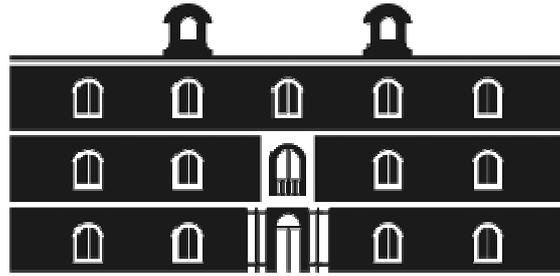




Universidad
Politécnica
de Cartagena



industriales
etsii UPCT

Células solares transparentes: desarrollo actual y aplicaciones

Titulación: Máster de Energías Renovables
Alumno: Luis Peña Asensio
Director: Javier Padilla Martínez

Cartagena, 30 de Septiembre de 2011

Células solares transparentes: desarrollo actual y aplicaciones

Índice

1. Introducción:
 - 1.1 Base del proyecto
 - 1.2 Objetivos
 - 1.3 Definiciones
 - 1.4 Revisión de todas las tecnologías
 - 1.4.1 Células solares y módulos de silicio cristalino
 - 1.4.2 Células solares de capa delgada de silicio
 - 1.4.3 Células solares de elementos de valencias III, IV y V
 - 1.4.4 Células solares de silicio amorfo
 - 1.4.5 Células solares de Cu(InGa)Se₂
 - 1.4.6 Células solares de telurio de cadmio
 - 1.4.7 Células solares orgánicas
 - 1.4.8 Células solares sensibilizadas por colorante (DSSC)

2. Búsquedas:
 - 2.1 Reviews
 - 2.2 Artículos
 - 2.3 Patentes
 - 2.4 Soluciones comerciales
 - 2.4.1 SolarWindow
 - 2.4.2 Solarmer
 - 2.4.3 WYSIPS
 - 2.4.4 Power Plastic
 - 2.4.5 Dyesol
 - 2.4.6 G24 Innovations
 - 2.4.7 Sphelar

3. Estado del arte
 - 3.1 Soluciones ópticas
 - 3.1.1 Huecos
 - 3.1.2 Puntos
 - 3.1.3 Marco fotovoltaico
 - 3.2 Soluciones físicas
 - 3.2.1 Electrodos
 - 3.2.2 Orgánicas
 - 3.2.3 Invertidas
 - 3.2.4 Colorante
 - 3.2.5 Silicio

4. Cálculos energéticos del uso de células semitransparentes

5. Usos
 - 5.1 Integración arquitectónica
 - 5.2 Otros

6. Conclusiones

Células solares transparentes: desarrollo actual y aplicaciones

1. Introducción

1.1 Base del proyecto

Consiste en hacer una revisión del estado del arte de células solares en las que se haya buscado la transparencia de la misma, abordando su desarrollo desde múltiples tecnologías y teniendo en cuenta que no hay una propuesta "ganadora". Se estudiarán las diferentes aplicaciones de las mismas.

La misma base del proyecto son dos ideas contrapuestas debido a que una célula fotovoltaica ha de atrapar la mayor cantidad posible de luz y no dejarla pasar. La solución sería una célula solar que dejase pasar la franja visible del espectro de radiación solar y que capture todas las demás.

1.2 Objetivos

El proyecto busca reunir una base de datos científica para conocer el estado actual de las células solares transparentes. Para ello se ha buscado artículos, patentes y soluciones empresariales que tengan en mente este desafío.

La aplicación principal de esta solución sería la sustitución de cualquier ventana y superficie acristalada por estos módulos solares, de ahí el hincapié en buscar la transparencia. Al tener disponibles unas superficies de recolección solar tan grande, en principio no supondría un problema que la eficiencia de las mismas no sea equiparable a las actuales células solares convencionales.

El propio fin del proyecto es una contradicción pues buscamos una célula fotovoltaica la cual ha de captar toda la radiación lumínica posible para transformarla en energía y que a la vez sea transparente: que deje pasar la luz.

En principio, podrían plantearse dos tipos de soluciones:

- Establecer un compromiso entre transparencia y eficiencia, desarrollando células transparentes en un porcentaje determinado.
- Hacer células fotovoltaicas que dejen pasar toda la luz visible por el ser humano y que capturen otros rangos lumínicos.

1.3 Definiciones

Toda radiación electromagnética, luz solar incluida, esta compuesta de partículas llamadas fotones, que transportan cantidades específicas de energía determinadas por las propiedades espectrales de su fuente.

Los fotones muestran un comportamiento de onda con una longitud de onda “ λ ” relacionada con la energía del fotón “ E_λ ” de la siguiente forma:

$$E_\lambda = hc/\lambda$$

*Donde h es la constante de Planck, c es la velocidad de la luz.

Siendo la longitud de onda la distancia recorrida por la misma en un periodo (tiempo transcurrido entre dos puntos equivalentes de la onda), y la frecuencia el inverso del periodo.

Por lo que a menor longitud de onda (ultravioletas) mayor energía. Seria interesante poder capturar esta radiación en una supuesta célula solar transparente tras perder la capacidad de absorber la franja lumínica visible por el ojo humano.

La aplicación de la Ley de Planck al sol con una temperatura superficial de unos 6000 K nos lleva a que el 99% de **la radiación emitida está entre las longitudes de onda de 0,15 μm (o micras) y 4 micras.** Como 1 \AA (angstrom) = 10^{-10} m = 10^{-4} micras (0,0001 μm) resulta que el Sol emite en un rango de 1500 \AA hasta 40000 \AA .

La radiación ultravioleta u ondas cortas iría desde los 1500 \AA a los 4000 \AA . La luz visible se extiende entre los 4000 \AA y los 7400 \AA . Y la radiación infrarroja u ondas largas desde las 0,74 micras a 4 micras.

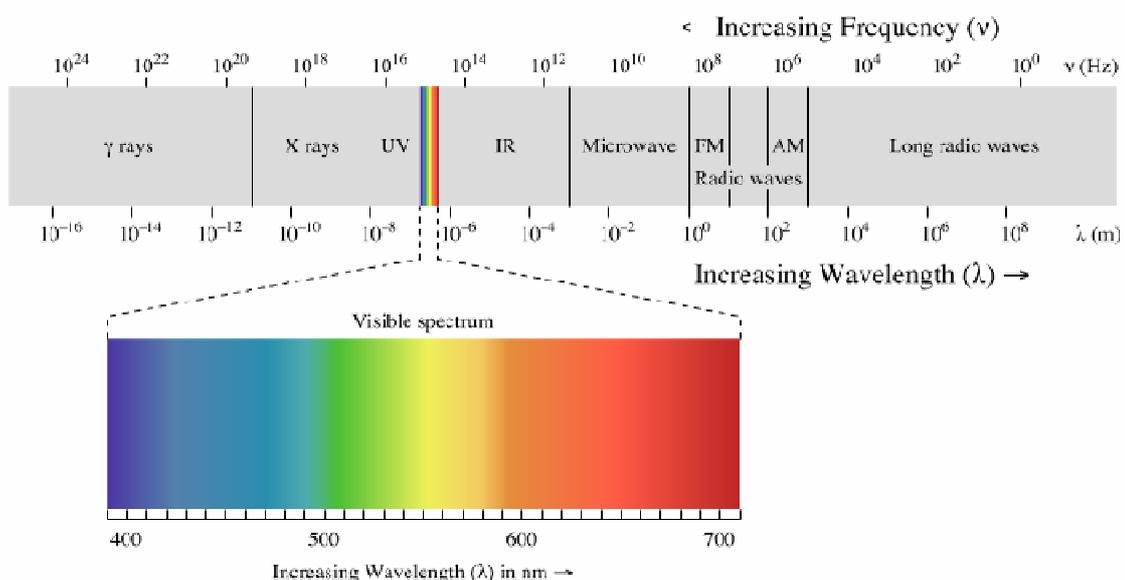


Figura 1. Espectro de radiación de las ondas electromagnéticas.

La atmósfera de la Tierra constituye un importante filtro que hace inobservables radiaciones de longitud de onda inferiores a las 0,29 micras (2900 Å) por la fuerte absorción del ozono y el oxígeno.

Un cálculo rápido con estos datos nos permite saber que porcentaje del espectro solar ocupa la luz visible:

40.000 Å - 2900Å = 38500	es el	100% (radiación solar)
7400 Å - 4000Å = 3400	resulta el	8,83%

Dejando un 91,16 % de todo el espectro solar que podríamos aprovechar para nuestra aplicación que solo despreciaría la luz visible. Este cálculo es meramente orientativo ya que el espectro de radiación solar es mas intenso para unas radiaciones que otras.

Una célula solar semiconductor es simplemente un diodo semiconductor que ha sido cuidadosamente diseñado y construido para absorber eficientemente y convertir energía lumínica del sol en energía eléctrica.

En células basadas en el silicio sólo los fotones con suficiente energía para crear un par electrón-hueco (aquellos con una energía mayor que la banda prohibida del semiconductor) contribuirán al proceso de conversión de energía. Por este motivo la naturaleza espectral de la luz solar es una importante consideración en el diseño de células solares eficientes.

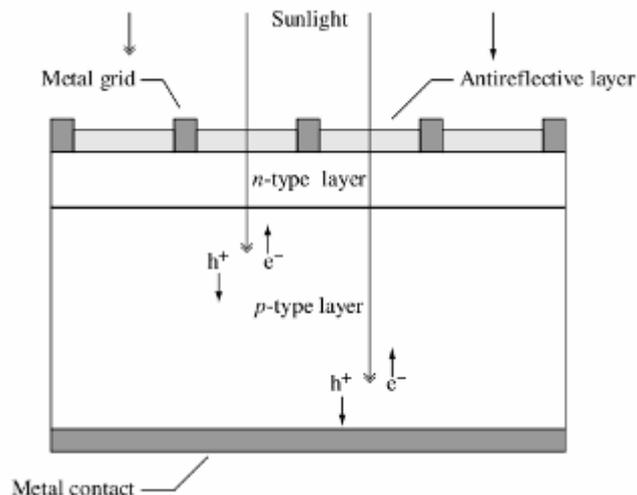


Figura 2. Sección de una célula solar de silicio con diagrama de su funcionamiento.

En los artículos sobre las células solares convencionales (opacas) no suelen indicar la franja lumínica que absorben sino el porcentaje de absorción de la radiación solar que llega a la superficie terrestre, esto es así ya que no se busca despreciar radiación sino aprovechar toda la que se pueda.

1.4 Revisión de todas las tecnologías

A continuación se repasa cada una de las diferentes tecnologías utilizadas para aplicaciones fotovoltaicas disponibles comercialmente. Se presentan los materiales típicos empleados, eficiencias conseguidas, y se hace hincapié en los grosores habituales para cada tipo de células. Aunque la posible transparencia final del dispositivo no depende únicamente de este factor (el coeficiente de absorción, o la texturación del dispositivo serían factores relevantes, por citar algún ejemplo), estos datos sirven como punto de partida para la discusión sobre la posibilidad de realizar células transparentes. El resumen de las tecnologías está hecho en función de la aparición de las mismas en el mercado.

1.4.1 Células solares y módulos de silicio cristalino

El silicio es la base de la tecnología dominante en células solares gracias al gran desarrollo realizado con este material por la microelectrónica en las últimas décadas. Constituyen más del 85% del mercado fotovoltaico a día de hoy, a pesar que más de una vez se anunció que otras tecnologías emergentes la desbancarían.

A longitudes de ondas cortas del espectro solar (ultravioleta), la generación de dos pares electrón-hueco por un fotón es posible, aunque cuantitativamente este es un efecto pequeño; en el otro extremo del espectro (infrarrojo) la absorción parasitaria de portadores libres compite con la generación de electrones.

- Material:

Están basadas en el silicio. Lo podemos encontrar en varias formas: monocristalino, policristalino o amorfo. Éstas se diferencian en la cantidad de agrupaciones atómicas de su estructura.

El silicio monocristalino es el más difícil y caro de producir de todos aunque últimamente se está mejorando mucho la tecnología del silicio policristalino.

- Técnicas de fabricación

Monocristalino:

- Método Czochralski:

Permite una gran variedad de formas y dopajes del material. Su equipamiento consiste en una cámara de vacío en la que la materia prima, silicio, es fundida en un crisol y una “semilla” del cristal monocristalino se pone en contacto con el material fundido. Entonces la semilla se separa lenta y verticalmente de la superficie fundida donde el líquido cristaliza entorno a la semilla. Cuando se está a punto de alcanzar el diámetro deseado, la velocidad de extracción se incrementa al valor específico en el que el cristal crece hasta el diámetro deseado. Debido a la rotación de la semilla, la sección del cristal es circular.

-Silicio tricristalino (tri-Si):

Sus propiedades mecánicas permiten cortarlo en láminas ultra delgadas con mejores propiedades mecánicas que el silicio monocristalino. Tri-Si es un compuesto cristalino consistente en 3 granos monocristalinos mutuamente ligados. La producción del Tri-Si es compatible con el método estándar Czochralski.

Material (sin procesar)	Grosor medio [μm]	Eficiencia media [%]	V _{oc} [mV]	I _{sc} [mA/cm ²]	FF [%]	Rho [ohm cm]
Mono-Si	200	15,2	612	32,7	76	1
Tri-Si	140	15,5	615	33,4	75,5	4

Figura 3. Tabla comparativa¹ de células semicuadradas de 103x103mm²

Policristalino:

- Producción en lingotes:

Existen dos técnicas distintas: la Bridgman y el proceso de fundición en bloque. En ambos procesos se obtienen los lingotes de silicio policristalino de alta calidad con un peso de 250~300 kg y unas dimensiones de 70 x 70 cm² y una altura de 30 cms.

La mayor diferencia entre ambas técnicas es que la fundición y el proceso de cristalización usa un solo crisol en la técnica Bridgman, mientras que en la otra se utiliza un segundo crisol para la cristalización.

Creación de los paneles:

Como más del 80% de la producción actual de células solares requiere el corte de grandes cristales de silicio. Los lingotes policristalinos producidos mediante Bridgman u algún otro proceso consiguen alcanzar secciones de más de 50x50 cm y pesan alrededor de 250kg. Los cristales monocristalinos producidos actualmente por el método Czochralski tienen un diámetro mayor de 20cm. Sin embargo, a pesar de con el tiempo se ha ido reduciendo considerablemente el coste del procesado de células solares y la fabricación de los módulos, los costes de aserrado de las laminas permanecen altos.

Corte de las láminas:

- Multi hilo:

Después de la producción de los cristales, los lingotes de silicio son cortados por sierras de cinta en columnas con una sección que es determinada por el tamaño final de la oblea (el estándar son 10x10cm, pero las de 15x15cm se están empezando a imponer). Las columnas son entonces puestas en un soporte y colocadas en una sierra multi-hilo que la cortara en las obleas buscadas. Esta sierra usa un solo hilo que es arrollado varias veces desde un carrete. El hilo se hace pasar por unas guías paralelas que resultara en varios puntos de corte simultáneos.

Terminación

Existe multitud de procesos de terminación para la fabricación de todo tipo de células solares según las necesidades y características del modelo elegido.

- Banda de absorción lumínica

El silicio cuenta con un bandgap de 1.1 eV

- Eficiencia actual, previsible en un futuro y teórica:

	Ideal (calculado)	PERL* (medido)	Industrial (típico)
Eficiencia, η (%)	28,8%	24,7%	15%

*("Passivated emitter and rear locally diffused" -> Emisor pasivado y difundido localmente en la zona posterior)

La celda óptima debe usar material muy puro, para minimizar la recombinación de Auger y la absorción de los portadores libres como resultado del intercambio entre la absorción y la recombinación, y debe tener alrededor de 80 μ m de espesor. Podría alcanzar una eficiencia cercana del 29% con un sol AM1.5 Global, 25C.

- Posibilidad de aplicaciones transparentes

Composición interna de las células de silicio:

Se adjunta un dibujo esquemático con las distintas partes que componen una célula solar de silicio monocristalino:

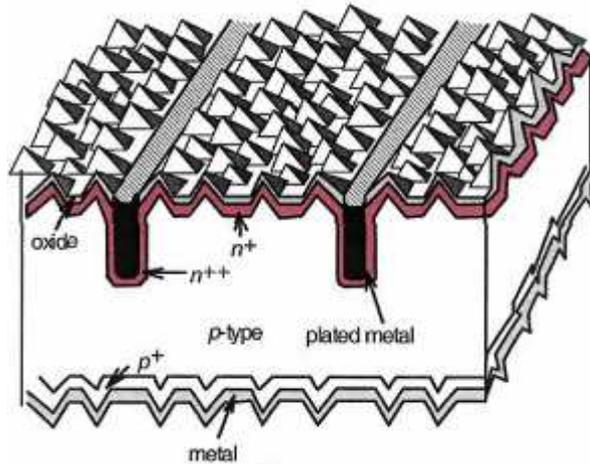


Figura 3. Corte transversal de una célula de silicio

El grosor habitual de estas células es de 250 μm y se han hecho de 1~3 μm .

Se adjunta a continuación unas graficas experimentales con los grosores mínimos obtenidos de las células solares de silicio capaces de producir eficientemente energía solar. Se incluyen también los datos según distintas terminaciones realizadas a las células.

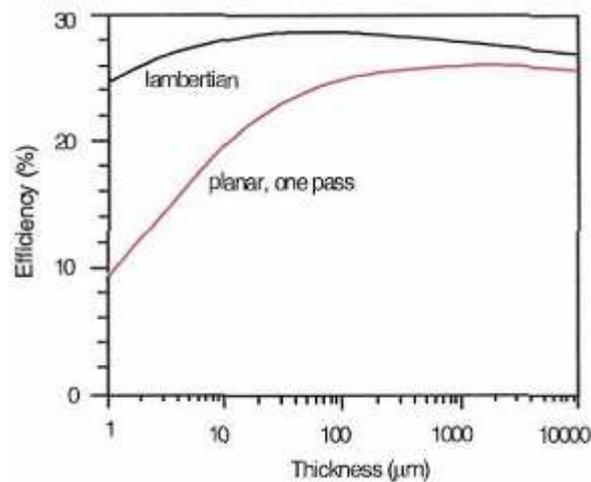


Figura 4. Grafica de la eficiencia de la célula con respecto al grosor de la misma tanto para cuando tiene trampa de luz lambertiana como para cuando no.

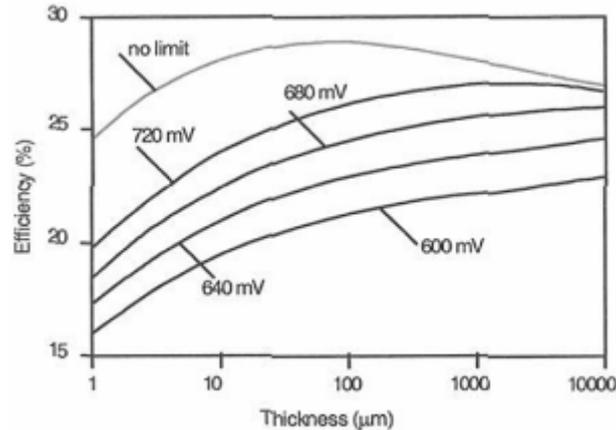


Figura 5. Eficiencia limitante en una célula de silicio con trampas de luz lambertiana en función de la velocidad de recombinación de su superficie (caracterizado en términos del voltaje límite impuesto en dicha recombinación).

Datos obtenidos de los libros de referencia de Archer² y A. Luque¹.

1.4.2 células solares de capa delgada de silicio

Las películas delgadas de silicio tienen la desventaja de ser malas absorbiendo en una significativa región del espectro solar. Una solución conocida a este problema es incorporar trampas de luz con superficies rugosas o aplicando texturas en las mismas.

Han despertado el interés de usar sustratos más finos por dos razones:

- (1) Reduce la cantidad de silicio por cada wattio de energía fotovoltaica generada (un uso eficiente del silicio evita problemas de desabastecimiento).
- (2) Mejora la eficiencia de las células solares fabricadas en sustratos de bajo coste usando diseños de células mejorados.

- Material

Al ser el silicio un material con banda gap indirecta, se piensa que el grosor del silicio requerido para absorber la luz solar suficiente debe ser mayor que el coeficiente de absorción para una longitud de onda lumínica (λ) correspondiente al borde de la banda cercana. Usando una simple regla de tres en el principio de la absorción para una sola exposición lumínica y utilizando el punto medio del borde de la banda ($\lambda = 1.05 \mu\text{m}$), obtenemos un grosor de $\sim 700 \mu\text{m}$. Implicando que el grosor de la oblea para una absorción del espectro solar suficiente ha de ser mayor de $700 \mu\text{m}$. Lo cual es demasiado grueso para una oblea de silicio y no es recomendable para la producción comercial de células solares por dos razones: el alto coste y la pequeña efectividad para la colección de portadores fotogenerados.

Por lo que, por razones prácticas, el grosor de la oblea debe ser menor que este valor. Es más, modelos detallados que tienen en cuenta características superficiales y los multireflejos dentro de la oblea muestran que la absorción puede ser ampliamente aumentada; disminuyendo la necesidad de una oblea tan gruesa. Incluso empleando estructuras apropiadas, **una fina capa de silicio puede ofrecer un alto grado de absorción del espectro solar, casi tanto como una oblea gruesa.**

Las obleas finas ahorran material y también ofrecen una ventaja de rendimiento reduciendo la recombinación de portadores mayoritarios dentro de la célula solar. Por lo que una reducción del grosor de la célula puede resultar en una mejora del voltaje a circuito abierto y del factor de llenado de la célula solar. Sin embargo, al reducir el grosor de la célula, la recombinación de superficie se vuelve un componente cada vez más importante de la recombinación total. Además, pueden sufrir pérdidas en la corriente generada a menos que las pérdidas ópticas asociadas a la reducción del grosor sean compensadas con una mejora del diseño capaz de atrapar la luz.

La industria fotovoltaica planea ir reduciendo el grosor de las obleas gradualmente desde su actual valor de 350 μm a menos de 100 μm en los próximos 10 años. Los argumentos anteriores proporcionan motivación para una gran reducción en forma de una nueva generación de células solares de silicio usando películas de menos de **10 μm de grosor**. Algunos simples cálculos y aproximaciones muestran que células con eficiencias cercanas al 10% pueden ser obtenidas con películas de silicio policristalino de 10 μm de grosor con un grano de 1 μm .

Una correcta aproximación para producir textura en células de capa delgada de silicio puede ser el uso de material policristalino. Este método ha funcionado bien para óxidos conductores transparentes usados en películas delgadas de silicio amorfo.

- Técnicas de fabricación

Las películas policristalinas creadas en un proceso de deposición de silicio gaseoso presentan naturalmente texturas superficiales. Estas texturas aparecen en las películas policristalinas cuando la temperatura se encuentra cerca o en el punto de fusión. Aunque los mecanismos exactos no están bien definidos, la textura parece ser un efecto de las uniones entre granos. En un crecimiento por procesos gaseosos, la alta energía de los bordes de grano permiten el movimiento de átomos de silicio fuera de las regiones del borde de los granos hacia los granos principales, ocurriendo una pérdida de material (reflejada en el grosor de la películas de silicio) en los alrededores del borde del grano.

