiento de agua o el calentamiento de viviendas. Pero si lo que se quiere conseguir es la producción de electricidad, hay que recurrir a las grandes plantas de concentración solar, que actualmente están en experimentación por todo el mundo, en las que se concentra la radiación solar con el fin de calentar un fluido hasta convertirlo en vapor que permita operar un ciclo termodinámico convencional como por ejemplo una turbina de vapor o de gas o un motor Stirling, en donde esa energía térmica se convertirá en energía mecánica y posteriormente en energía eléctrica. Cabe destacar que en las tecnologías de concentración sólo se puede aprovechar la componente directa de la energía solar y además es necesario un sistema de seguimiento.

De momento, las tres tecnologías de concentradores más prometedoras son el concentrador cilíndrico parabólico, el receptor central o de torre y el disco parabólico. Estas se pueden complementar con sistemas de almacenamiento térmico o con sistemas de combustión auxiliares, para garantizar la producción de electricidad durante la noche o en los periodos con muy poca radiación solar directa.

La Energía solar fotovoltaica tiene una mayor aplicación, geográficamente hablando, puesto que tiene la característica principal de poder aprovechar tanto la radiación solar directa como la radiación solar dispersa, pudiendo ser utilizada en zonas con menor irradiación solar como pueden ser Europa Central o el norte de Europa.

El principio básico de funcionamiento de la Energía solar fotovoltaica, es el efecto fotoeléctrico, descubierto por Heinrich Hertz en 1887. El efecto fotoeléctrico consiste en la emisión de electrones por un material cuando se le ilumina con radiación electromagnética (luz visible o ultravioleta en general).

El dispositivo o elemento que media en el proceso es la célula solar o célula fotovoltaica. También llamada célula fotoeléctrica, célula, fotocélula, celda fotovoltaica o celda solar.

En la actualidad el material fotosensible más utilizado en la producción de celdas solares es el silicio, al cual se le introducen átomos de 3 y 5 electrones (dopaje) para crear respectivamente un semiconductor extrínseco tipo P y un conductor extrínseco tipo N.

Al unir estos dos semiconductores se forma la unión PN, a lo que se le llama célula solar. La parte iluminada será la tipo N y la no iluminada será la tipo P.

De esta forma, cuando sobre la célula solar incide la radiación, aparece en ella una tensión análoga a la que se produce entre las bornes de una pila. Mediante la colocación de contactos metálicos en cada una de las caras puede "extraerse" la energía eléctrica.

Como el voltaje obtenido en una célula es muy pequeño del orden de 0,5 V, estas generalmente se conectan en serie para proporcionar voltajes más grandes, lo que recibe el nombre de panel fotovoltaico. Si para una aplicación se requiere más energía de la que puede proporcionar un panel fotovoltaico, se combinan varios paneles formando los módulos o conjuntos.

Hay varios tipos de células basadas en silicio, como las de silicio amorfo empleadas en calculadoras y relojes hasta las células multiunión empleadas en aplicaciones espaciales, pasando por las células Tándem, las de silicio monocristalino y las de silicio multicristalino.

Los dispositivos formados por la unión de células de silicio se están acercando al límite de eficacia teórica que es del 31% y tienen un periodo de amortización de 5-7 años.

No obstante, la continua investigación en las células fotovoltaicas, no cesa con el fin de conseguir células más fáciles y baratas de producir y con mejores cualidades físicas como pueden ser la flexibilidad o la resistencia, para lograr reducir los costes de la producción eléctrica.

Como fruto de esta incansable investigación, ya se habla de una cuarta generación de células solares que consistiría en una tecnología fotovoltaica compuesta en la que se mezclan, conjuntamente, nanopartículas con polímeros para fabricar una capa simple multiespectral. Estas células más eficientes y baratas, serían capaces de aprovechar parte de la energía correspondiente al espectro infrarrojo.

Una segunda parte de este proyecto se ha centrado en las investigaciones recientes en células solares de película delgada o "thin-film", en concreto en las basadas en silicio amorfo, en telururo de cadmio y las de Cobre Indio Galio Diseleniuro (CIGS).

Se ha expuesto de forma detallada los procedimientos experimentales llevados a cabo en varios proyectos de investigación realizados por distintos equipos de científicos, así como los resultados y discusiones obtenidas en estas investigaciones.

En cuanto a las células de película delgada basadas en silicio amorfo, las expectativas están puestas en la técnica HW-CVD (depósito químico en fase vapor asistido por filamento caliente) que parece una buena alternativa para la deposición de silicio amorfo hidrogenado (α -Si:H) que hasta ahora a nivel industrial se llevaba a cabo por la técnica P-CVD (depósito químico en fase vapor mejorado por plasma). Según se ha observado, las películas depositadas mediante P-CVD muestran bajos índices de crecimiento y limitan la deposición de la película a un intervalo

estrecho de temperaturas del sustrato. Los bajos índices de crecimiento aumentan el tiempo de operación del proceso y por consiguiente el coste de la producción. El estrecho intervalo de temperaturas del sustrato implica la complejidad del control del hidrógeno, el cual es responsable de la degradación de las propiedades electrónicas producida por la luz. Sin embargo, el método HW-CVD es capaz de mejorar la estabilidad de la película y lograr mayores relaciones de deposición. Además, las películas obtenidas con el método del filamento caliente muestran menos degradación inducida por la luz.