Estructura	Grosor (μm)	V_{oc} (mV)	I_{sc} (mA/cm ²)	Factor de llenado (%)	Eficiencia (%)
n+pp+	44	643	35,3	75,8	17,2
PERL	47	698	37,9	81,1	21,5
PERL	400	702	41,2	81,2	23,5

Figura 6. Parámetros de dos tipos de células delgadas y comparación con una gruesa:

*PERL = passivated emitter rear locally diffused (Emisor pasivado posteriormente difuso)

- *Películas monocristalinas usando sustratos de silicio monocristalinos:*

Este enfoque implica separar una capa delgada monocristalina de un sustrato monocristalino. Actualmente se utilizan varias técnicas:

a) Una solución consiste en generar una capa de silicio poroso en un sustrato monocristalino, para luego hacer crecer epitaxialmente una capa delgada.

b) Otra solución sugerida es similar al método de “corte inteligente” usado en el campo de la microelectrónica para la unión de obleas. Esto implica implantar hidrógeno en una oblea de silicio y crear una interfaz por defecto por debajo de la superficie, seguida por una separación de la capa superficial.

- *Sustratos de silicio policristalino:*

Las películas delgadas de silicio pueden ser depositadas en un sustrato policristalino por un proceso epitaxial. El objetivo general es usar obleas de silicio fundido de bajo coste y grandes granos (como el de la materia prima de grado metalúrgico) como sustrato y depositar en ellas una capa delgada de alta calidad.

- *Sustratos sin silicio:*

Las ventajas económicas de las películas delgadas de silicio se producirán si el soporte en el que se deposita es de bajo coste. Claramente en este caso no es posible depositar directamente una capa de silicio cristalina. El uso de sustratos sin silicio se usa frecuentemente por el creciente éxito depositando silicio microcristalino en sustratos de vidrio a temperaturas razonablemente bajas.

- Banda de absorción lumínica

Tiene la misma que la de las células fotovoltaicas de silicio comunes aunque con una menor eficiencia.

- Eficiencia actual, previsible en un futuro y teórica

Es posible reducir el grosor en un factor de 10 y solo reducir la eficiencia un 10 % (23.5% vs. 21.5%). Se ha conseguido una alta eficiencia de conversión de más del 14% para células de 10x10 cm con $V_{OC} = 608$ mV, $J_{SC} = 30$ mA/cm² y FF = 78.1% y llegando al 16 % para células de 2x2 cm con $V_{OC} = 608$ mV, $J_{SC} = 35.1$ mA/cm² y FF = 77.1%.

- Posibilidad de aplicaciones transparentes

Planteadas en la revisión de las células de silicio cristalino.

Datos obtenidos de los libros de referencia de Archer² y A. Luque¹.

1.4.3 Células solares de elementos de valencias III, IV y V

Con el auge de la popularidad de la energía solar aumenta la demanda del silicio necesario para su fabricación, compitiendo directamente por la materia prima de los semiconductores. Se evitaría este problema usando otros conductores.

Una solución a este problema sería usar “concentradores”, en los cuales lentes o espejos focalizan la luz solar en una célula solar más pequeña. El ratio de concentración puede ser de entre 200X a 300X para el silicio y de 1000X a 2000X para las células solares de GaAs. Con estos ratios de concentración, el coste de la célula se vuelve menos importante que su eficiencia. Por ejemplo, una célula solar tándem de GaInP/GaAs/Ge con una eficiencia del 34% al 1000X y con un coste de 10\$/cm² puede ser más rentable que un concentrador de silicio con una eficiencia del 28% al 200X de radiación solar y con un coste de 0.50\$/cm².

- Material

Consiste en una célula superficial de $Gax In_{1-x} P$ (con un salto de banda de gap de 1.8~1.9 eV) construida monolíticamente en una unión túnel interconectada de estructura compatible y con una celda de GaAs como base.

Las células solares tándem de GaInP/GaAs tienen máximos de eficiencia de $\eta = 29.5\%$ para AM1.5G (Masa de Aire Global 1.5), de $\eta = 30.2\%$ para AM1.5G de 160 soles y de $\eta = 25.7\%$ para AM0 de 1 sol. Aunque estas eficiencias de uniones simples son solo ligeramente superiores que las altas eficiencias conseguidas en las mejores células solares de silicio, la facilidad de fabricar complejas estructuras de elementos de valencias III-V (incluyendo películas con diferentes bandas de gap) hace posible que la eficiencia exceda el 30%, superando las de cualquier dispositivo de unión simple.

- Técnicas de fabricación

A pesar de los problemas iniciales con el crecimiento de GaInP por deposición de vapores químicos metalorgánicos y complicaciones asociadas con un anómalo acercamiento al rojo de la banda de energía gap, a partir de 1988 se empezaron a fabricar células solares de GaInP razonablemente buenas para ser comercializadas.

- Banda de absorción lumínica

El espectro solar global.

- Eficiencia actual, previsible en un futuro y teórica

Los fabricantes hablan de eficiencias que continúan aumentando, siendo la más alta conseguida cercana al 30% de eficiencia para AM0.

La máxima eficiencia teórica es del 45% a 500 soles bajo un espectro solar AM1.5 por lo que podemos hablar de que actualmente se ha alcanzado un 80~90% de la eficiencia teórica.

- Posibilidad de aplicaciones transparentes

Tienen un grosor de ~350 μm pero esto puede variar en función del número de capas p-n que tenga la célula tándem.

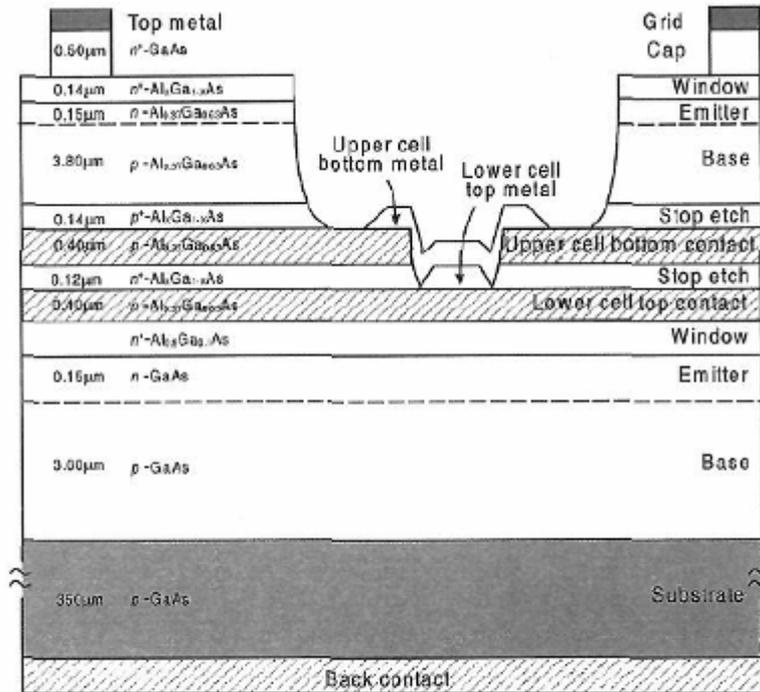


Figure 8.21 Cross section of an AlGaAs/GaAs tandem cell, showing details of the metal interconnector (MacMillan *et al.*, 1989).

Figura 7. Corte de una célula tándem de AlGaAs/GaAs, mostrando detalles de los conectores metálicos.

Relación de la eficiencia con el número de uniones:

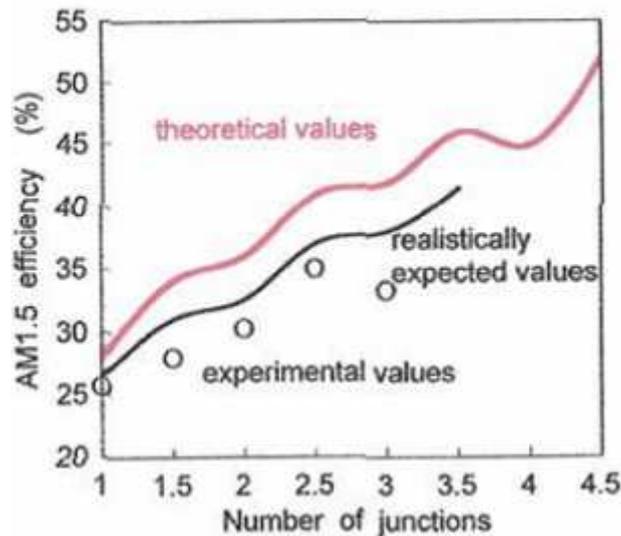


Figura 8. Eficiencias de conversión teóricas y realistas de las células solares de elementos de valencia III, IV y V.

Datos obtenidos de los libros de referencia de Archer² y A. Luque¹.

1.4.4 Células solares de silicio amorfo

Usan semiconductores no cristalinos. En estos materiales el enlace químico de los átomos es semejante al de los cristalinos. Sin embargo, una pequeña y desordenada variación de los ángulos en los enlaces elimina la estructura de red regular. Estos semiconductores amorfos pueden tener propiedades electrónicas aceptablemente buenas suficientes para muchas aplicaciones.

- Material

Los átomos de silicio amorfo conservan en gran parte la misma estructura básica del silicio cristalino: cada átomo de silicio está conectado por enlaces covalentes a otros cuatro átomos de silicio en forma de tetraedro.

Para el silicio amorfo hidrogenado (a-Si:H), los enlaces silicio-hidrogeno resuelven el problema estructural. Un gran porcentaje de los átomos de hacen enlaces covalentes con solo tres silicios limítrofes: el cuarto electrón de valencia del silicio enlaza con un átomo de hidrógeno.

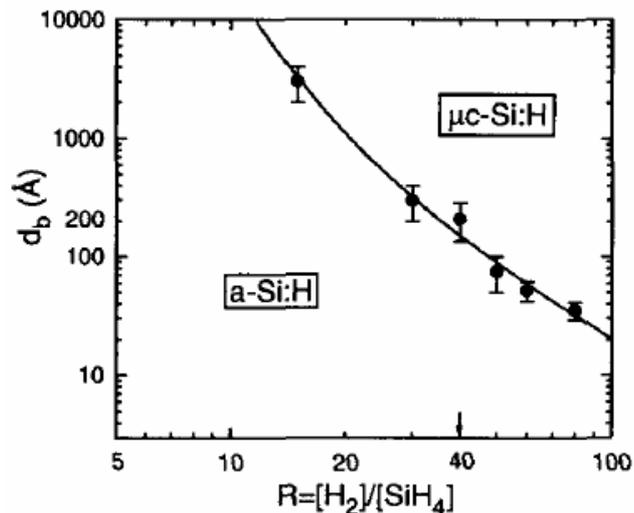


Figura 9. Grosor de la capa de silicio para su transición de amorfo a microcristalino con respecto al ratio de dilución de hidrogeno.

- Técnicas de fabricación

Después de numerosos años de incertidumbre, se descubrió que el silicio amorfo depositado por plasma contiene un alto porcentaje de átomos de hidrogeno enlazados en la estructura del silicio amorfo y que estos átomos de hidrógeno son esenciales para la mejora de las propiedades electrónicas del material depositado por plasma.

- Banda de absorción lumínica

El silicio amorfo presenta un bandgap ligeramente mayor que el silicio cristalino, 1.7 eV

- Eficiencia actual, previsible en un futuro y teórica

Las diferentes tendencias de V_{OC} y de I_{SC} para una banda gap determinan la eficiencia máxima sobre el 11.3% para una célula con una banda gap de 1.45 eV y un grosor mayor de los 300 nm. Ha habido increíbles logros tanto para incrementar la eficiencia de

la conversión solar de las células como en reducir costes en la fabricación. En 1997 fueron mostradas células solares de silicio amorfo con un 15,2% de eficiencia inicial y 13% de eficiencia estable. Para semiconductores ideales dispuestos con bandas de gap optimas, las eficiencias máximas teóricas para células solares sencillas, tándem y de triple unión bajo luz solar concentrada son del 31%, 50% y 56% respectivamente.

- Posibilidad de aplicaciones transparentes

Diagrama de una célula multicapas:

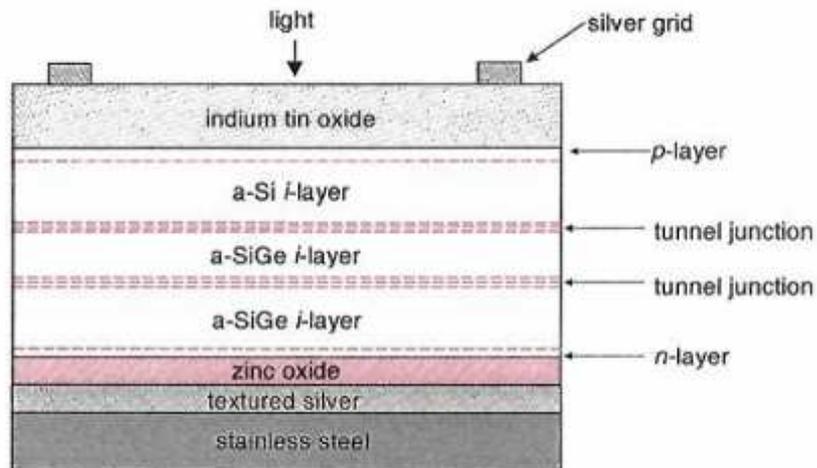


Figura 10. Esquema de un dispositivo de triple unión fabricado en un sustrato de acero.

Sus posibilidades de hacer aplicaciones transparentes han sido ya planteadas en la revisión de las células de silicio cristalino.

Datos obtenidos de los libros de referencia de Archer² y A. Luque¹.

1.4.5 Células solares de Cu(InGa)Se₂

Las células solares basadas en Cu(InGa)Se₂ han sido a menudo consideradas una de las tecnologías de células solares más prometedoras por su capacidad de generación de potencia a un coste reducido. Esto se debe parcialmente a las ventajas de las películas delgadas de bajo coste, con un alto grado de deposición de semiconductor de unas pocas micras de grosor sobre largas áreas y con una fabricación de módulos interconectados monolíticamente. Además, se han mostrado eficiencias muy altas para células y módulos solares de Cu(InGa)Se₂. Las células y módulos solares de Cu(InGa)Se₂ han mostrado excelente estabilidad a lo largo del tiempo en pruebas de exterior. Además de sus ventajas potenciales para aplicaciones terrestres de gran superficie, las células solares de Cu(InGa)Se₂ han mostrado alta resistencia a la radiación (comparadas a las células solares de silicio) y pueden ser hechas muy ligeras sobre sustratos flexibles.

- Material

Ha habido poco esfuerzo en fabricar dispositivos monocristalinos de CuInSe₂ por la dificultad de producir cristales de alta calidad, por eso es por lo que los esfuerzos se han centrado en células solares de capa delgada.

El CuInSe₂ con un exceso de Cu es siempre tipo "p" pero si es rico en In puede ser tanto tipo "p" como "n". Por recocido en un ambiente rico en selenio, un material de tipo "n" puede ser convertido en tipo "p", y a su vez recociendo en un ambiente pobre en selenio el material tipo "p" se convierte en tipo "n".

La operación de las células solares de Cu(InGa)Se₂/CdS se caracterizan por una alta eficiencia cuántica y corriente de cortocircuito. El voltaje en circuito abierto incrementa con la banda de gap de la capa de absorción y es insensible al grano del borde y a los defectos de la interacción de Cu(InGa)Se₂/CdS. Un modelo básico del dispositivo puede ser construido en el que el voltaje sea limitado por recombinación en la región del espacio de carga de la capa de absorción de Cu(InGa)Se₂. La recombinación en la interacción de Cu(InGa)Se₂/CdS es minimizada con un dopado adecuado y un alineamiento de la banda o un tratamiento superficial para crear una efectiva capa de inversión tipo "n" en la región cercana/unión de la capa de absorción.

- Técnicas de fabricación

Las consideraciones del dispositivo dictan que la capa de Cu(InGa)Se₂ debería ser de al menos 1 μm de grosor y que las composiciones relativas de los constituyentes son mantenidas dentro de los bordes determinados por el diagrama de fase.

Para la fabricación de células solares o módulos, lo más común es que el Cu(InGa)Se₂ sea depositado en un sustrato de vidrio cubierto de molibdeno, aunque también otros materiales han sido usados como sustrato incluyendo películas de metal o plástico y puede que tengan ventajas para el procesado.

El vidrio de carbonato sódico y cal, el cual es el usado en las ventanas normales, es el material más habitual usado como sustrato por el $\text{Cu}(\text{InGa})\text{Se}_2$ ya que está disponible en grandes cantidades a un bajo coste y aun así se ha conseguido hacer dispositivos de gran eficiencia. La deposición de $\text{Cu}(\text{InGa})\text{Se}_2$ requiere de una temperatura de sustrato (TSS) de por lo menos 350°C y las células de mayor eficiencia han sido fabricadas usando películas depositadas a la máxima temperatura (TSS $\approx 550^\circ\text{C}$) que el sustrato de vidrio puede soportar sin reblandecerse demasiado. El vidrio está aislando eléctricamente y es su superficie es suave, lo que permite la integración monolítica en los módulos.

- Banda de absorción lumínica

El coeficiente de absorción " α " del CuInSe_2 es muy alto, mayor de $10^5/\text{cm}$ para energías de fotón de 1.4 eV y mayores.

- Eficiencia actual, previsible en un futuro y teórica

Las células solares de $\text{Cu}(\text{InGa})\text{Se}_2$ han conseguido eficiencias cercanas al 20%, la mayor de cualquier célula solar. Actualmente, es del 18,8% con un área total de $0,5 \text{ cm}^2$.

El dispositivo de mayor eficiencia de $\text{Cu}(\text{InGa})\text{Se}_2$ tiene un $\text{JSC} = 35,2 \text{ mA/cm}^2$ de un máximo teórico de $42,8 \text{ mA/cm}^2$ disponible para una banda gap de 1,12 eV bajo una iluminación global AM1,5.

Hay una buena razón para tener optimismo en que las eficiencias de estas células solares superen el 20% en un futuro cercano y que el rendimiento del modulo continuará mejorando.

Una célula en tándem monolítico de esta tecnología tiene el potencial de alcanzar eficiencias del 25% o mayores.

- Posibilidad de aplicaciones transparentes

Diagrama de una típica célula $\text{Cu}(\text{InGa})\text{Se}_2$, suelen tener un grosor de $\sim 3 \mu\text{m}$ ($\text{Mo} = 1 \mu\text{m}$ y $\text{Cu}(\text{InGa})\text{Se}_2 = 1\sim 2 \mu\text{m}$):

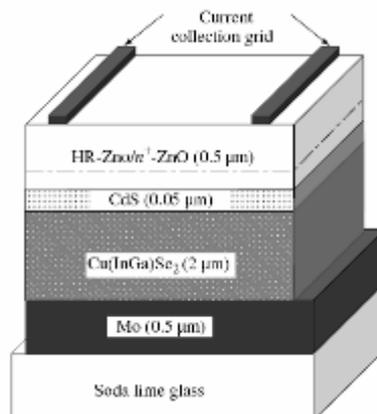


Figura 11. Corte esquemático de una célula solar de $\text{Cu}(\text{InGa})\text{Se}_2$.

Datos obtenidos de los libros de referencia de Archer² y A. Luque¹.

1.4.6 Células solares de telurio de cadmio

Los cálculos de la dependencia entre el gap energético y la eficiencia de conversión de la célula solar ideal muestran que el CdTe es una excelente elección para la radiación emitida por nuestro sol. El CdTe es un compuesto semiconductor del grupo IIB - VIA con una banda de gap óptica directa que coincide casi óptimamente con el espectro solar para la conversión de energía fotovoltaica. Con una banda de gap directa de $E_g = 1,5$ eV y un alto coeficiente de absorción de más del $5 \times 10^5/\text{cm}$ del CdTe significa que podemos esperar un gran rendimiento cuántico en un amplio rango de longitud de onda, desde el ultravioleta a la banda de gap del CdTe ($\lambda \approx 825$ nm). Los fotones con una corta longitud de onda, pero con una energía mayor que el E_g , son absorbidos cerca de la superficie del CdTe, convirtiendo al CdTe un material atractivo como capa de absorción para células solares de capa delgada.

- Material

El CdTe se puede dopar con impurezas foráneas pudiendo obtenerse conductividad de tipo "p" y "n". El tipo de conductividad del CdTe también puede ser cambiado variando la estequiometría Cd-Te. Un exceso de Cd resulta en conductividad tipo "n" y un exceso de Te en tipo "p".

Todos estos factores complementan su banda de gap y coeficiente de absorción prácticamente ideal para dispositivos fotovoltaicos terrestres, convirtiéndolo en un material adecuado para aplicar en forma de capa delgada.

La actual generación de células solares de CdTe de alta eficiencia están basadas en CdTe de tipo "p" y CdS tipo "n". Las propiedades eléctricas deseadas se obtienen por tratamientos de activación que incorporan impurezas específicas a las capas de CdTe y CdS como tratamientos postdeposición que incorporan CdCl_2 , O_2 y Cu al CdTe, que pueden activar o pasivar defectos nativos.

- Técnicas de fabricación

El CdTe emergió como nuevo material electrónico en 1947 cuando se sintetizaron cristales de CdTe por la reacción de los vapores de Cd y Te en una atmósfera rica en hidrógeno.

Una correcta evaporación del CdTe facilita las técnicas de deposición por vapor y las altas presiones de sublimación para el Cd y el Te aseguran composiciones de fase simple en depósitos formados al vacío a temperaturas por encima de 300 °C. El CdTe es el producto estable de la reducción catódica de soluciones que contienen iones de Cd y de Te debido a los pequeños potenciales de reducción del Cd y del Te y a la poca solubilidad del producto (CdTe).

Los métodos de fabricación pueden organizarse en tres conceptos químicos:

- 1- Condensación/reacción de los vapores de Cd y Te_2 en una superficie (PVD, VTD, CSS y deposición catódica).
- 2- Reducción galvánica de los iones de Cd y Te en la superficie (electrodeposición).
- 3- reacción de precursores en una superficie [deposición de vapor químico metal-orgánico (MOCVD), deposición por spray,...]

- Banda de absorción lumínica

El alto coeficiente de absorción del CdTe (aunque su capa tenga un grosor de $2 \mu\text{m}$), $>5 \times 10^5 / \text{cm}$, para fotones con $E > E_g$ proporciona una absorción del 99% de los fotones absorbibles para AM1,5.

- Eficiencia actual, previsible en un futuro y teórica

Actualmente los módulos fotovoltaicos de CdTe suelen tener un área de $\sim 1 \text{ m}^2$ y han alcanzado eficiencias por encima del 10% con un pico de potencia del orden de 90 W.

El record de eficiencia a día de hoy es de 16,5% con $V_{OC} = 845 \text{ mV}$, $I_{SC} = 25,9 \text{ mA/cm}^2$ y $FF = 75,5\%$.

Las consideraciones de los parámetros de la célula de CdTe obtenidos por dispositivos en cualquier configuración sugieren que se pueden esperar sin mucha complicación eficiencias cercanas al 19% con $V_{OC} = 900 \text{ mV}$, $J_{SC} = 26 \text{ mA/cm}^2$ y $FF = 80\%$. Además del incremento de la eficiencia en dispositivos de unión simple, el ajuste de la banda de gap mediante la aleación con otros metales del grupo IIB puede facilitar el desarrollo de células multi-unión con eficiencia cercana al 30%.

- Posibilidad de aplicaciones transparentes

Estructura interna:

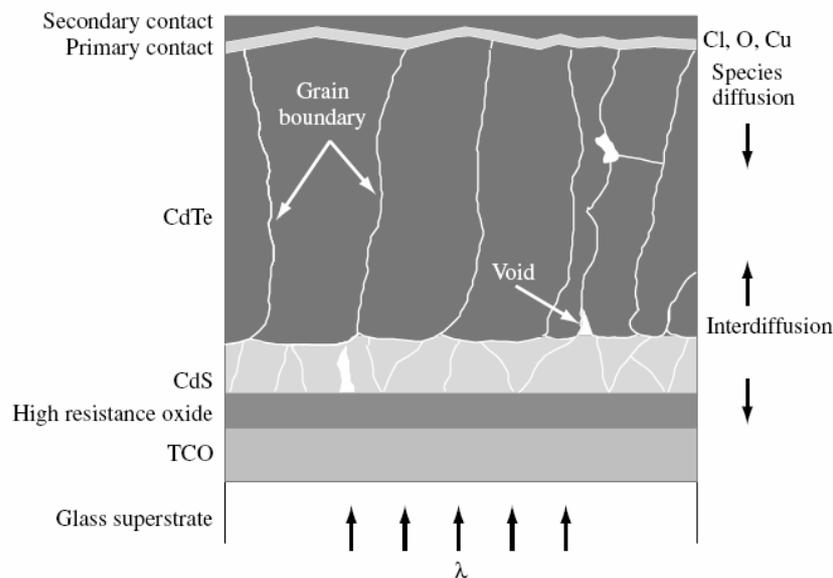


Figura 12. Estructura básica de una célula solar de CdTe. La naturaleza policristalina de las capas de CdS y CdTe se indican a modo de recordatorio (no esta a escala).

Detalle del tamaño de cada una de las capas (aunque como se verá a continuación el grosor de la capa activa de CdTe puede variar):

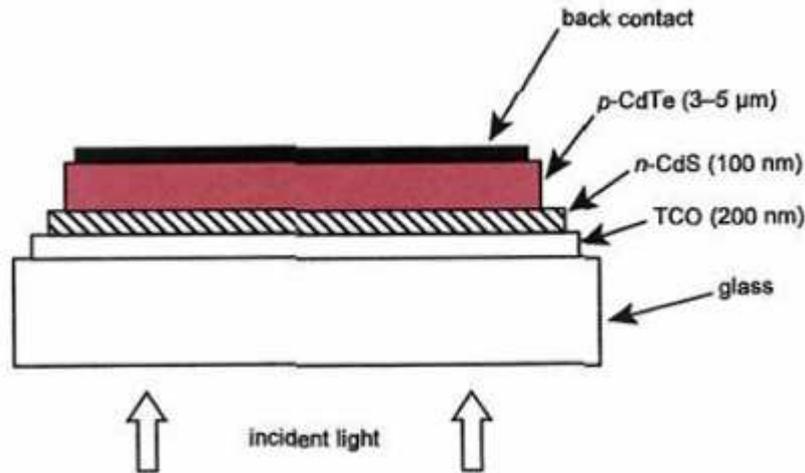


Figura 13. Secuencia de las capas de una célula solar convencional actual.

Las células de telurio de cadmio tienen un grosor que varía de 1~30 µm según la fabricación:

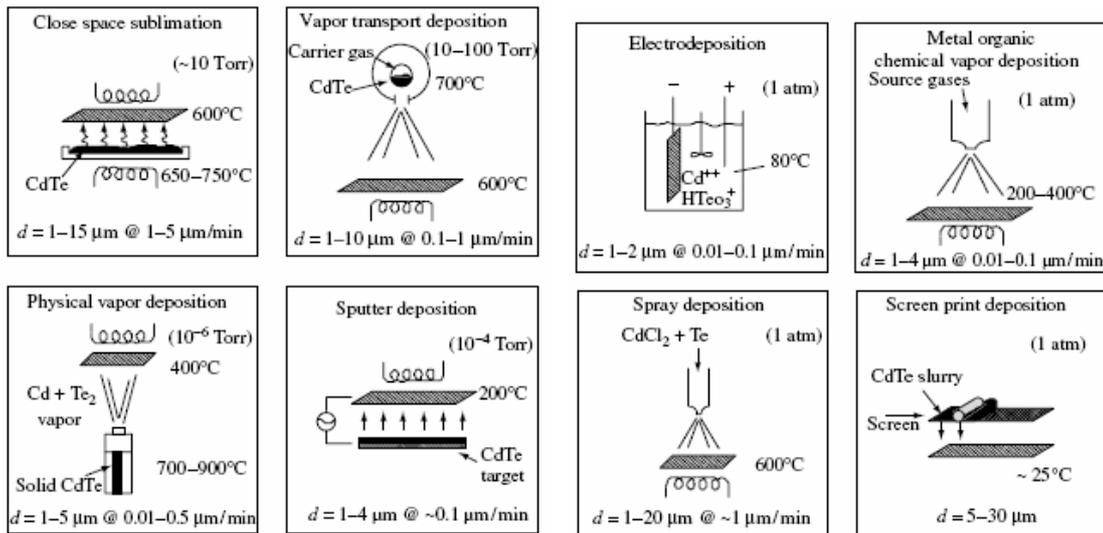


Figura 14. Representación esquemática de las técnicas de fabricación por deposición en capa fina de las células solares de CdTe.

Datos obtenidos de los libros de referencia de A. Luque¹.

1.4.7 Células solares orgánicas

A pesar de los avances en el campo de la industria solar, el coste de la fabricación de células fotovoltaicas continua siendo muy alto para muchas aplicaciones, sobre todo cuando se requieren grandes superficies. Uno de los factores que elevan el precio de estas tecnologías es la necesidad de procesar semiconductores a altas temperaturas en ambientes al vacío. Esto limita la fabricación a procesos por lotes, con la poca rentabilidad que esto conlleva.

Una posible solución es el uso de semiconductores orgánicos, los cuales pueden ser producidos en grandes superficies a temperaturas relativamente bajas, tanto como por métodos al vacío, como por sublimación de material o preferiblemente por procesos con materiales capaces de formar películas como los polímeros.

La reducción de costes tendrá lugar en parte por el bajo coste del poco volumen necesario en las delgadas capas activas de semiconductor, pero más importante por el bajo coste de los otros materiales usados, como los sustratos, y los reducidos costes de fabricación por procesos como la producción "roll to roll".

La fotoabsorción en estos materiales crea un estado excitado que es confinado normalmente a una molécula o a una región de una cadena polimérica. Esta excitación localizada es conocida como "excitón". Puede ser considerado tanto como un estado de excitación neutral de una molécula, o, utilizando términos de semiconductores, como un par electrón-hueco, unidos por interacciones de Coulomb y de red. La unión electrón-hueco es bastante fuerte, del orden del 0,5 eV o superior, por lo que a temperatura ambiente ($kT = 25 \text{ meV}$) es raro que ocurra la separación del par.

Esquema del funcionamiento de una célula solar orgánica:

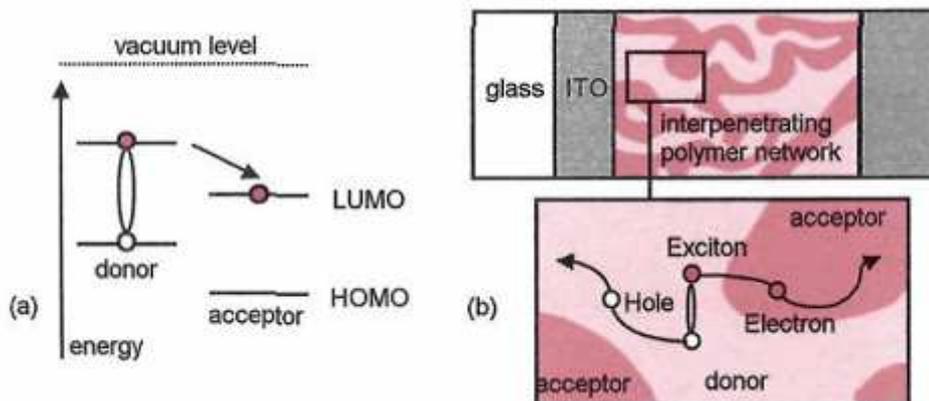


Figura 15. (a) Diagrama esquemático de transferencia de carga fotoinducida en la interfaz entre dos semiconductores con distintos niveles de ionización y afinidades electrónicas. (b) Esquema que muestra una mezcla de polímeros aceptores de electrones y de huecos puede ser usada para proporcionar heterouniones distribuidas a través de la capa de compuesto polimérico.

- Material

Se utilizan polímeros conjugados capaces de conducir los electrones. La especial configuración de sus enlaces, alternando dobles y simples, permite la conducción electrónica como semiconductor, obteniendo comportamientos análogos a semiconductores inorgánicos dopados.

Los materiales moleculares presentan propiedades semiconductoras cuando sus átomos de carbono presentes en la molécula o en la cadena polimérica están unidos como orbitales híbridos $sp^2 + p_z$. Los orbitales p_z forman orbitales moleculares π y π^* deslocalizados, los cuales son reconocidos como la alternancia de uniones "simples" y "dobles" carbón-carbón. Un ejemplo de estos materiales son los siguientes:

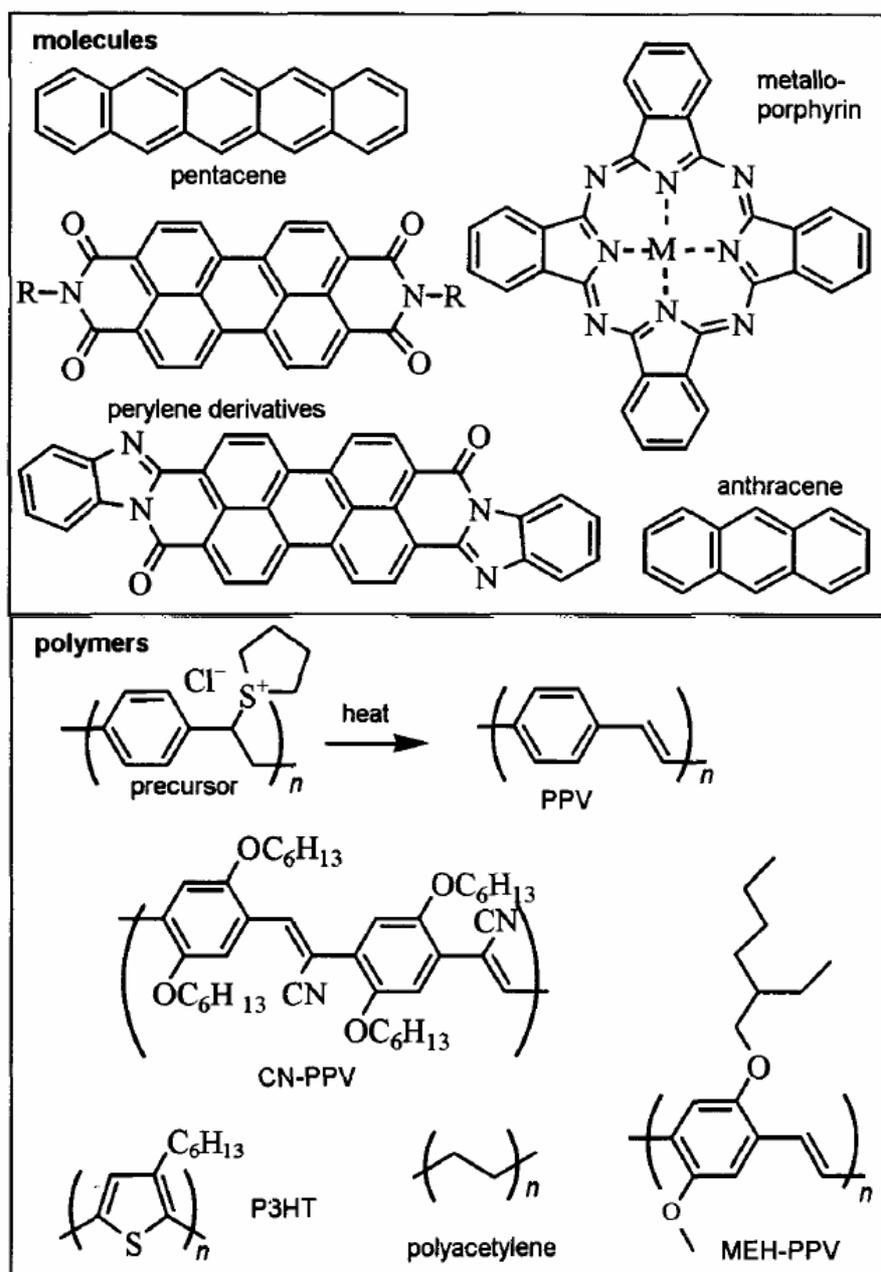


Figura 16. Estructuras químicas de varios semiconductores orgánicos. Se usan mucho los derivados del perileno como aceptores de electrones y capas transportadoras de cargas por xerografía. Las porfirinas pueden ser hechas con varios iones metálicos (M) en su centro. Normalmente encontramos magnesio, cobre y zinc.

Debido a sus propiedades, la extracción de los electrones solo es posible en grosores menores de 20 μm , aunque se ha intentado hacerla mas gruesa para evitar la transparencia y poder aumentar su captura de radiación lumínica. Esto es así debido a que en grosores mayores no se es posible energéticamente separar el par electrón-hueco.

- Técnicas de fabricación

Al tratarse de materiales poliméricos, se pueden fabricar en masa por las tecnologías actualmente utilizadas con estos materiales como la producción "roll to roll".

Una de las formas de fabricación consiste en sucesivas deposiciones de las distintas capas que lo forman. Se empieza poniendo el contraelectrodo transparente (ITO: oxido de estaño e indio por ejemplo) en el sustrato transparente (cristal, etc.), la capa o capas de semiconductor polimérico (por sublimación al vacío y/o por procesamiento de soluciones) y un electrodo de metal (por deposición al vacío).

Las técnicas de fabricación de células solares orgánicas son relativamente simples y pueden ser fácilmente aplicadas para grandes superficies y producciones a gran escala. Además, otras técnicas de recubrimiento por capa delgada normalmente usadas en la industria del plástico, como los procesos "roll to roll", pueden ser utilizadas para fabricar células solares orgánicas.

- Banda de absorción lumínica

Cada tipo de polímero tiene sus propias cualidades, por lo que es difícil agrupar y generalizar datos. Sin contar que continuamente se investigan y desarrollan nuevos compuestos.

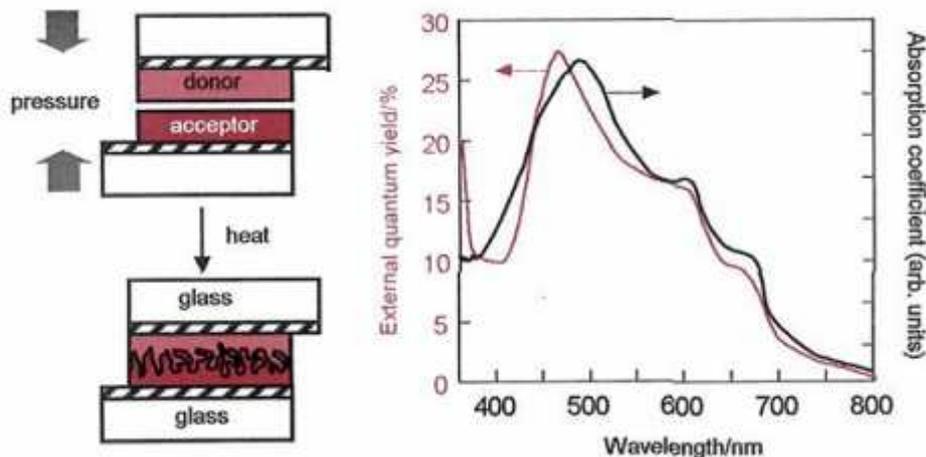


Figura 17. Representación esquemática de la técnica usada para fabricar una interfaz difusa de una célula fotovoltaica polimérica. El grafico muestra el espectro de acción de la fotocorriente de una célula fotovoltaica laminada; la fotocorriente imita el espectro de absorción.

Comportamiento espectral de distintos polímeros conductores:

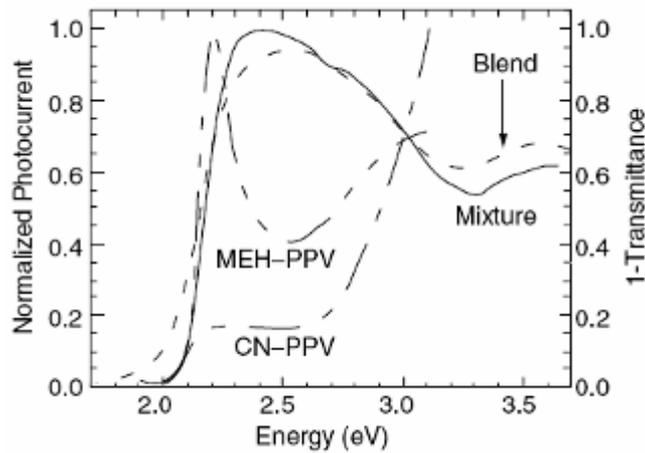


Figura 18. Respuesta espectral de la fotocorriente de cortocircuito de células fotovoltaicas orgánicas poliméricas basadas en MEH-PPV, CN-PPV y una mezcla a partes iguales en peso de ambas. El espectro de absorción de la mezcla se muestra para comparar.

- Eficiencia actual, previsible en un futuro y teórica

La empresa Solarmer, la cual se estudiará en el apartado 2.4.2, mostró un prototipo de célula solar orgánica con una eficiencia del 8%. Cifra muy alejada de los resultados obtenidos en laboratorios académicos.

Ejemplo de comportamiento de un polímero en función de la intensidad lumínica recibida:

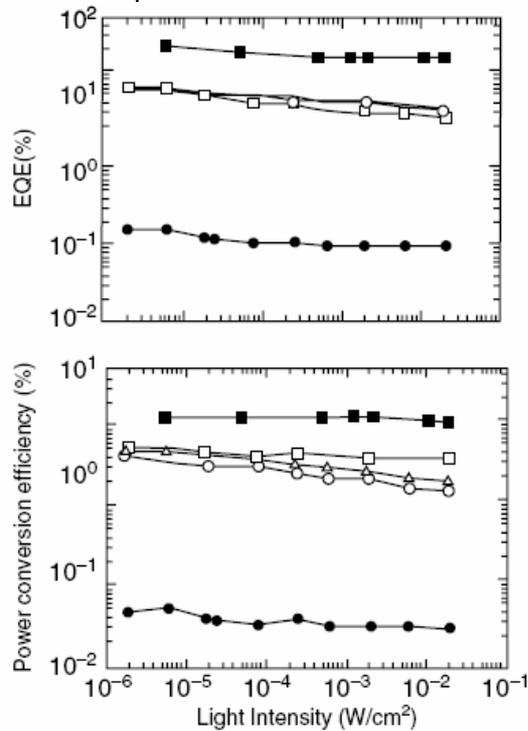


Figura 19. Dependencia de la intensidad lumínica del (a) EQE (eficiencia cuántica) y (b) eficiencia de conversión energética de dispositivos basados en el PCBM:MEH-PPV bajo una iluminación monocromática de 430 nm. Cuadrados sólidos: (1:4) MEH-PPV:[6,6]PCBM; cuadrados huecos: (1:1)MEH-PPV:[6,6]PCBM; círculos huecos: (1:1) MEH-PPV:[5,6]PCBM; triángulos: (3:1) MEH-

PPV:C₆₀; círculos sólidos: MEH-PPV. Todos los dispositivos tienen cátodos de calcio y ánodos de ITO.

Hay que tener en cuenta que el límite superior de la eficiencia de la conversión energética de las células solares que utilizan un solo absorbedor fue calculado por Shockley y Queissar en 1961 y tiene un valor de ~31%. Sin embargo, la mayor eficiencia de IPCE (Eficiencia de la conversión de Fotones Incidentes) del 14% se ha obtenido en un dispositivo de laboratorio con nanopartículas de una sola capa como capa activa.

Ejemplo de la eficiencia de conversión energética en función de la longitud de onda recibida por la célula solar:

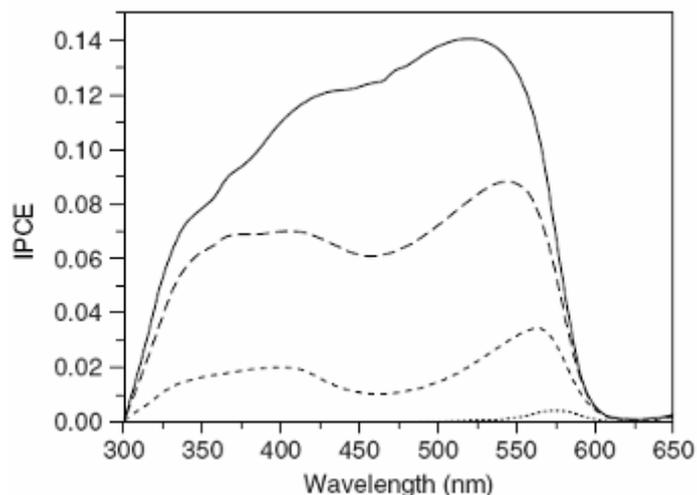


Figura 20. Respuesta espectral de la eficiencia energética de dispositivos de nanopartículas de M3EH-PPV y CN-éter-PPV con distinto número de capas: una (línea continua), dos (línea discontinua), tres (línea más discontinua) y ocho (línea punteada).

- Posibilidad de aplicaciones transparentes

Depende sobre todo del polímero utilizado, aun así la sección habitual de una célula solar orgánica es como sigue, siendo la capa orgánica de menos de una micra de grosor:

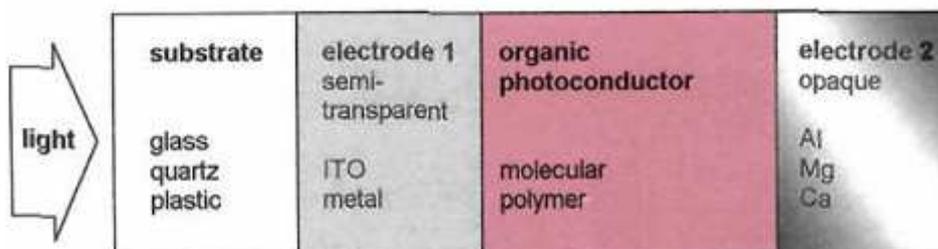


Figura 21. Corte esquemático de una célula fotovoltaica orgánica tipo sándwich. El grosor de la capa orgánica es típicamente de 0,01~1 μm.

Datos extraídos de libro de referencia³ de Sam-Shajing Sun y Niyazi Serdar Sariciftci.