El telururo de cadmio (CdTe) resulta ser un material ideal para ser usado como absorbedor en células solares debido a su "band gap" de 1.45 eV, pero gracias a una nueva técnica de fabricación se puede mejorar su eficiencia, esta técnica se denomina "sputtering" y proporciona una serie de ventajas inigualables por otra técnica hasta el momento, entre las que cabe destacar el ser un método económicamente eficiente capaz de generar el revestimiento más sutil y uniforme posible, es un proceso de bajas temperaturas y construye un enlace indestructible entre la película y el sustrato (ya que la soldadura es a nivel molecular.)

En lo referente a las células solares de Cobre Indio Galio Diselenuro (CIGS), hay que señalar que es una de las tecnologías de película delgada con mayor potencial debido a su alta eficiencia y bajo coste. Sin embargo es un método de fabricación complicado y necesita de una gran inversión. Además de los problemas de disponibilidad de materiales y la toxicidad de la capa de CdS. Una solución es desarrollar células con un mayor contenido de Ga y correspondientemente "band gap" más altas, pero esto no se ha hecho con éxito hasta la fecha. Otros temas que se abordan actualmente incluyen la necesidad de difusión de Na a partir del vidrio sódico-cálcico a través del contacto trasero de Mo y la correspondiente optimización del espesor del Mo. El costo y la disponibilidad de In y Ga para el despliegue a gran escala puede ser también un problema relevante.

Y por último, se ha dedicado un capítulo al reciente desarrollo de las células fotovoltaicas de polímero y a las posibilidades de mejorar su rendimiento. Como ventajas de estas células, se puede decir que, los materiales activos utilizados para la fabricación de dispositivos son solubles en la mayoría de los disolventes orgánicos comunes, además son flexibles y se pueden fabricar mediante un proceso de impresión continua. Sin embargo, hasta ahora, también presentan desventajas importantes que hay que intentar solventar, como son, PCE (eficiencia de conversión energética) muy baja en torno al 6 %, mala absorción debida al elevado "band gap" que presentan la mayoría de los polímeros, lo que ocasiona una pérdida importante en la recogida de fotones. Además de la baja estabilidad, provocada por la degradación del polímero, lo que conlleva vidas muy cortas de estos.

No obstante, las posibilidades de mejora y de investigación en el campo de las células solares de polímero son incalculables, siempre y cuando el desarrollo de nuevos materiales siga su curso. Hay que tener en cuenta que es una técnica muy reciente.

Las principales conclusiones que se pueden sacar son dos:

- Atendiendo a la continua y creciente demanda energética, acentuada en la última década por las nuevas economías emergentes y el constante crecimiento de la población mundial, además de la influencia de factores tales como el encarecimiento de los combustibles fósiles, así como su principal problema relacionado el cambio climático, la inseguridad y la alta peligrosidad de otras energías como la nuclear, van a potenciar la importancia de la energía solar, no sólo como una fuente de energía limpia y renovable, sino también como una fuente de energía duradera y resistente al paso del tiempo como inagotable mientras el sol siga existiendo.

- Atendiendo a las inmensas posibilidades de innovación y mejoras, tanto de los materiales para células solares como de sus procesos de fabricación, como las sales fundidas para almacenamiento térmico, la energía solar, tanto la térmica como la fotovoltaica, están llamadas a ser la energía del futuro.

Capítulo 6. Bibliografía

6.1. Libros

- Travizano, Matias, Romano, Sebastián y Kamienkowski, Juan, *Determinación de la banda prohibida (band gap) en Si*, Laboratorio 5, Departamento de física, UBA-2002
- *Energía Solar Térmica*. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. Autor: José Manuel López-Cózar.
- "Guía práctica de Energía Solar Térmica". Editada por la Agencia Valenciana de la Energía.
- *Energía Solar Termoeléctrica*. Dr. Manuel Romero Álvarez

6.2. Artículos científicos

- S.R. Jadkar, J.V. Sali, A.M. Funde, Nabeel Ali Bakr, P.B. Vidyasagar, R.R. Hawaldar, D.P. Amalnerkar, (2007) *Deposition of hydrogenated amorphous silicon (α -Si:H) films by hot-wire chemical vapor deposition (HW-CVD) method: Role of substrate temperature*, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 91, pp 714-720.
- N. Romeo, A. Bosio, A. Romeo, (2010) *An innovative process suitable to produce high-efficiency CdTe/CdS thin-film modules*, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 94, pp 2-7.
- Allen M. Hermann, (1998) *Polycrystalline thin-film solar cells - A review*, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 55, pp 75-81.
- Wanzhu Cai, Xiong Gong, Yong Cao, (2010) *Polymer solar cells: Recent development and possible routes for improvement in the performance*, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 94, pp 114-127.

6.3. Páginas web

-<http://www.greenpeace.org/raw/content/argentina/cambio-climatico/greenpeace-solar-creando-un-f.pdf>

Creando un Futuro Energético Limpio. GreenPeace Abril 2001

- <http://www.greenpeace.org/raw/content/espana/reports/gu-a-solar.pdf>

Como disponer de energía solar fotovoltaica conectada a la red eléctrica. Guía Solar. GreenPeace.

- <http://www.placas-solares.net/que-es-la-energia-solar/>

- <http://www.sitiosolar.com>

- <http://www.energiasrenovables.ciemat.es>

- <http://www.energia-solar-fotovoltaica.info>

- <http://es.wikipedia.org>

- <http://www.portalsolar.com>

http://www.ujaen.es/investiga/solar/07cursosolar/home_main_frame/03_celula/01_basico/3_celula_01.htm

- <http://bacterio.uc3m.es/investigacion/sensores/temas/ftir/ftir.html> Departamento de Física.
Universidad Carlos III de Madrid.