1.4.8 Células solares sensibilizadas por colorante (DSSC)

A diferencia de una célula solar convencional tipo "p/n", el mecanismo de las DSSC no involucran un proceso de recombinación de cargas entre electrones y huecos porque solo se inyectan los electrones desde el fotosensibilizador al semiconductor y no se forma hueco en la banda de valencia del semiconductor. Muchos materiales semiconductores, incluidas formas mono y policristalinas de Si, GaAs, InP y CdS, han sido utilizados como fotoelectrodos. Estos materiales, usados con un electrolito redox apropiado, pueden producir la conversión de la luz solar en corriente con una eficiencia aproximada del 10%. Sin embargo, bajo radiación solar, suele ocurrir la fotocorrosión del electrodo en la solución del electrolito resultando en una célula poco estable. Materiales de óxido semiconductor tienen una buena estabilidad en la solución bajo radiación solar. Pero estos no pueden absorber luz visible porque tienen unas bandas de gap muy anchas.

- Material

Son células solares fotoelectroquímicas consistentes en un fotoelectrodo, un electrolito redox y un contraelectrodo. La sensibilización de grandes bandas de gap en materiales de óxido semiconductor como TiO_2 , ZnO y SnO_2 con fotosensibilizadores, como colorantes orgánicos, que pueden absorber luz visible han sido extensamente estudiados desde el desarrollo de la fotografía (s.XIX). En el proceso de sensibilización, los fotosensibilizadores absorbidos en la superficie del semiconductor absorben luz visible y los electrones excitados son inyectados en la banda de conducción de los electrodos semiconductores.

Además, los colorantes orgánicos que fueron usados tenían un estrecho rango de absorción de luz visible, lo que contribuía a un bajo rendimiento de la célula solar. Por lo tanto, para mejorar la eficiencia de la recolecta lumínica y el rendimiento de la célula, los investigadores han seguido dos enfoques:

-Desarrollar fotoelectrodos con una mayor área superficial que puedan absorber una gran cantidad de colorante.

-Sintetizar colorantes con un rango de absorción más amplio.

- Técnicas de fabricación

Pasos del proceso más habitual usado en la actualidad:

A) Preparación de los coloides de TiO_2 .

1. Precipitación por hidrólisis de alcóxidos de Ti usando HNO_3 0,1 M.
2. Peptización por calentamiento a $80^\circ C$ durante 8 horas, le sigue un filtrado.
3. Crecimiento hidrotérmico en autoclave a $200\sim 250^\circ C$ durante 12 horas.
4. Sonicación a través de un baño ultrasónico.
5. Concentración mediante un evaporador.

B) Preparación del electrodo de TiO_2 , hay dos métodos.

I. Técnica "doctor Blade":

Para incrementar la porosidad de la capa, se añade PEG como aglutinante a la solución del concentrado de coloides de TiO_2 . La mezcla se aplica en un sustrato de TCO y entonces es sinterizada al aire a $450^\circ C$ durante 30 minutos.

II. Serigrafía:

Los coloides de TiO_2 son separados del agua acidificada, lavados cuidadosamente, y entonces mezclados con EC como aglutinante y α -terpineol, dando lugar a una pasta de TiO_2 orgánico después de vaporarse el etanol. La pasta es impresa en un sustrato de TCO usando una máquina de serigrafía y luego sinterizada al aire a $500^\circ C$ durante una hora.

***Las capas de TiO_2 de 10~20 nm son transparentes.**

C) Fijación del colorante a la capa de TiO_2 .

Después de la preparación de las capas de TiO_2 , el colorante rojo fotosensibilizador N3 ($RuL_2(NCS)_2$) es adsorbido en la superficie del TiO_2 . Las capas son sumergidas en la solución del colorante seguido de su almacenamiento a temperatura ambiente durante 12~18 horas. Este tratamiento produce una intensa coloración de la capa. Antes del uso, la capa es lavada con alcohol o acetonitrilo para quitar el exceso de colorante no adsorbido dentro de la capa nanoporosa de TiO_2 .

D) Electrolito redox.

Se utilizan soluciones orgánicas con iones de yodo redox como electrolito redox.

E) Contra-electrodo.

Normalmente se ha utilizado platino espolvoreado en un sustrato TCO como contraelectrodo.

F) montaje de la célula y rendimiento de la misma.

Una capa contenedora, normalmente de polietileno de 15~30 μm de espesor, se coloca en el fotoelectrodo de TiO_2 recubierto de colorante y entonces la solución del electrolito se deposita en la superficie del electrodo de TiO_2 usando una pipeta. El contra-electrodo es colocado encima del electrodo de TiO_2 y entonces los dos son unidos con dos clips de unión. Si se utiliza un polímero con un punto de fusión bajo como el Surlyn es usado en vez de una capa contenedora, se puede fabricar una célula sellada después de la fabricación de la célula usando una resina para conseguir una estabilidad duradera.

- Banda de absorción lumínica

Cuanto mas pequeña sea la banda gap, mayor será la fotocorriente por la utilización de la región de longitud de onda larga del espectro solar.

Las células solares fotosensibilizadas con un compuesto de rutenio pueden convertir eficientemente la luz solar en corriente. El colorante rojo N3 ($\text{RuL}_2(\text{NCS})_2$) responde a luz de 400~800 nm, y el colorante negro ($\text{RuL}'(\text{NCS})_3$) responde a la región cercana al infrarrojo hasta los 950 nm. La eficiencia de la conversión a corriente del fotón incidente de las células solares sensibilizadas con colorante N3 alcanza el 80% a 550 nm y excede el 70% en la región de longitud de onda de 400~650 nm.

- Eficiencia actual, previsible en un futuro y teórica

La eficiencia interna de conversión del fotón en corriente alcanza más del 90% indicando el alto rendimiento de las células solares sensibilizadas por colorante.

Se ha alcanzado una eficiencia máxima del 10,4% (con un tamaño de la célula de $0,186 \text{ cm}^2$, $I_{\text{SC}} = 20,53 \text{ mAcm}^{-2}$, $V_{\text{OC}} = 0,721 \text{ V}$ y $\text{FF} = 0,704$) para AM1,5 en el laboratorio. Usa un compuesto de rutenio-terpiridina como fotosensibilizador para fotoelectrodos de TiO_2 nanocristalinos que absorbe en la región cercana al infrarrojo hasta los 900 nm.

La empresa Dyesol, vista en profundidad en el apartado 2.4.5, reportó una célula solar sensibilizada por colorante con una eficiencia del 13%.

Las células solares sensibilizadas por colorante basadas en un fotoelectrodo combinado de SnO_2/ZnO monocristalino y colorante N3 producen una célula de alta eficiencia con un rendimiento igual que la célula solar de TiO_2 : 8% η para 90 mWcm^{-2} y 15% η para 10 mWcm^{-2} . Se usó una capa combinada de partículas pequeñas de SnO_2 (15 nm) y de partículas grandes de ZnO (2 μm).

El diseño y desarrollo de de nuevos colorantes orgánicos con grandes coeficientes de absorción en la región cercana al infrarrojo son necesarios para mejorar el rendimiento de las células solares sensibilizadas por colorante.

La extensión de la sensibilidad espectral de la región de eficiencia de conversión de corriente del fotón incidente con colorante negro u otro nuevo fotosensibilizador desde

los típicos 500~600 nm hasta los 700~900 nm incrementarían la I_{SC} desde los 20 a los 28 mA/cm² resultando en una eficiencia general del 15%.

Además, se ha conseguido una estabilidad a larga duración satisfactoria en células selladas en tests de condiciones suaves (bajas temperaturas sin exposición a rayos UV). Será posible conseguir producir células solares sensibilizadas por colorante comerciales en un futuro cercano para aplicaciones de interior como para calculadoras y relojes. Para aplicaciones comerciales más amplias, sin embargo, hay varios problemas que solventar.

- **Posibilidad de aplicaciones transparentes**

Por sus propias características, este tipo de células solares son semitransparentes, por lo que en principio son consideradas como una buena opción para desarrollar ventanas fotovoltaicas.

Datos obtenidos de los libros de referencia de A. Luque¹.

2. Búsquedas

A continuación se detallan la procedencia de las fuentes utilizadas en cada caso:

2.1 Reviews:

Se buscó en el potente motor de búsquedas científico del "ISI Web of Science" mediante el acceso proporcionado por la UPCT, con las siguientes palabras clave:

- "transparent solar"
- "transparent photovoltaic"
- "dye sensitized" y refinar búsqueda con "solar"
- "dye sensitized" y refinar búsqueda con "transparent"
- "dye sensitized" y refinar búsqueda con "translucent"
- "solar cell" y refinar búsqueda con "transparent"
- "solar cell" y refinar búsqueda con "transparent"
- "photovoltaic" y refinar búsqueda con "transparent"
- "photovoltaic" y refinar búsqueda con "translucid"
- "translucent solar"
- "translucent photovoltaic"
- "photovoltaic window"
- "cell window"
- (transparent solar) y refinar búsqueda con "photovoltaic"

2.2 Artículos:

Nuevamente se buscó en el potente motor de búsquedas científico del ISI Web of Science desde los enlaces de la UPCT, con los siguientes términos:

- "transparent solar"
- "transparent photovoltaic"
- "translucent solar"
- "translucent photovoltaic"
- "photovoltaic window"
- "PV window"
- "cell window"
- "transparent dye sensitized"
- "translucent dye sensitized"
- "transparent organic solar"
- "Dye sensitized"
- DSSC
- BIPV
- "transparent organic"
- "spectral coverage"
- see-through solar cell

Comentarios:

La base de datos del proyecto se ha realizado sobre todo con material encontrado en artículos y las referencias que estos aportaban.

2.3 Patentes:

La web de la oficina europea de patentes (www.espacenet.com) ofrece a disposición de cualquier interesado toda su base de datos para investigar (a nivel mundial y en una gran variedad de idiomas) y buscar los términos que se necesiten. Aun así, hay que tener en cuenta los varios tipos de protección que ofrecen las patentes y las artimañas de las empresas para poder registrar sus productos o ideas sin levantar mucho la atención.

Por el gran movimiento empresarial y de creación de productos se intentó utilizar las herramientas de traducción directa de las webs china y japonesa de patentes, sin embargo los resultados obtenidos eran tan escuetos y de extraña traducción que se optó por descartar su uso en el proyecto.

Se utilizaron los mismos términos de búsqueda que los usados en artículos.

Comentarios:

Encontramos en las patentes más interesantes un factor común en sus autores, demostrando que siguen una línea de investigación similar a la planteada en este proyecto:

- CHAN I-MIN [TW]: US2009277500 (A1); US2009165849 (A1);
- KUO CHAO-HSIEN [TW]: US2010154881 (A1); US2009277500 (A1); US2009165849 (A1);

Algunas de sus patentes han sido respaldadas por la empresa que han iniciado para la comercialización de este novedoso producto: células solares de gran transparencia.

2.4. Soluciones comerciales

Las siguientes empresas fueron encontradas gracias a comentarios en algunas patentes y artículos que ponían sobre la pista de las mismas, otras mediante artículos científicos sobre novedades fotovoltaicas y algunas de ellas también mediante los artículos que habían presentado sobre sus investigaciones.

2.4.1 [“SolarWindow” de New Energy Technologies Inc.](#)

Ofrece una solución orgánica.

[Empresa](#)

New Energy Technologies, Inc. es una empresa americana centrada en la investigación, desarrollo y eventual comercialización de tecnologías emergentes de nueva generación de energía alternativa y renovable.

[Tecnología](#)

New Energy Technologies esta investigando y desarrollando la tecnología SolarWindow™, que permite crear ventanas transparentes capaces de generar electricidad mediante la aplicación en spray de un recubrimiento generador de electricidad en las superficies de cristal. Prescinde de los conectores metálicos y opacos utilizados para conectar las células. Estos son reemplazados por compuestos orgánicos translucidos que actúan como el contacto del polo negativo recolectando la electricidad producida.

La tecnología SolarWindow™ utiliza una matriz compuesta de series de veinte pequeñas células solares ultradelgadas del tamaño de menos de ¼ el tamaño de un grano de arroz con un espesor de 0,1 µm cada una.

[Descripción](#)

Las investigaciones actuales para desarrollar soluciones transparentes se basan en una modificación del poli(3,4-etilenodioxotiofeno): una solución del poli(estirenosulfonato) (PEDOT:PSS). La eficiencia de conversión de energía total es del 0,42% bajo la irradiancia de 1 sol. Se puede utilizar para producciones a gran escala, serigrafía, impresiones y para aplicaciones en spray de células solares sencillas orgánicas

Las células fotovoltaicas orgánicas semitransparente (OSPEC son sus siglas en ingles) es una novedad puesto que combinan tres características de las células fotovoltaicas orgánicas:

- Fácil fabricación en multitud de sustratos (incluido vidrio, plástico y papel).
- Usa polímeros naturales y no necesita procesos al vacío para su fabricación.
- Adaptable a la fabricación a gran escala de diversas formas.

Las OSPEC se comportas mejor que las células de silicio bajo luz ambiental y artificial, lo que ofrece nuevas oportunidades para aplicaciones de interior.

Prototipos

- Primer modelo:

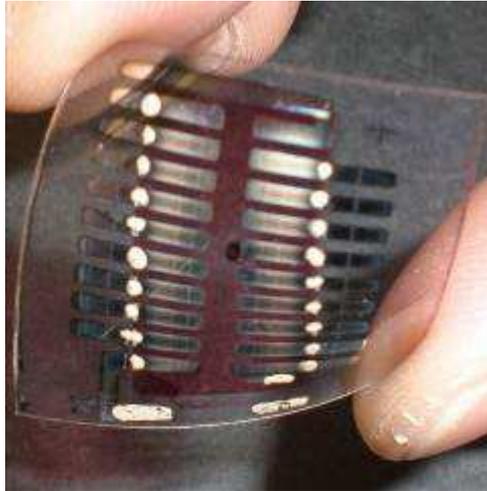


Figura 22. Prototipo antiguo de New Energy Technologies

- Ultimo modelo:

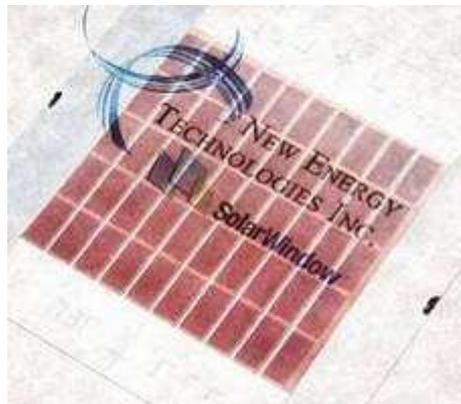


Figura 23. Prototipo actual: SolarWindow

- Futuro:

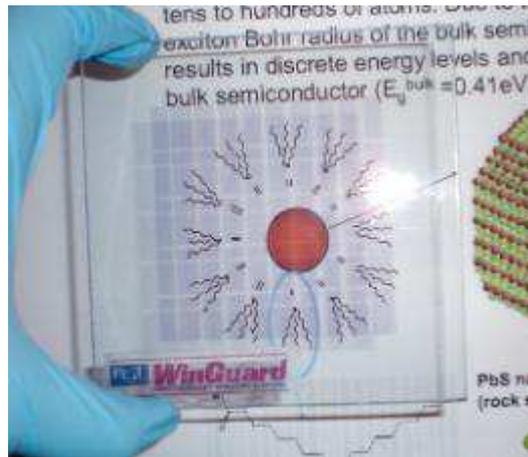


Figura 24. Último prototipo experimental del Dr. Xiaomei Jiang

Investigación de ventanas fotovoltaicas transparentes

La finalidad de “New Energy Technologies Inc” con SolarWindow es crear ventanas fotovoltaicas. Aunque todavía parecen que siguen con prototipos de laboratorio.

Tienen una interesante línea de investigación de un spray fotovoltaico, capaz de hacer superficie fotorreceptora a cualquier superficie que se le pulverice.

Características electrónicas

La eficiencia de conversión de energía total es del 0,42% bajo la irradiancia de 1 sol.

Prototipo

Cada cierto tiempo sus laboratorios y universidades colaboradores muestran una célula solar con mejores características y mayor transparencia.

Coste

SolarWindow todavía no está en disposición de vender sus soluciones.

2.4.2 Solarmer

Ofrece una solución orgánica.

Empresa

Solarmer Energy, Inc. es un desarrollador de paneles solares plásticos, flexibles y transparentes que generan energía limpia de bajo coste a partir de la radiación del sol. Inicialmente la compañía licenció un portafolio de tecnología desarrollada por la UCLA (La Universidad de California, Los Ángeles) y la Universidad de Chicago. La sede de Solarmer se encuentra en El Monte, California.

Tecnología

La tecnología de células solares plásticas transparentes de Solarmer combina la tecnología de materiales plásticos activos con tecnología de electrodos transparentes, dando lugar a células solares transparentes con una amplia opción de colores.

Solarmer definió un prototipo comercial con una eficiencia del 8% y con una vida de más de 3 años para una célula solar de 50 cm² a finales de 2009.

La tecnología de células solares plásticas reduce, principalmente, los costes de tres formas distintas:

1. El coste de la materia prima (plástico) es pequeño.
2. Ahorro en materiales (células fotovoltaicas extremadamente delgadas).
3. Bajo coste de fabricación (técnicas de impresión).

Descripción

Los paneles solares de Solarmer tienen el potencial de reducir el coste de la energía renovable a 0,12~0,15 \$/kWh y menos de 1 \$/W, lo que significa que los paneles solares plásticos serán la primera tecnología solar capaz de generar electricidad con costes similares a los de combustibles tradicionales.

Los módulos fotovoltaicos integrados en edificios (BIPV) son paneles solares usados en partes de los edificios como las ventanas, claraboyas, techos y muros. Estos paneles son usados para generar electricidad que ayude a suministrar energía al edificio durante el día cuando la demanda esta en su tope. Este sector es uno de los que tienen un mayor crecimiento en la industria solar. Las células solares plásticas de Solarmer son adaptables a aplicaciones integradas en edificios por su flexibilidad, fácil instalación, gran rendimiento con luz tenue o indirecta y su valor estético para arquitectos. La mayor ventaja es el bajo coste de la electricidad generada, un 20% del coste en las células solares tradicionales. La inclusión de esta tecnología en materiales de construcción durante la fabricación de los mismos, su poco peso y su flexibilidad reduce aun más los costes de instalación. Solarmer espera que los paneles solares plásticos para aplicaciones integradas en edificios estén disponibles para 2013.

Investigadores

Solarmer fue fundada en el 2006 para comercializar esta tecnología desarrollada por el profesor Yang Yang en el Instituto de Nanosistemas de California de la UCLA. La compañía ha licenciado esta tecnología de la UCLA y tecnologías desarrolladas por el profesor Luping Yu de la universidad de Chicago. Estos paneles solares plásticos, hechos de capas muy finas de plásticos y otros materiales, convierten la energía solar en electricidad de una manera muy eficiente y barata.

Yang Yang: <http://yylab.seas.ucla.edu/index.aspx>

Luping Yu: <http://lupingyu.uchicago.edu/>

Fotos

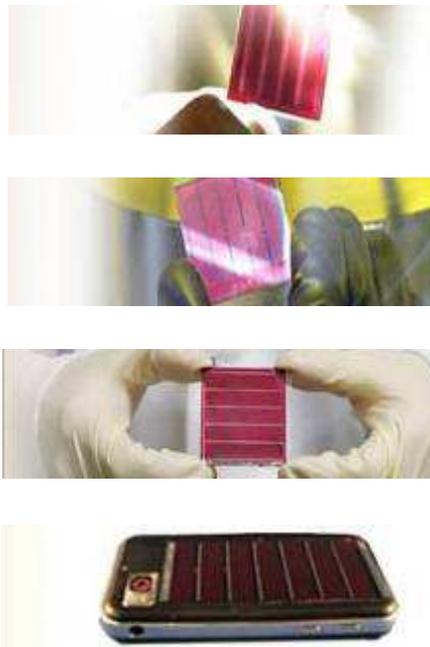


Figura 25. Ejemplos de la célula fotovoltaica de Solarmer y por ultimo una aplicación real (prototipo).

Investigación de ventanas fotovoltaicas transparentes

La empresa Solarmer está investigando la fabricación de módulos solares integrados en edificios (BIPV) que espera tener disponibles al mercado para 2013.

Características electrónicas

Solarmer mostró en 2010 un prototipo comercial con una eficiencia de 8,13 % para una célula solar de 50 cm².

Prototipo

Por ahora Solarmer solo ha mostrado pequeñas células semitransparentes (coloradas) del tamaño de la palma de la mano.

Coste

Los paneles solares de Solarmer tienen el potencial de reducir el coste de la energía renovable a 0,12~0,15 \$/kWh y menos de 1 \$/W. Siendo su mayor ventaja el bajo coste de la electricidad generada, un 20% del coste en las células solares tradicionales, poniéndolas a la par que con los combustibles fósiles

2.4.3 “WYSIPS” de Sunpartner

Ofrece una solución óptica.

Empresa

Sunpartner se creó en 2008 con el objetivo de innovar en la industria de la energía solar. Tiene dos compañías subsidiarias llamadas WYSIPS y AXIOSUN. WYSIPS son las siglas de “What You See Is Photovoltaic Surface”. WYSIPS va a lanzar una película fotovoltaica transparente. Esta tecnología permite integrar la energía solar en los más diversos equipamientos: pantallas, cristales, tejidos, velas, plásticos,... a los que convertirá en generadores de energía fotovoltaica.

Tecnología

El concepto fue desarrollado a partir de investigaciones en láminas lenticulares, que muestran diferentes imágenes dependiendo de la posición del observador. Basándose en principios ópticos, la tecnología de WYSIPS construye paneles solares en superficies sin cambiar su apariencia. Usando microlentes y dos imágenes planas entrelazadas, el observador ve cada imagen alternativamente dependiendo del ángulo de visión. Dependiendo de la posición del observador, el ojo ve dos imágenes diferentes, por lo que se crea un efecto óptico. Este proceso es llamado holograma y es la idea principal detrás de la tecnología de WYSIPS.

Descripción

La tecnología de WYSIPS hace un gran uso de la óptica:

Usa lentes lenticulares para concentrar luz en estrechas tiras de material fotovoltaico colocadas entre las tiras de imagen. Desde un ángulo se veía la imagen y desde otro el panel solar. Así es como WYSIPS consigue que las imágenes produzcan energía.

La tecnología de WYSIPS no altera la estructura de la superficie:

Ya que consiste en una capa lenticular transparente y flexible sobre la que han sido puestas tiras fotovoltaicas extremadamente finas (del tamaño de 1 micrón), por lo que se crea una película fotovoltaica flexible la cual, desde algunos ángulos, se vuelve transparente. Unido a la pantalla de un gadget, por ejemplo, la transforma en un generador solar sin alterar su definición o brillo.

Investigadores

Joël Gilbert (astrofísico e inventor de la tecnología WYSIPS) y Ludovic Deblois.

Prototipos

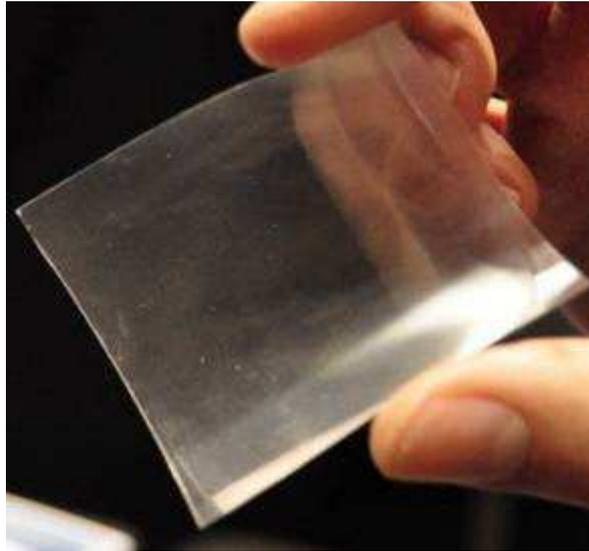


Figura 26. Lamina lenticular de WYSIPS.

“... La compañía asegura una eficiencia solar del 9% ...”



Figura 27. Prototipo de célula sobre la pantalla de un móvil. Detalle del voltaje generado.

“... dispositivo parcialmente desarmado con la mitad superior de la pantalla cubierta por la película fotovoltaica patentada de WYSIPS, la cual genera aproximadamente entre 1,2 y 2,5 voltios bajo la luz artificial...”



Figura 28. Detalle del oscurecimiento de la pantalla por la instalación de la película fotovoltaica.

Investigación de ventanas fotovoltaicas transparentes

WYSIPS es la subempresa de Sunpartner encargada del desarrollo y comercialización de las laminas fotovoltaicas transparentes (sin embargo oscurecen un poco la imagen). La empresa asegura que su tecnología se puede aplicar a cualquier superficie como ha demostrado en varias ferias tecnológicas donde llevó un prototipo de móvil con pantalla fotovoltaica.

En Agosto del 2011 presentó junto a Prismaflex una valla publicitaria autónoma.

Características electrónicas

Ante la falta de datos oficiales en su página hemos de utilizar los datos ofrecidos en ruedas de prensa donde WYSIPS comentó los siguientes datos:

Sus células tienen una eficiencia del 9%.

La pantalla fotovoltaica del móvil prototipo que tienen es capaz de generar 1,2~2,5 V.

Prototipo

En la feria tecnológica del CTIA (Cellular Telephone Industries Association) de 2011, WYSIPS se dio a conocer mostrando el prototipo de teléfono móvil con pantalla fotovoltaica.



Figura 29. La célula fotovoltaica de WYSIPS cubre la mitad superior de la pantalla.

Producto acabado

En verano del 2011, WYSIPS creó junto a Prismaflex una valla publicitaria autosuficiente, la cual instalaron en Francia.



Figura 30. Cartel publicitario autosuficiente en activo, se aprecia una superficie ligeramente mate por la capa fotovoltaica transparente.

WYSIPS asegura que sus láminas fotovoltaicas transparentes pueden aplicarse hasta superficies de 20 m².

Coste

No aparece ningún coste en la página de WYSIPS debido a que ofrecen sus soluciones como complemento para dispositivos de otras empresas.

2.4.4 “Power Plastic” de Konarka

Ofrece una solución orgánica.

Empresa

“Konarka Technologies” fue fundada en 2001 por un equipo de científicos de la Universidad de Massachusetts Lowell (UMass Lowell), dirigidos por el difunto Dr. Sukant Tripathy (científico de materiales internacionalmente conocido y también profesor en la UMass Lowell), el Dr. Alan Heeger (premio Nobel de química en el año 2000) y Howard Berke (presidente ejecutivo de Konarka).

En 2008 Konarka sacó al mercado “Power Plastic”. En 2009 abrieron una planta de fabricación a gran escala en New Bedford, Massachusetts y presentó 7 paneles estándar para aplicaciones de microelectrónica y de alimentación portátil y/o para lugares remotos.

Tecnología

Sus actuales investigaciones están explorando nuevos productos químicos para aplicaciones fotovoltaicas orgánicas, así como mejoras de su tecnología que produzcan más energía a precios más bajos. La compañía tiene alrededor de 350 patentes y solicitudes que cubren cada aspecto de los procesos y química implicada en su tecnología. La base de la tecnología de Konarka es un material polimérico fotoreactivo inventado por el cofundador de Konarka y ganador de un premio Nobel, el Dr. Alan Heeger. Este material propietario puede ser impreso o aplicado a bajo coste en sustratos flexibles usando fabricación “roll-to-roll” parecida a como los periódicos son impresos en largos rollos continuos de papel.

Descripción

Konarka fabrica “Power Plastic”, un panel solar orgánico, fino y flexible que otras empresas fabricantes incorporan en sus productos. La tecnología solar de Konarka es efectiva en situaciones de luz indirecta. La energía total recolectada por Power Plastic sobrepasa la de otros paneles solares y proporciona energía solar y libertad de diseño a arquitectos, fabricantes de vidrio y otros sectores relacionados con la construcción.

Al contrario que con el silicio y otras tecnologías solares similares, la energía conseguida por “Power Plastic” de Konarka puede provenir desde el amanecer hasta el ocaso, debido a la capacidad de las células orgánicas para trabajar con luz difusa.

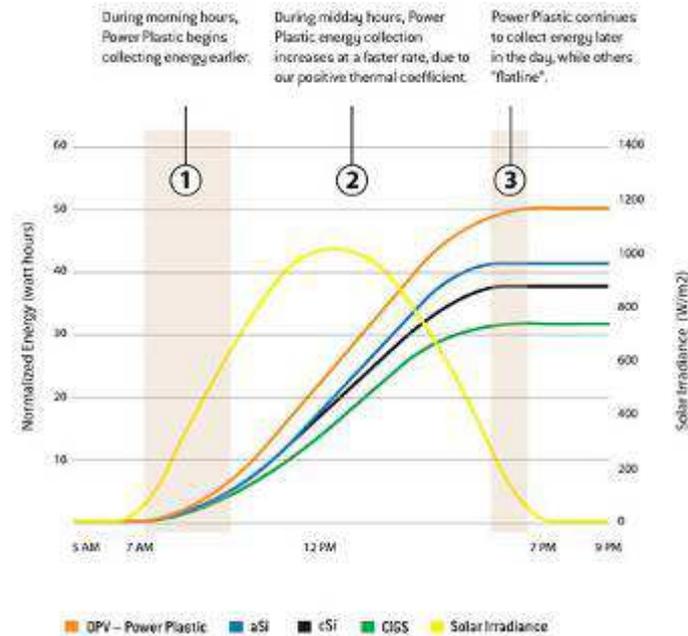


Figura 31. Comparación de la recolección solar de distintas tecnologías en función de la hora.

“Power Plastic” es fácil de incorporar a cualquier diseño y de instalar, características:

Espesor: 0,5 mm

Peso: menos de 1 kg por metro cuadrado

Propiedades mecánicas: enrollable, capaz de ser colgado y de envolver objetos

Condiciones externas de trabajo: a prueba de agua y funciona en un rango de temperaturas de -20~65 °C

Investigadores

Ph.D. Alan J. Heeger (científico jefe, cofundador y consejero de Konarka): Ganador del premio Nobel de química del año 2000, el Dr. Heeger y sus colegas de la Universidad de California, Santa Bárbara, han hecho investigaciones pioneras en el área de los semiconductores y polímeros metálicos. Su grupo de investigación se centra actualmente en problemas relacionados con la estructura electrónica fundamental de esta nueva clase de materiales y lleva a cabo estudios de diodos emisores de luz (LEDs), células electroquímicas emisoras de luz (LECs) y láseres todos ellos fabricados con polímeros (conjugados) semiconductores.

Ph.D. Sukant K. Tripathy (científico fundador, fallecido en 2000): Ha realizado importantes contribuciones en diversos temas como óptica linear de segundo orden, autoensamblaje molecular, diodos emisores de luz (LEDs), síntesis biocatalíticas y enzimáticas de nuevos polímeros, etc.

Ph.D. Srinivasan Balasubramanian (jefe de laboratorio de I+D y cofundador): Es responsable de la investigación, del proceso de desarrollo y del control de calidad de las células fotovoltaicas para aplicaciones de energía portátil. Tiene una gran experiencia en la síntesis y procesado de materiales poliméricos para aplicaciones relacionadas con la optoelectrónica.

PH.D. Kethinni Chittibabu (científico principal y cofundador): Ha desarrollado una técnica de sinterizado a baja temperatura, que ayuda a transferir células solares basadas en nanopartículas semiconductoras sensibilizadas con colorante a sustratos de polímeros flexibles. Actualmente esta desarrollando células solares tanto de estado sólido sensibilizadas con colorante como híbridas de materiales inorgánicos y poliméricos.

Fotos

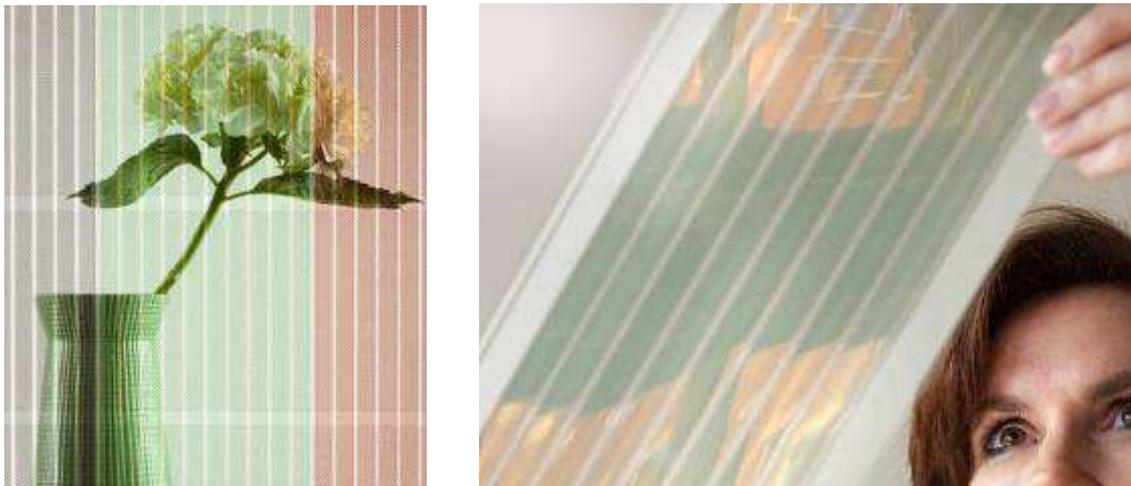


Figura 32. Demostración de la transparencia y flexibilidad de las células fotovoltaicas de Konarka.



Figura 33. Instalaciones con la solución de Konarka.

Investigación de ventanas fotovoltaicas transparentes

Konarka tiene una línea de productos transparentes multicolores que ofrece para ser integrados en edificios (BIPV) e incluso una gama mas ligera que se puede usar como lona para hacer sombra en espacios abiertos. Tienen soluciones muy claras pero con tonos de colores. Sus productos han sido ya utilizados en proyectos reales:

- Konarka probó su tecnología en una pared de 64 paneles en Florida:

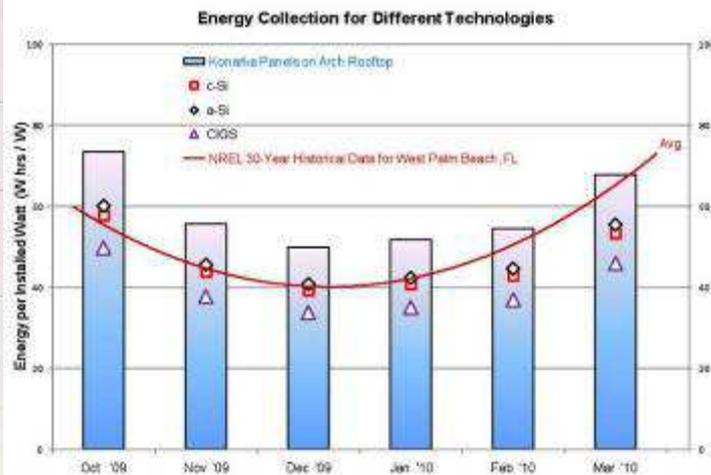


Figura 34. Instalación en la fachada de un edificio junto al estudio comparado de la energía producida por la misma instalación con otras tecnologías.

- Paradas de autobús de San Francisco



Figura 35. Fotos de una solución menos transparente puesto que se usa como punto de espera al aire libre.

- Aparcamiento en Florida



Figura 36. Solución de Konarka completamente opaca.

Características electrónicas

Tomadas del modelo de mayor tamaño de Konarka: la Power Plastic 40 Series

Outdoor Performance

Electrical Data		Units	1 Sun			1/2 Sun		
All 40 Series	V _{mpp}	V	15.8			15.2		
	V _{oc}	V	22.6			21.8		
I _{mpp} / I _{sc}		A	I _{mpp}	I _{sc}	Watts	I _{mpp}	I _{sc}	Watts
Power Plastic 540			0.8	1.0	12.4	0.4	0.5	6.0
Power Plastic 1040			1.6	1.9	24.7	0.8	1.0	12.0
Power Plastic 1140			1.7	2.1	27.2	0.9	1.1	13.2

Panel Dimensions

	length (mm)	width (mm)
Power Plastic 540	1,127	676
Power Plastic 1040	2,193	676
Power Plastic 1140	2,407	676

Temperature Range

Operating Temperature	-20°C to 65°C (-4°F to 149°F)
Storage Temperature	-40°C to 75°C (-40°F to 167°F)

Temperature Coefficients

P_{max}	+0.05%/°C (based on air temperature)
V_{mpp}	-0.27%/°C (based on air temperature)
V_{oc}	-0.21%/°C (based on air temperature)

Figura 37. Tablas con características electrónicas ofrecidas por el fabricante para un dispositivo en venta.

Producto en venta

Konarka vende sus células solares sensibilizadas por colorante en dos tamaños:

- Power Plastic 40 Series (16V):

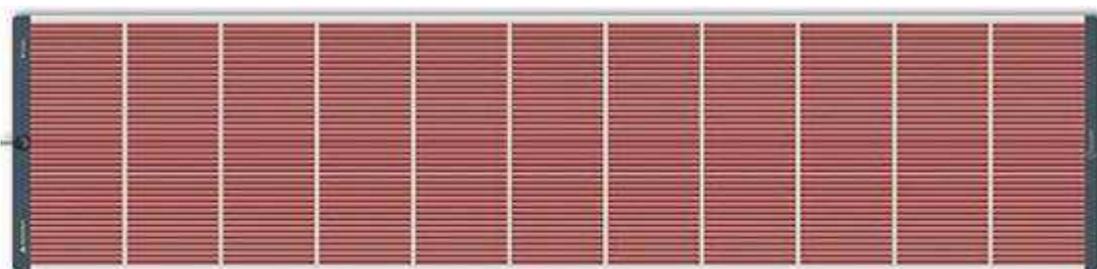


Figura 38. Célula solar Power Plastic 40 Series (16V): con 676 mm de ancho y 273~2,407 mm de largo.

- Power Plastic 20 Series (8V):

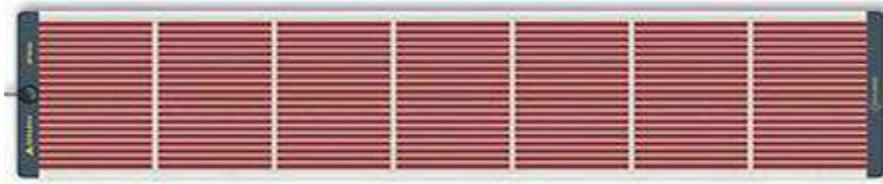


Figura 38. Célula solar Power Plastic 20 Series (8V): con 340 mm de ancho y 273~1,553 mm de largo.

Coste

Konarka no ofrece los precios de sus productos sino que prefiere que los posibles clientes se pongan en contacto con su departamento de ventas y distribución.

2.4.5 Dyesol

Ofrece una solución de colorante.

Empresa

Dyesol es una empresa australiana que fabrica y comercializa tecnología de células solares sensibilizadas por colorante.

Tecnología

Está basada en las células solares sensibilizadas por colorante. Estas células solares se componen de un electrolito, una capa de dióxido de titanio y colorante de rutenio intercalado entre laminas de vidrio. La luz incidente sobre el colorante excita los electrones que son absorbidos por el dióxido de titanio para dar a lugar a una corriente eléctrica. Comparada con la tecnología fotovoltaica convencional basada en el silicio, la tecnología de Dyesol tiene un menor coste y necesitan menos energía para fabricarla, produce electricidad mas eficientemente incluso en condiciones de poca luz y puede ser incorporado directamente en edificios remplazando paneles de vidrio convencionales en vez de tener que ocupar el tejado o un área de terreno extra. En 2008 Dyesol presentó una célula con un pico de eficiencia de mas del 11% en conversión eléctrica de la luz solar; unas células multicoloreadas, robustas y flexibles para aplicaciones de camuflaje y seguridad; y una aplicación practica de las células solares de colorante en una línea de recubrimiento de bobinas de acero.

Descripción

Dyesol desarrolla dispositivos para aplicaciones fotovoltaicas de todo rango usando sustratos de vidrio, metal, cerámico o plástico. El rango de diseño abarca desde aplicaciones electrónicas de consumo hasta productos para construcción diseñados con una vida útil de 25 años.

Se detallan a continuación dos de los diseños ofrecidos por la compañía:

“Dyesol Series Interconnect Glass Module” está diseñado para aplicaciones en las que se requiere una mayor vida útil. Este producto está diseñado para ser colocado en monturas expuestas y para formar la fachada de edificios (BIPV). El cableado eléctrico suele ser con un bus pequeño de corriente continua hacia una red para su distribución o a un inversor de alterna.



Figura 39. Ejemplo de solución BIPV de Dyesol.

El grupo de productos “Surevolt” mantienen el voltaje en todos los niveles de luz y tienen una gran resistencia a los daños por impacto, flexión, tensión, torsión y compresión. Sus características permiten su uso tanto en electrónica de consumo como para aplicaciones militares.



Figura 40. Ejemplo de solución para aplicaciones móviles a la intemperie.

[Investigadores](#)

El Dr. Hans Desilvestro (jefe del grupo de científicos de Dyesol) es experto en el campo de la fotoelectroquímica y las células solares sensibilizadas por colorante. Además tiene más de 25 años de experiencia en investigación y desarrollo y en administración técnica en la industria de la tecnología de baterías.

Fotos

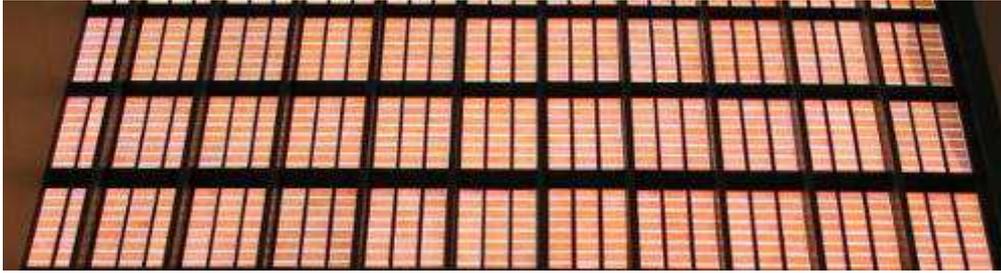


Figura 41. células solares básicas producidas por Dyesol, detalle de la transmisibilidad.

Investigación de ventanas fotovoltaicas transparentes

Dyesol tiene una línea de productos fotovoltaicos para su integración en edificios (BIPV) pero no parecen buscar en ningún momento la transparencia del producto final.

Características electrónicas

En 2008 Dyesol presentó una célula solar sensibilizada por colorante con un pico de eficiencia de más del 11% en conversión eléctrica de la luz solar.

Producto en venta

Dyesol tiene a la venta los componentes que forman sus células solares, además de material y equipamiento necesario para aplicaciones de laboratorio y prototipado. En su catalogo podemos encontrar una gran variedad de sustratos, líquidos de relleno de la célula solar, colorantes sensibilizadores, ligandos, aditivos para los colorantes, electrolitos y componentes de los mismos o selladores.

Coste

No se puede encontrar precios de sus artículos ni en la tienda virtual ni en el catalogo online ya que prefieren que el posible comprador se ponga en contacto con el departamento de ventas y distribución para acordar la cantidad a pagar.

2.4.6 [G24 Innovations](#)

Ofrece una solución de colorante.

[Empresa](#)

G24i produce células solares sensibilizadas por colorante sobre sustrato flexible en sus instalaciones de Cardiff, Wales (Reino Unido).

[Tecnología](#)

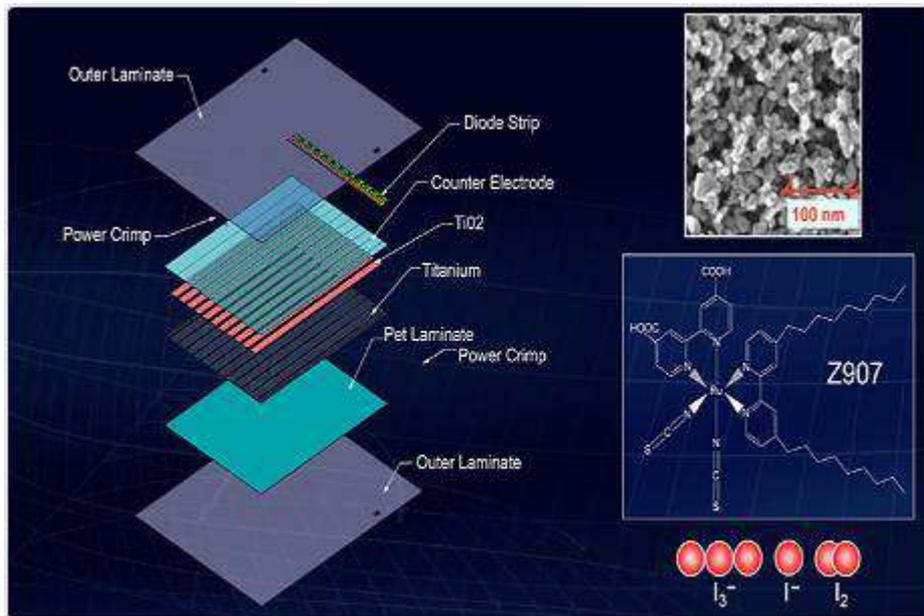


Figura 43. Estructura interna de las células solares producidas por G24i:

[Descripción](#)

Especificaciones del producto:

Longitud: 254 mm incluyendo la montura / 187 mm de área activa
Anchura: 200 mm incluyendo la montura / 140 mm de área activa
Grosor: 1,8 mm
Peso: 50 g incluyendo montura y diodos
Tª operación: 10~50°C
Tª límites: -10~55°C

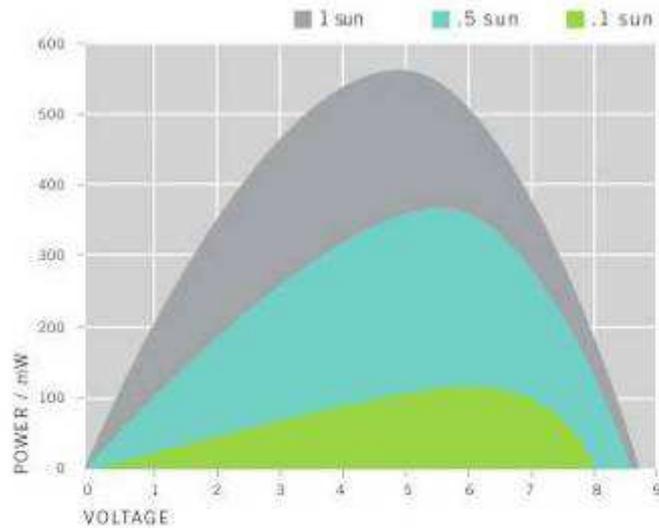


Figura 44. Grafica del rendimiento típico de la célula de G24i en exteriores.

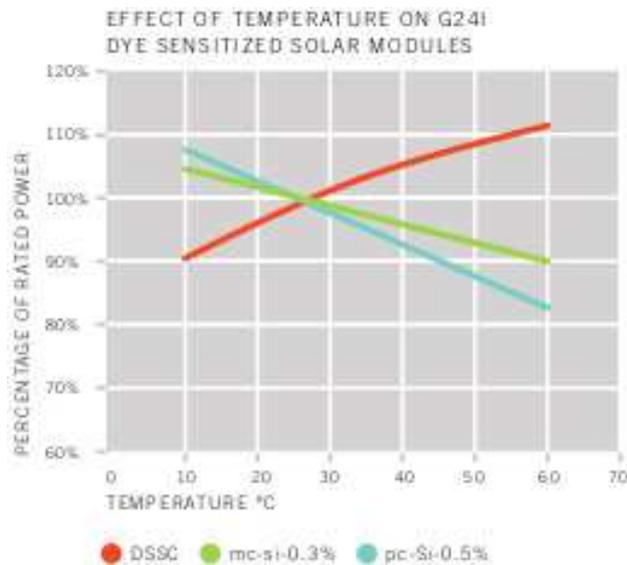


Figura 45. Comparación del comportamiento de distintas células en función de la temperatura ambiente. Rojo: DSSC. Verde: mc-Si. Azul: μ c-Si.

Investigadores

- John Meschter, director de desarrollo técnico.
- Ray Zagars, director de ingeniería y fabricación.
- Alan J. Montmello, consejero técnico de G24i/jefe de oficina técnica y capital renovable.

Productos

Fabricación de las células:



Figura 46. Demostración de producción de la célula solar por procesos roll-to-roll.

Células terminadas:



Figura 47. Ejemplo de flexibilidad de las células solares de G24i.

Productos en venta:



Figura 48. Cargador solar de dispositivos móviles y mochila con cargador solar.

Investigación de ventanas fotovoltaicas transparentes

La empresa no busca la transparencia en pos de ventanas fotovoltaicas, ya que lo que quiere es la mayor eficiencia posible. Por este motivo hace las laminas de célula solar lo mas opacas posible. G24 innovations no tiene ningún producto ni investiga en la actualidad la forma de obtener ventanas fotovoltaicas transparentes.

Características electrónicas

La empresa no ofrece estos datos completos, tan solo da una pequeñísima muestra de estas características en la **Figura 44** donde podemos ver un máximo de potencia en 550 mW a los 5 V.

Productos en venta

En su tienda online se puede encontrar productos con la tecnología de G24i a la venta actualmente. Se trata de una línea de productos básicos con los que empezar a generar ingresos a la empresa. Sus productos más destacables son cargadores y mochilas solares con los que alimentar los dispositivos electrónicos portátiles que queramos. En la tienda virtual no podemos encontrar a la venta las láminas fotovoltaicas que producen.

Coste

El cargador tiene un precio de 35 \$ y las mochilas de 100~150\$.

2.4.7 “Sphelar” de Kyosemi Corporation

Ofrece una solución óptica basada en el silicio.

Empresa

Desde su fundación en 1980 en Japón, la corporación Kyosemi ha estado trabajando como una compañía orientada hacia la investigación y desarrollo que apoya el progreso de industria innovadora con su tecnología optoelectrónica. Actualmente, su negocio se mueve entorno al campo de los dispositivos opto-semiconductores y la generación de energía solar.

Tecnología

Sphelar® es el nombre bajo el que se comercializa la célula solar esférica producida por la corporación Kyosemi. A diferencia de las células solares convencionales Sphelar® tiene forma esférica, lo que le hace capaz de generar electricidad con mayor eficiencia y flexibilidad para un mayor numero de aplicaciones. Esta pequeña célula solar, que mide tan solo 1,8 mm de diámetro, tiene un gran potencial para todo tipo de aplicaciones.

Proceso de producción de las células solares Sphelar®:

1. Se deja gotear silicio fundido desde una altura de 14 m
2. La tensión superficial hace que se formen gotas redondas.
3. Durante la caída de 1,5 segundos cristalizan las gotas sin perturbaciones
4. Se obtienen varios miles de esferas monocristalinas por segundo

Microgravity – a key factor behind spherical solar cells.

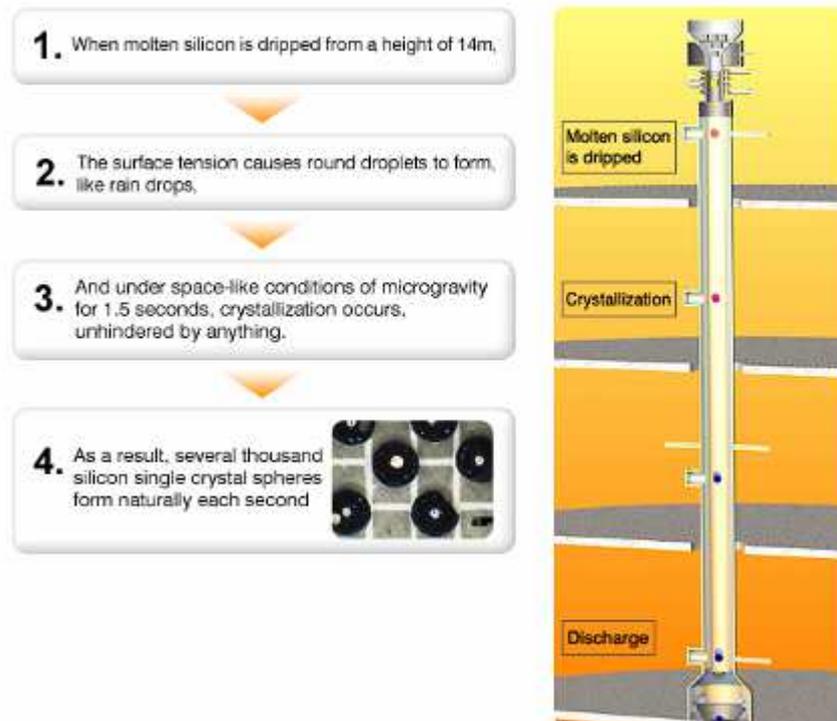


Figura 49. Proceso de producción de Sphelar.

Descripción

· La superficie esférica fotorreceptora permite recolectar luz de todo tipo. Al contrario que con las células solares planas que han de cambiar la orientación para recibir eficientemente la radiación solar (perpendicular a la superficie), Sphelar® captura luz desde todas las direcciones, lo que significa que puede absorber luz reflejada y difusa. Además, no tiene ninguna necesidad de seguir al sol. Las superficies esféricas fotorreceptoras consiguen altas eficiencias de generación.

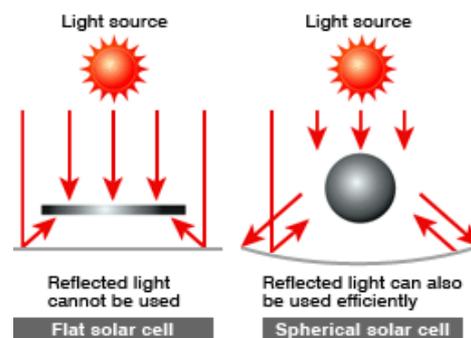


Figura 50. Comparación de la diferencia de recepción de la radiación incidente entre una célula normal y Sphelar.

Células solares transparentes: desarrollo actual y aplicaciones

· Permite diversas aplicaciones en función del uso y del sitio de aplicación..Con un diámetro de tan solo 1~1,5 mm, Sphelar puede ser conectada tanto en paralelo como en serie. Esto permite crear diversos productos esféricos, como células solares con forma de cúpula y células solares “flexibles” con sustratos de capa fina y blanda. Sphelar es perfecto para situaciones donde la instalación de células solares planas convencionales bloquearían el campo de visión. También es posible crear ventanas fotovoltaicas manteniendo cierto nivel de transparencia.



Figura 51. Ejemplos de soluciones con Sphelar.

· Utilización eficiente de materias primas – reduciendo la carga ambiental. Las células solares convencionales son producidas cortando lingotes e silicio cristalino, generando una gran cantidad de “perdidas de Kerf” en el proceso de producción. Sin embargo, Sphelar es producido usando un proceso único donde se deja caer silicio fundido una altura determinada, formándose esferas naturalmente por las condiciones de microgravedad de la caída. Por lo que apenas se desperdicia materia prima. Esto conlleva en una gran reducción de costes y ayuda a asegurar un uso eficiente del silicio (un recurso finito).

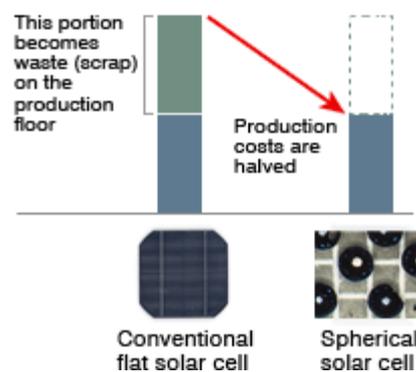


Figura 52. Comparación de costes de producción de células de Si convencionales y Sphelar.

Productos

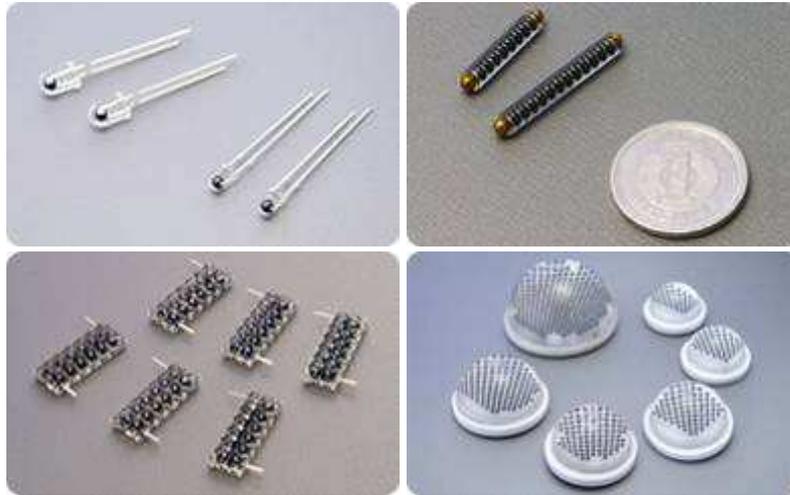


Figura 53. Sphelar® One, Sphelar® Cylinder, Sphelar® Array F12 y Sphelar® Dome/Mini Dome.

Lamina:

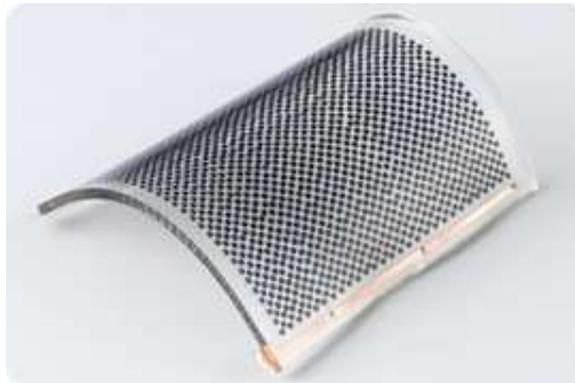


Figura 54. Prototipo de superficie cubierta de Sphelar.

Investigación de ventanas fotovoltaicas transparentes

Al ser de pequeño tamaño la unidad de esta tecnología, la propia empresa ha pensado en desarrollar ventanas fotovoltaicas aclarando que nunca conseguirán la transparencia de un cristal ya que son inevitables las esferitas características de esta solución. Lo que deja un producto a “lunares”.

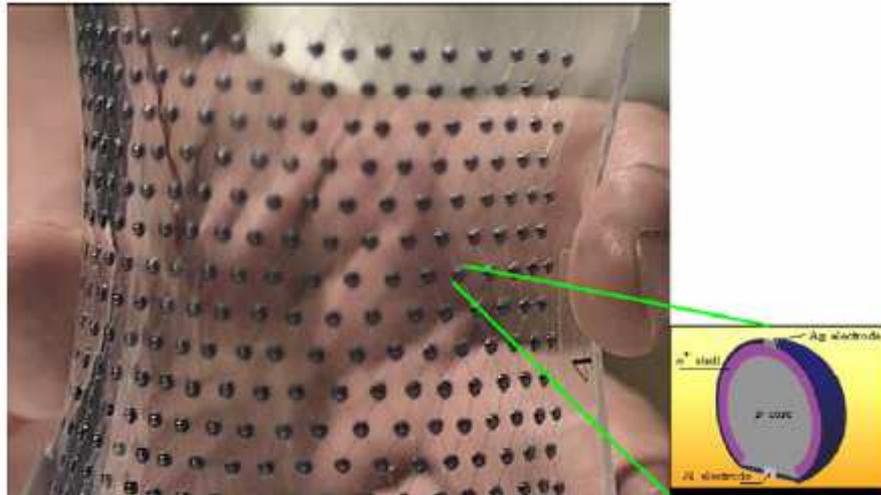


Figura 55. Ejemplo de modulo laminar de Sphelar transparente y flexible. Detalle de una célula individual.

Características electrónicas

Grafica de eficiencias:

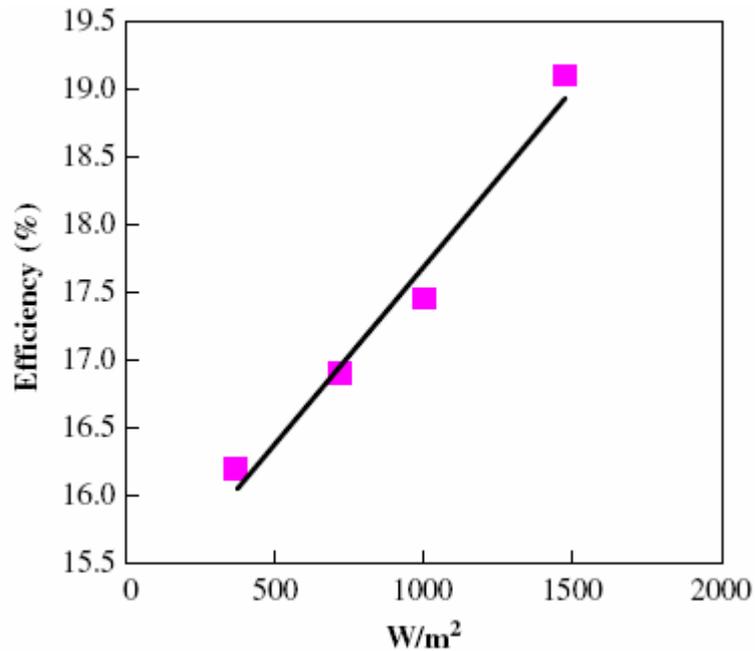


Figura 56. Curva de eficiencias que muestra una dependencia lineal con la intensidad lumínica.

La unidad de producto más sencilla es el Sphelar® One ya que cuenta con solo una esfera y estas son sus características:



Figura 57. Detalle de Sphelar One.

Potencia máxima:	0,66 mW
Voltaje máximo:	0,484 V
Corriente máxima:	1,38 mA
Dimensiones:	\varnothing 5 x 7,5 mm
Masa:	0,20 g
Carcasa:	\varnothing 5 mm (molde de plástico)

Su producto actual con más unidades fotorreceptoras es el Sphelar® Dome:



Figura 58. Sphelar Dome.

Potencia máxima:	940 mW
Voltaje máximo:	9,4 V
Corriente máxima:	100 mA
Dimensiones:	\varnothing 155 x 52 mm
Masa:	~500 g
Carcasa:	Resina de policarbonato

Estado del producto

Tienen prototipos funcionales con los que han hecho las pruebas de laboratorio. Además, en su pagina anuncian que parte de su catalogo ha pasado del estado experimental al de desarrollo, pudiendo encargar el dispositivo deseado en las oficinas distribuidoras.

Comercialización

No dan datos del coste del producto, ya que prefieren que el posible comprador se ponga en contacto con las oficinas de distribución y ventas de la empresa.

3. Estado del arte

A continuación se recopilarán las soluciones encontradas durante la realización del proyecto para la creación de módulos fotovoltaicos transparentes.

3.1 Soluciones ópticas

El método más “sencillo” de conseguir transparencia en las células solares habituales es dejando zonas en los módulos que pueda atravesar la luz. De esta forma se consigue una solución a medio camino ya que se obtiene un producto con tiras o puntos opacos (las células fotovoltaicas) sobre un sustrato transparente. Teniendo prácticamente las propiedades de las células solares habituales en las superficies fotovoltaicas. Tan solo tienen una densidad de espacio menor.

3.1.1 Huecos:

Esta fue la primera solución en salir al mercado y ya tiene cierta experiencia en instalaciones de uso habitual. La idea más básica es hacer agujeros redondos en el material fotovoltaico, como podemos ver en la patente US2010330733A1:

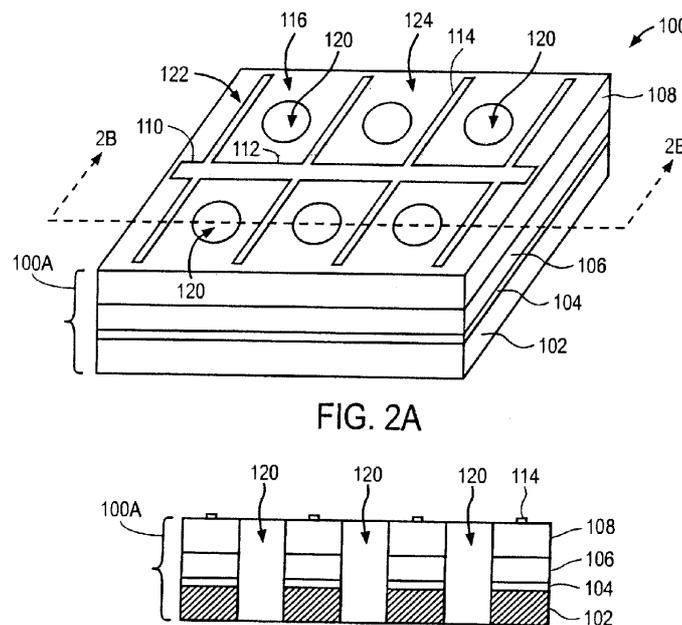


Figura 59. Detalle de los orificios propuestos en la célula en dos vistas distintas.

Son células fotovoltaicas basadas en semiconductores (Grupos IB, IIIA y VIA: $\text{Cu}(\text{In,Ga,Al})(\text{S,Se,T})_2$), sobre sustrato flexible y transparente, a la que se les ha practicado agujeros de 100~200 μm de diámetro (de dimensiones similares al grosor de la célula). Según la cantidad de agujeros realizada, según el autor la transparencia puede variar entre el 10 y el 70%. Habrá que tener en cuenta que conforme tiene más orificios la célula menor es su superficie fotovoltaica, bajando la producción energética y mayor es su fragilidad (aconseja no superar el 25% de transparencia).

Células solares transparentes: desarrollo actual y aplicaciones

En la patente US2010193022A1, centrada en la fabricación de células transparentes de silicio amorfo, obtenemos una mejor idea de este tipo de células agujereadas:

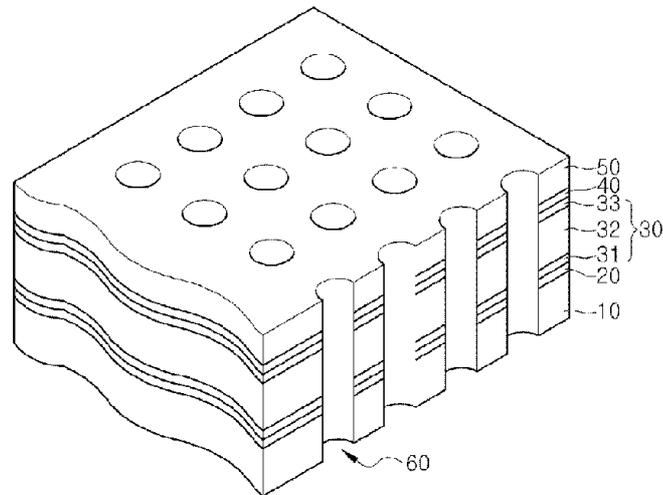


Figura 60. Corte transversal de célula solar agujereada.

En la misma patente avanzan en la idea de los huecos creando carriles enteros sin célula fotovoltaica (sugieren retirar el material fotovoltaico por ataque al material) aumentando con ello la transparencia:

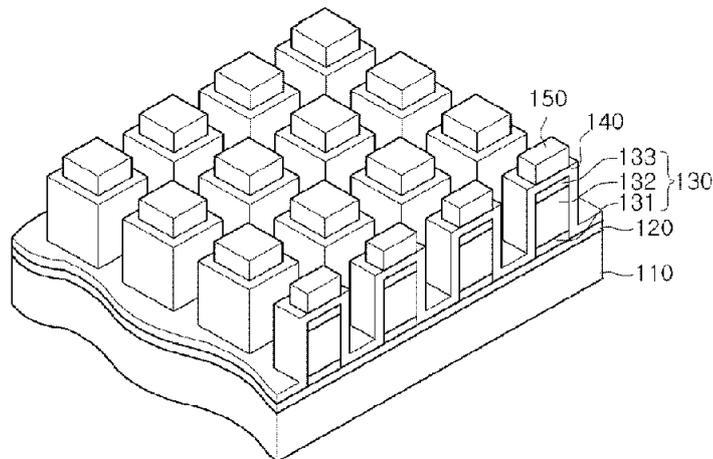


Figura 61. Detalle de los cubos fotovoltaicos dejados por los canales transparentes

Aseguran que este diseño mejora la eficiencia al poder recibir la radiación solar por los lados también.

Hay mas patentes que recogen ideas similares a estas, la US2009151783A1 propone hacer dibujos quitando material mediante un láser:

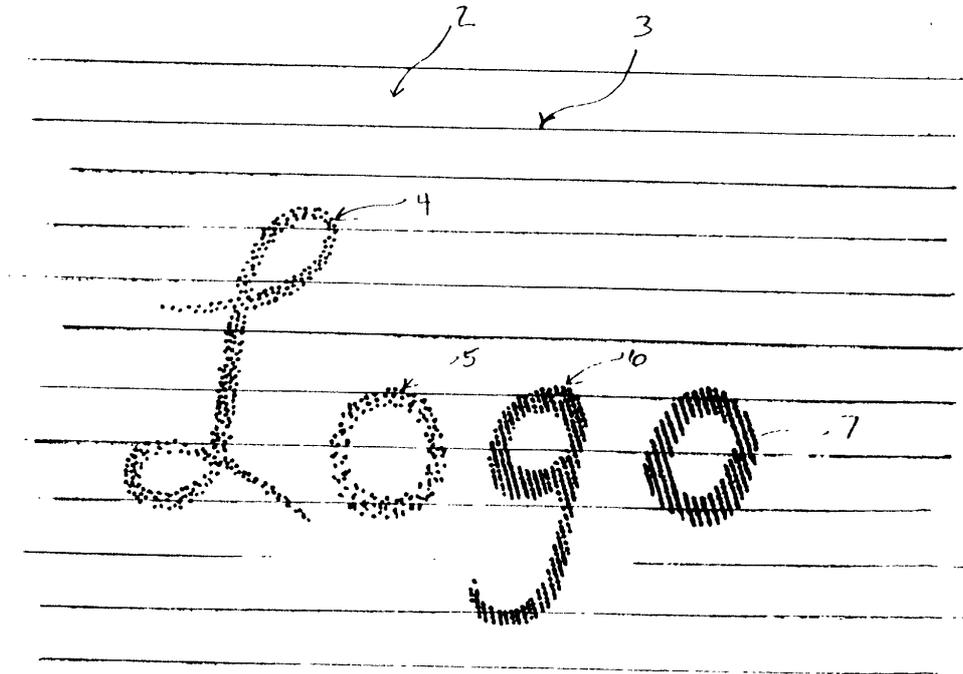


Figura 62. Detalle de dibujo con distintos patrones de perforaciones en una célula solar.

Se han realizado estudios⁴ también para determinar la mejor geometría del agujero a realizar en las células. Llegando a la conclusión de que los huecos hexagonales son los que ofrecen un mejor resultado dado el mosaico que forman juntos.

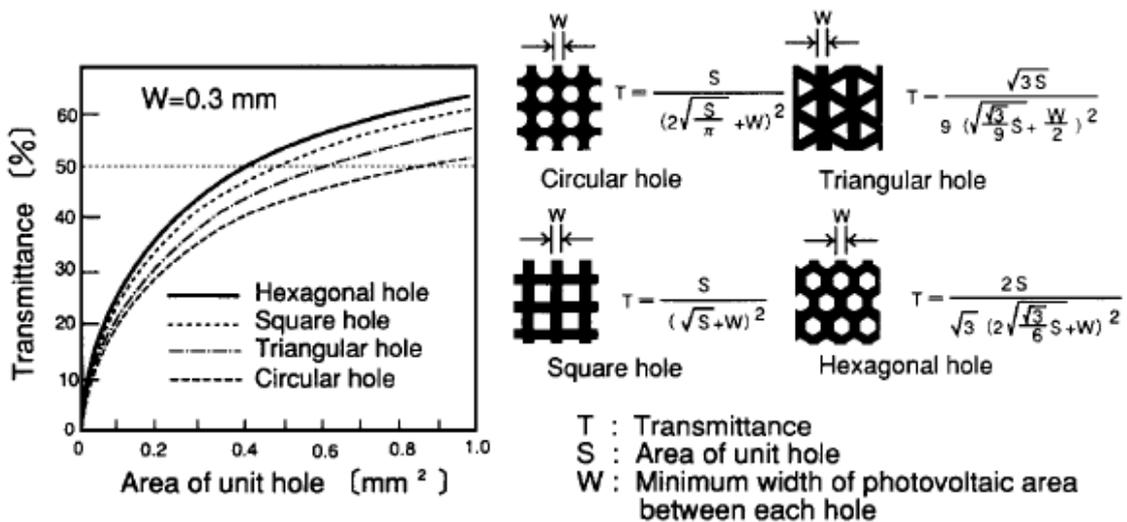


Figura 63. Relación entre la transmitancia de la célula y el área de cada tipo de agujero

El estudio llega a comparar la eficiencia de su propuesta de huecos hexagonales con una célula solar translúcida convencional.

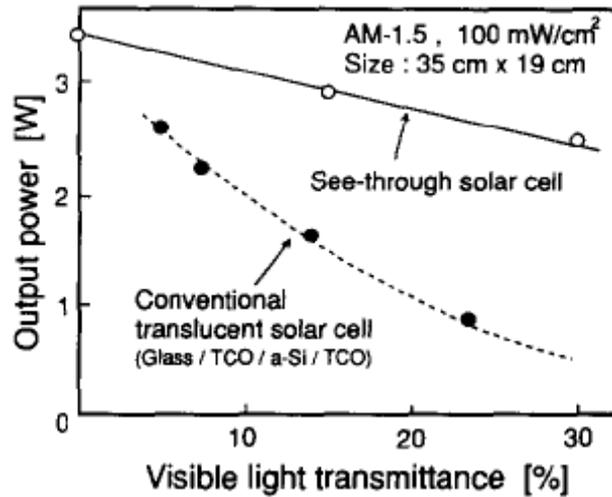


Figura 64. Relación entre la energía producida y la transmitancia de luz visible de la célula solar con huecos hexagonales y una célula solar normal.

En la patente GB2472608A encontramos otra forma de conseguir la transparencia mediante agujeros. En este caso proponen crear la célula solar por capas a las que se realizan los agujeros por separado. Una vez colocadas todas las capas algunos agujeros coincidirán dejando pasar la luz por lo que según la densidad de agujeros de cada una de las capas se conseguirá una mayor probabilidad de alineación de los agujeros y con ello aumentar la transparencia del producto resultante:

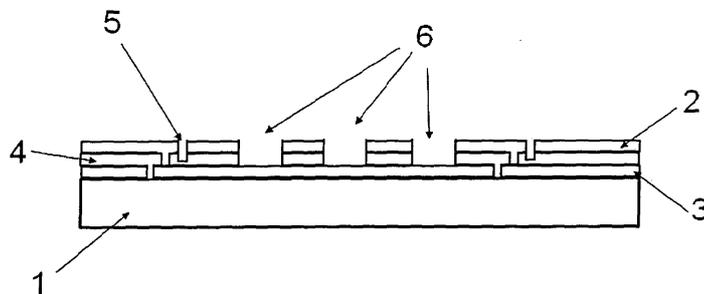


Figura 65. Detalle de una célula solar fabricada por láminas cada una perforada por separado.

Los agujeros propuestos son de 0,1 mm de diámetro y son creados mediante el goteo de materiales corrosivos sobre cada una de las capas que componen la célula. La transparencia conseguida según el autor se encuentra comprendida entre el 20 y el 90%. Tienen otra patente en la que optan por láseres para crear los huecos: WO2009098459A1.

La patente US2010068849A1 (basada en US4795500A aunque esta usa litografía para hacer los agujeros) también propone un sistema similar a esta último aunque prefiere usar láser para crear los distintos agujeros:

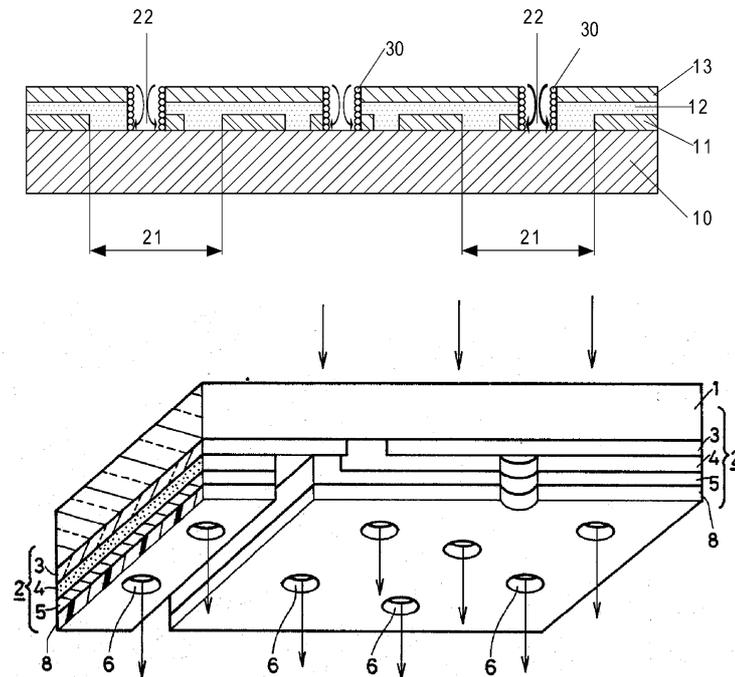


Figura 66. Distintas vistas de agujeros en una célula solar laminar.

Una idea más sencilla y menos costosa es quitar solamente los elementos más opacos que son el sustrato y el contraelectrodo en algunas zonas que permitan cierto paso de luz. Es de suponer que se alcanzara una transparencia menor.

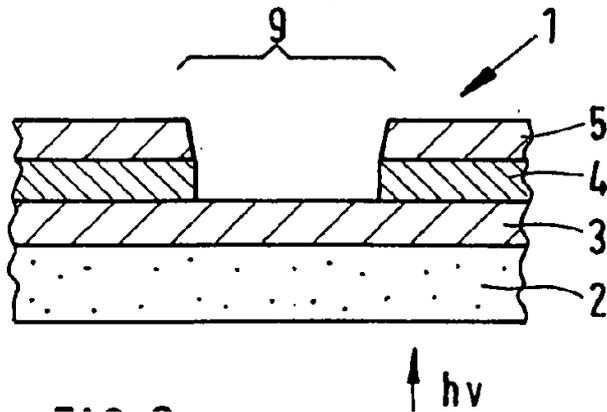


Figura 67. Detalle de la eliminación de parte del sustrato de una célula solar convencional.

Ejemplo de esta solución es la patente:

- US2009162968A1: usa un líquido corrosivo para retirar el material.
- AU2007200403A1: usa láser para quitar, y posiblemente dibujar, el material.

- US2006205184A1 y US2002119592A1: usa láser para quitar, y posiblemente dibujar, el material. Detalle:

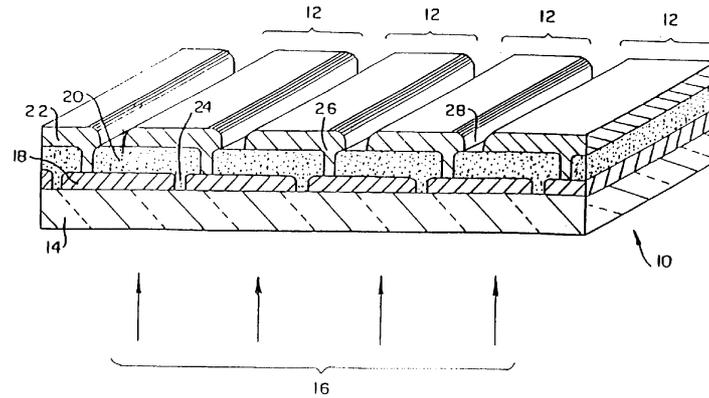


Figura 68. Detalle de sustrato eliminado por láser.

Una forma mas compleja de obtener transparencia mediante aperturas en la célula la podemos encontrar en el artículo⁵ que trata de las células solares transparentes POWER (POLYcrystalline silicon Wafer Engineering Result) de la empresa "Sunways AG". En el mismo se propone la creación de los agujeros en la célula fotovoltaica de silicio (tanto mono como multicristalina) mediante unos surcos triangulares realizados en ambas caras del material y perpendiculares entre si. Estos surcos se realizan mediante abrasión mecánica.

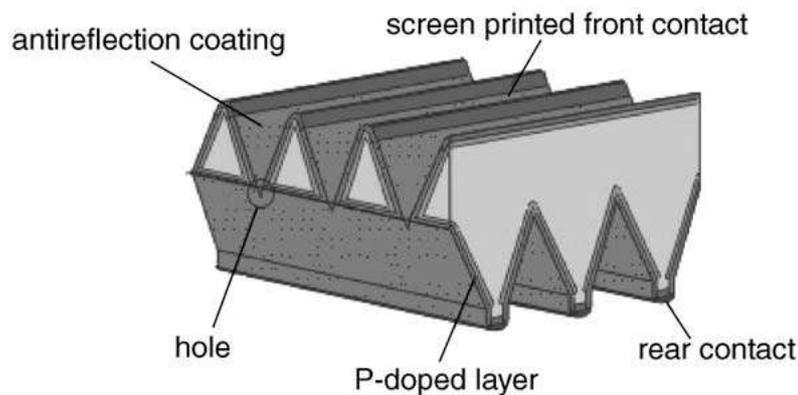


Figura 69. Vista de los cortes geométricos realizados en la célula solar.

Células solares transparentes: desarrollo actual y aplicaciones

La eficiencia que obtienen en las células es de 8~10% ($V_{oc} \approx 560\text{mV}$, $I_{sc} \approx 2,8\text{A}$ y $FF=60\%$). Las células solares obtenidas ahorran un 50% de silicio comparado con las células fotovoltaicas convencionales. En el artículo ponen a modo de curiosidad que hacen falta más de 20.000 huecos para conseguir una transparencia del 10%.



Figura 70. Ejemplo de instalación de los paneles fotovoltaicos POWER en una cafetería de Alemania.

Sin embargo la empresa Sunways no tiene a la venta esta propuesta sino que comercializa una solución transparente que usa huecos cuadrados:

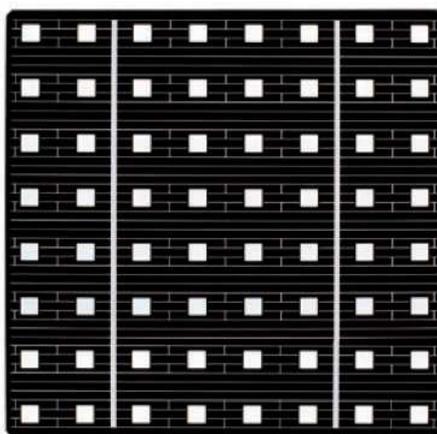


Figura 71. Detalle de los huecos cuadrados de la célula solar de Sunways.

Esta célula solar transparente es de silicio monocristalino y tiene una eficiencia de hasta el 14,4% con una transmitancia del 10%. Parámetros eléctricos:

Clase de electricidad según I (V_{FIX})	Rendimiento [%]	Rendimiento V_{FIX} [W]	I ($V_{FIX} = 490\text{ mV}$) [A]	Factor de llenado [%]	V_{oc} [mV]	I_{sc} [A]
AH814600E	14,4	2,25	4,6	76,02	609	4,85

Otra propuesta⁶ es realizar pequeñas células de silicio muy finas sobre un sustrato transparente y flexible. En las investigaciones consiguieron células de silicio monocristalino de un grosor de hasta ~100 nm (quedando limitados por la profundidad de unión).

Ofrecen una solución ligera y muy fina:

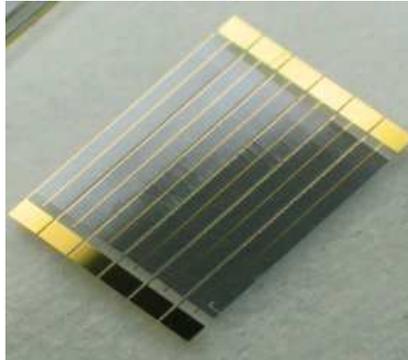


Figura 72. Módulo de microcélulas de silicio impresas en un sustrato plástico.

Hay que tener en cuenta que las microcélulas tienen un ancho de varios micrómetros y se sitúan ramificados entorno a los electrodos:

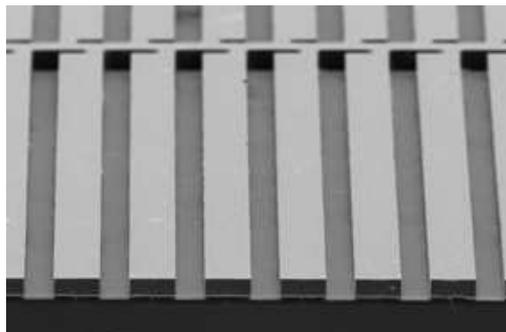


Figura 73. Fotografía por microscopio electrónico de barrido de las microcélulas de 20 μm de grosor.

Hicieron un prototipo de microcélula con un grosor de 15 μm que fue con la que obtuvieron la eficiencia de mayor valor (7,2%), sus datos eléctricos son:

$I_{sc} = 23,6 \text{ A/cm}^2$

$V_{oc} = 503 \text{ mV}$

$FF = 0,61$

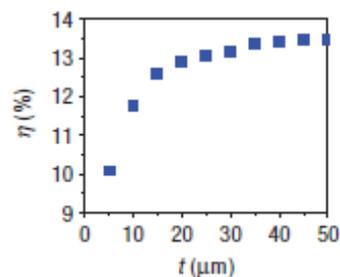


Figura 74. Datos de la simulación de la eficiencia de la célula en función de su grosor.

En cuanto a la transparencia de esta célula solar, en el estudio aseguran que puede variar del 35 al 70% en función del distanciamiento entre sí de las microcélulas que la componen (a mayor cantidad de huecos mayor transparencia).

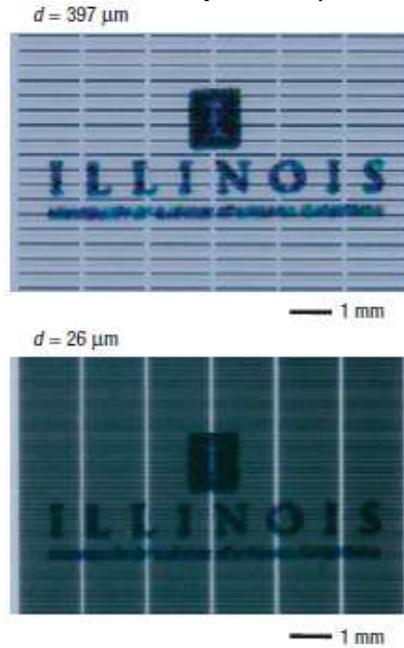


Figura 75. Ejemplo de transmitancia en células de 10 μm de grosor según el distanciamiento de las microcélulas que la componen.

La patente US2008257403A1 propone un uso más original de los huecos. Al colocar tiras de células solares horizontalmente en el interior del modulo de una ventana obtiene un efecto fotovoltaico a la vez que visual.

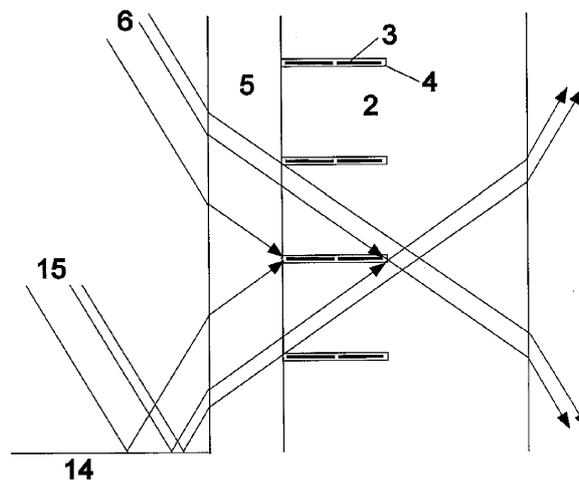


Figura 76. Detalle esquemático del comportamiento de la solución propuesta.

Considera el grosor de cada lámina fotovoltaica de 0,1 mm y el ancho de 4 mm. En el diseño las láminas paralelas están separadas las unas de las otras 5 mm. Es por esto por lo que según el autor no molestará mucho en el paso de luz disminuyendo la transparencia tan solo un 2%.

La patente US5221363A avanza un poco más en la idea, haciendo de las tiras fotovoltaicas de persianas fijas a las que se puede cambiar su orientación para regular la luz que se deja pasar a la habitación.

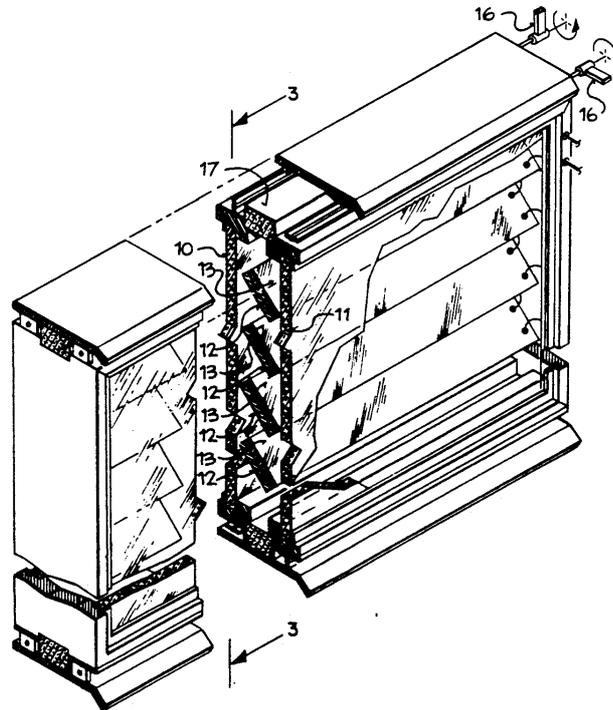


Figura 77. Dibujo esquemático de la "persiana" fotovoltaica.

La patente US2010101629A1 va un paso más allá que la anterior. Consigue aumentar la superficie de absorción inclinando las células para que tengan un ancho superior al grosor del modulo que las alberga. La transparencia la logra encarando las superficies fotovoltaicas para que conduzcan la luz como si de un periscopio minúsculo se tratase:

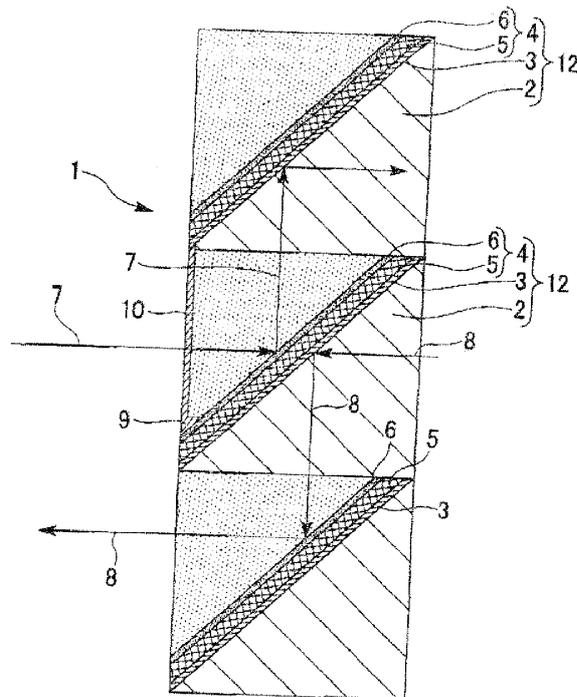


Figura 78. Diagrama del laberinto de luz propuesto para conseguir transparencia.

Usa polímeros transparentes para rellenar los huecos y dar consistencia al producto. Se consigue dirigir prácticamente casi toda la luz gracias a la superficie en espejo (capas finas de aluminio, plata, oro o cromo) de los electrodos, el resto alcanzará las células solares de su interior. Las células fotovoltaicas propuestas son de materiales semiconductores (silicio de cualquier tipo cristalino, GaAs, CuInSe_k, etc.).

3.1.2 Puntos:

Es la desarrollada por la corporación Kyosemi en su solución Sphelar⁷. La cual a pesar de estar basada en el silicio este al contrario que en los módulos tradicionales planos tiene forma de pequeñas esferas interconectadas.

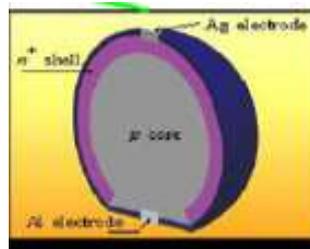


Figura 79. Diagrama de la unidad mínima de la célula Sphelar.

Al ser pequeñas esferas su superficie captadora, la parte que recibe los rayos solares incidentes completamente perpendiculares es muy reducida (pero siempre habrá una zona que los reciba de forma óptima), siendo casi toda su superficie expuesta alcanzada por rayos reflejados y/o difusos. Al estar basado en el silicio (una tecnología con muchos años de estudio), Sphelar tiene unas eficiencias muy buenas:

Photovoltaic performances of Sphelar with (w) and without (w/o) reflector in comparison to a planar cell under standard illumination (100.7 mW cm⁻², A.M. 1.5, 25 °C)

Sample	J_{sc} (mA cm ⁻²)	V_{oc} (mV)	FF%	η %
Sphelar (w)	51.96	0.585	77.4	23.54
Sphelar (w/o)	30.42	0.571	77.9	13.54
Planar	26.21	0.594	77.9	12.10

Figura 80. características electrónicas de Sphelar.

Que su unidad estructural sea tan pequeña le da una gran capacidad de adoptar las más diversas formas pero a la vez le da un aspecto lleno de puntos, la mayor transparencia se conseguirá con las gotas de silicio más pequeñas y distanciadas:

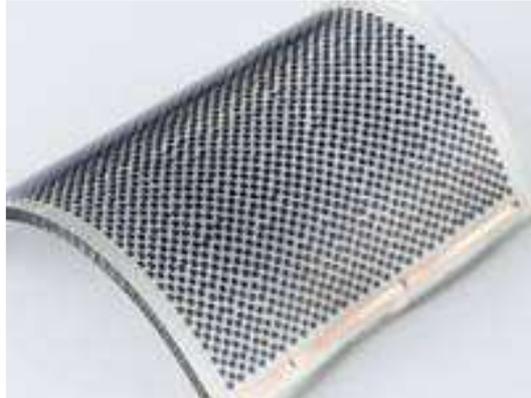


Figura 81. Prototipo de lámina producida con Sphelar.

3.1.3 Solución de marco fotovoltaico:

Esta propuesta evita el tener que desarrollar células solares transparentes. Esto se consigue escondiendo células solares convencionales de silicio en el marco interno del soporte de la ventana quedando reconducir la radiación solar hacia ellas⁸. Se consigue guiar la luz hacia los bordes sustituyendo el vidrio habitual de las ventanas por un material capaz de dirigir la luz hacia los bordes. El material utilizado es un nanocompuesto orgánico-inorgánico.



Figura 82. Modulo de ventana fotovoltaica de 17 cm² capaz de alimentar unos LEDs.

Este material capaz de conducir la luz puede ser creado fácilmente por moldes donde se añadiría una solución de nanopartículas de TiO₂ al monómero de polimetil metacrilato (PMMA). El nivel de transparencia de este material fotoconductor viene definido en función del porcentaje de luz que se reconduce al borde (el resto traspasará el material), el cual es función directa de la cantidad de la solución de nanopartículas añadida:

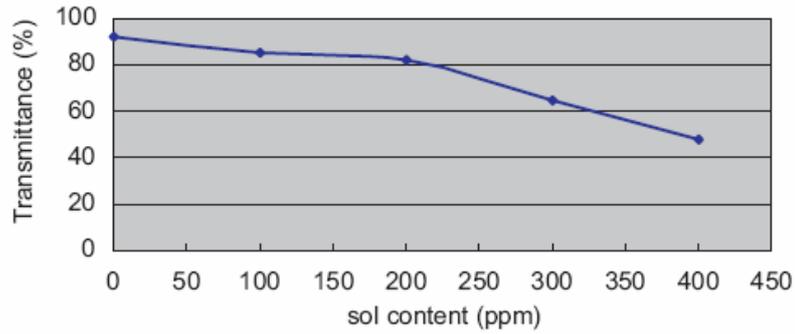


Figura 83. Curva de transmitancia en función de la cantidad de nanocompuesto en el módulo.

Conforme aumenta la concentración de TiO_2 aumenta la dispersión de luz de material, haciéndolo más translúcido y borroso:

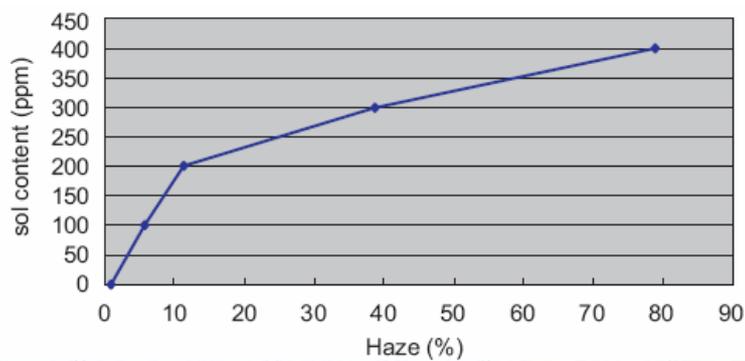


Figura 84. Relación de la dispersión lumínica en el material en función de la cantidad de nanocompuesto presente. Y ejemplo de la pérdida de transparencia con el aumento de la concentración del nanocompuesto.

La eficiencia de la célula solar de silicio usada en los experimentos, con una eficiencia del 16% en condiciones normales, varía de la siguiente forma en función de la translucidez del material:

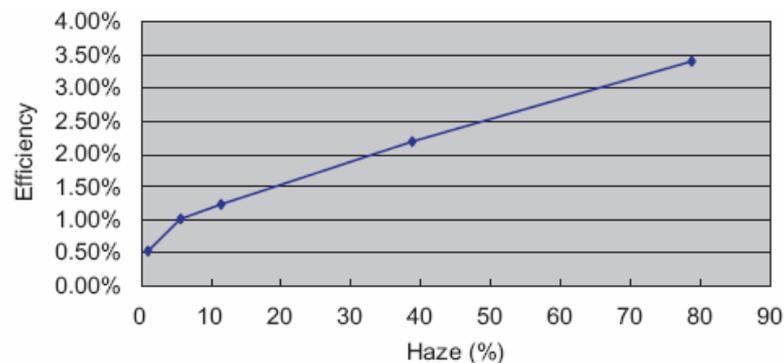


Figura 85. Variación de la eficiencia de la célula solar con respecto la dispersión lumínica (translucidez) del módulo.

La célula solar se comporta sin grandes variaciones (aparte de la bajada de la eficiencia), solo hay que tener en cuenta que la superficie de exposición del modulo solar será el área comprendida por el perímetro de la ventana en cuyo marco se haya colocado el modulo fotoconductor y el ancho del grosor del modulo. Reduciendo notablemente el área de captación por superficie utilizada por cada modulo. En el ejemplo de laboratorio para un modulo de 17 cm² con una concentración de 400 ppm de TiO₂ (~50 % de transmisibilidad del material y ~80% de turbidez) se consigue una eficiencia de 3,4%.

Otro ejemplo de esta solución lo encontramos en un estudio de concentradores solares por puntos cuánticos^{9,10}. Este estudio comienza recalcando que los edificios consumen el 20~30% de las necesidades de energía primaria total de los países industrializados, alcanzando el 40% en Europa y el 46% en Irlanda.

La pantalla propuesta usa tecnología de puntos cuánticos a nanoescala para obtener una proposición practica del concepto de concentrador solar de colorante fluorescente (FSC son sus siglas en ingles). El concentrador solar de punto cuántico (QDSC en ingles) se compone de los puntos cuánticos (QDs) esparcidos en materiales como plásticos o cristal que pueden ser utilizados para incorporarlos en fachadas de edificios. Cuando se le ponen células fotovoltaicas en los bordes, convierten la energía solar directa y difusa recolectada en electricidad para usar en el edificio.

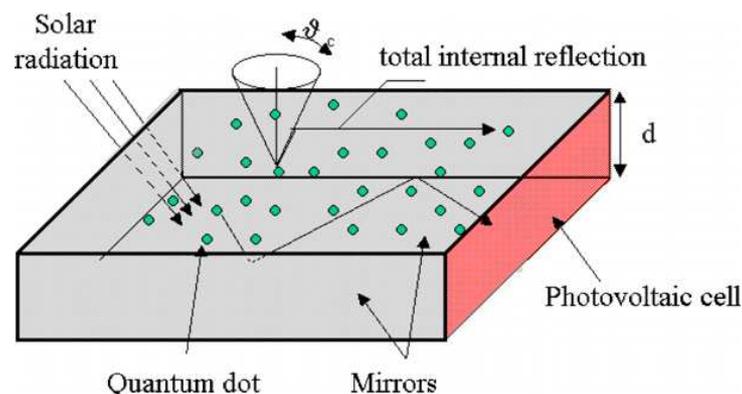


Figura 86. Esquema de funcionamiento del concentrador solar de puntos cuánticos.

Se muestra un dibujo esquemático del diseño de concentrador solar de punto cuántico, el cual consiste en una película transparente y delgada de cristal o plástico dopado con puntos cuánticos. La radiación solar incidente en la superficie del concentrador es parcialmente refractada en el material fluorescente y mas tarde absorbida por los puntos cuánticos; los fotones son entonces remitidos isotrópicamente a una menor frecuencia. Si la emisión es igual de probable en todas las direcciones, algunos de los fotones emitidos dejaran el medio, y serán reflejados nuevamente en la superficie del medio.

Como el índice de refracción de la capa dopada es considerablemente mayor que la del medio externo (aire), una gran cantidad de los fotones emitidos serán atrapados dentro del material (no escapan) y serán transportados por la reflexión interna total hacia los bordes. El numero de fotones depende de la absortividad de los puntos cuánticos y la eficiencia de los cuantos fluorescentes (QY) (ratio del numero de fotones fluorescentes con respecto el numero de fotones incidentes en el material). Se montan espejos reflectivos en tres de los bordes y en la superficie trasera, para que la luz solo pueda converger hacia el cuarto borde donde será absorbida por la célula fotovoltaica.

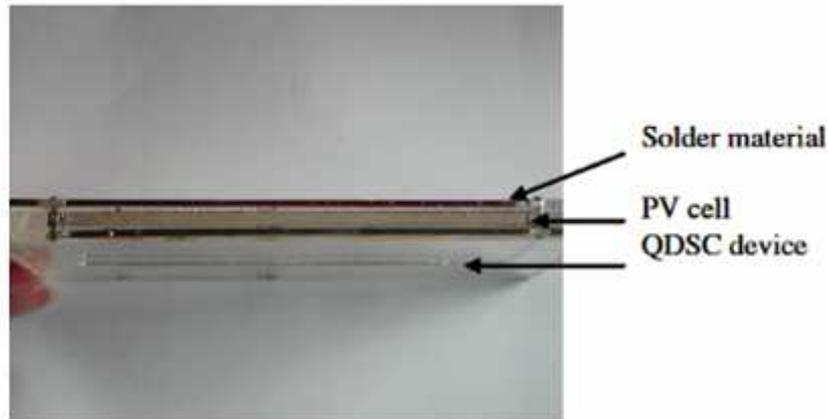


Figura 87. Vista lateral del concentrador cuántico con la célula fotovoltaica en el borde.

Estos concentradores de luz sirven tanto para radiación difusa como para directa sin necesitar sistemas de seguimiento; lo consigue concentrando la radiación incidente desde cualquier dirección y separando el espectro solar en dos o más partes, cada una de las cuales pueden ser aprovechadas por diferentes células solares. Otra ventaja con respecto los concentradores geométricos es que los problemas de disipación de calor se reducen. La energía perdida en transformar fotones incidentes a longitudes de onda mas largas es distribuida a lo largo de la región de absorción del conversor en radiación infrarroja de onda larga.

La transmisión y reflexión del material hacen caer la eficiencia de las células fotovoltaicas usadas hasta un 35%. Detalle óptico del modulo:

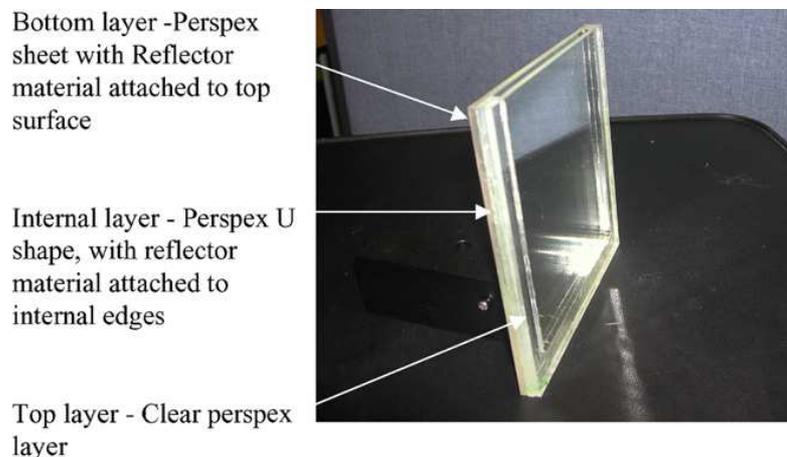


Figura 88. Detalle de la refracción del modulo.

Para estudiar su comportamiento se hicieron pruebas en laboratorio con numerosas muestras:

Description of samples characterised, where [1-4] denote material manufacturers: [1] University of Manchester, UK; [2] University of Hamburg, Germany; [3] Nanoco, UK; [4] BASF, Germany

Sample	Type of mould	Material	% vf	QY
Ref. (a)	11.5 cm × 11.5 cm × 0.3 cm mirrored perspex	Polyurethane only	N/a	N/a
1	11.5 cm × 11.5 cm × 0.3 cm mirrored perspex	Polyurethane and CdSe/CdS QDs [1]	0.1	0.1
2	11.5 cm × 11.5 cm × 0.3 cm mirrored perspex	Polyurethane and CdSe/ZnS QDs [2]	0.25	0.6
3	11.5 cm × 11.5 cm × 0.3 cm mirrored perspex	Polyurethane and CdSe/ZnS QDs [2]	0.1	0.6
4	5 cm × 5 cm × 0.3 cm perspex	Polyurethane and CdSe/CdS QDs [2]	0.15	0.6
5	5 cm × 5 cm × 0.3 cm perspex	Polyurethane and CdSe/CdS QDs [1]	0.08	0.1
6	5 cm × 5 cm × 0.3 cm perspex	Polyurethane and CdSe/CdS QDs [1]	0.1	0.1
7	5 cm × 5 cm × 0.3 cm perspex	Polyurethane and CdSe/ZnS QDs [3]	0.15	0.35
8 (ref)	5 cm × 5 cm × 0.3 cm perspex	Polyurethane and Lumogen F Red 300 TM dye [4]	0.005	>0.9

Figura 89. Descripción de las muestras para ensayar en laboratorio.

Se compararon las muestras experimentales con tres sistemas de referencia:

A) Muestra de poliuretano sin puntos cuánticos colocada en un molde de plexiglás con superficie de espejo, con la célula fotovoltaica sin orientar.

B) Muestra de poliuretano sin puntos cuánticos colocada en un molde de plexiglás sin superficie de espejo, con la célula fotovoltaica sin orientar.

C) Muestra de poliuretano sin puntos cuánticos colocada en un molde de plexiglás sin superficie de espejo, con la célula fotovoltaica orientada perpendicularmente a la radiación.

Los sistemas consiguieron factores de concentración comparativos comprendidos entre 1,33 y 3,05 cuando se compararon con la referencia A y unos mayores factores de concentración entre 3,78 y 8,65 cuando se compararon con la referencia B.

Factores de llenado obtenidos:

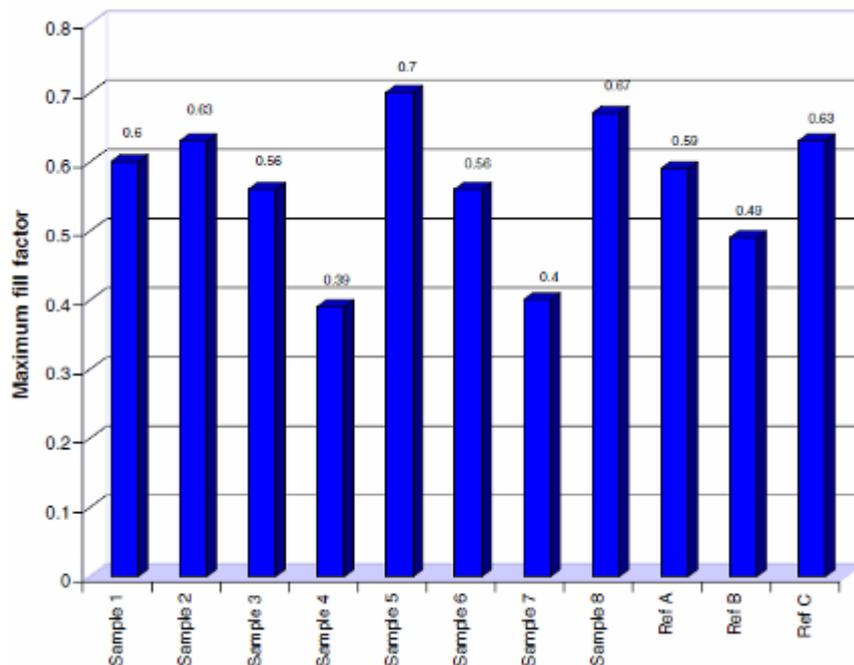


Figura 90. Factores de llenado máximo conseguidos a intensidades solares específicas.

Eficiencias obtenidas:

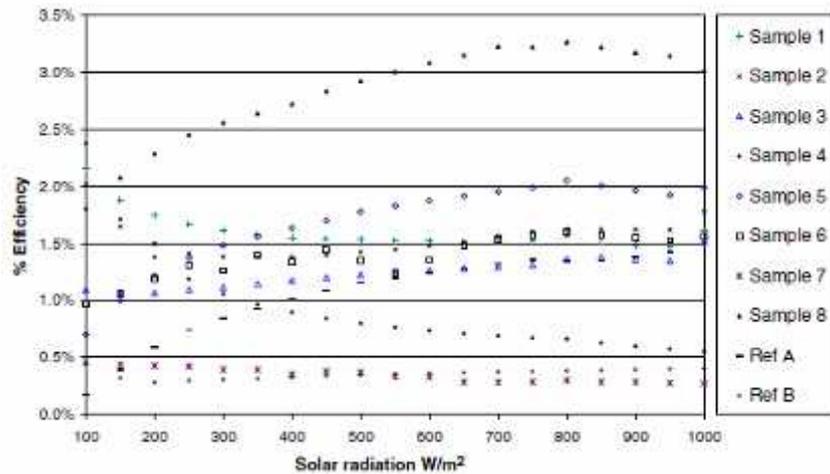


Figura 91. Eficiencia de conversión eléctrica de cada modulo para distintas intensidades de radiación.

Estos datos siguen siendo bajos comparados con la eficiencia fotovoltaica del 11% que debería conseguirse con células de silicio absorbiendo la radiación que le proporciona el material de CdSe/ZnS de los puntos cuánticos que se usaron en los experimentos:

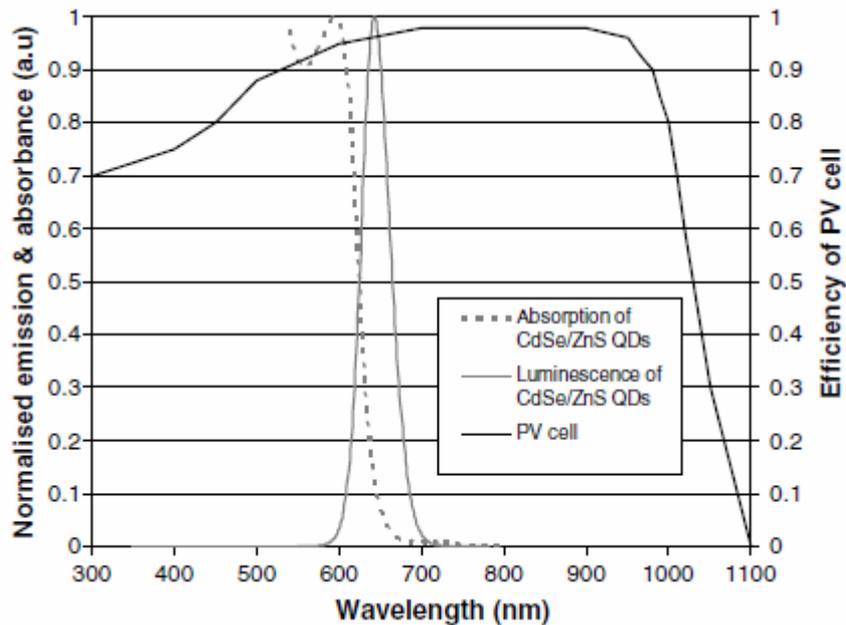


Figura 92. Absorción y emisión de los puntos cuánticos de CdSe/ZnS comparados con una célula fotovoltaica de silicio.

Además, según las características del fabricante, todas las células fotovoltaicas usadas deberían haber conseguido una eficiencia mínima de 16,2%. En el artículo los propios autores constatan que a pesar de que los concentradores solares de punto cuántico muestran ciertas mejoras en sus resultados incrementando la intensidad solar, los efectos de dicha concentración no son tan altos como en un principio se esperaban. Podemos encontrar ideas similares, aunque no tan desarrolladas en mas artículos¹¹. Proponen en el esquema usado para mostrar su idea, un diseño muy similar a los anteriormente vistos. En el artículo utilizan un cristal dopado con neodimio como medio luminiscente, el cual absorbe mucha luz del espectro solar y la emite en longitudes de onda mayores hasta alcanzar la superficie que la reabsorberá (célula solar).

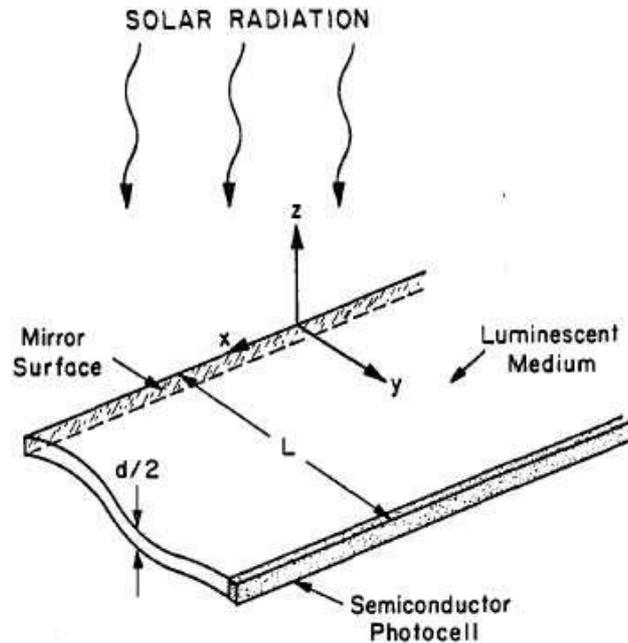


Figura 93. Diagrama del marco fotovoltaico propuesto.

Otros estudios¹² se han centrado en buscar los límites de la eficiencia de los colectores fluorescentes usados en células solares. La máxima eficiencia de un colector fluorescente corresponde al límite Shockley-Queisser para una célula solar sin concentrador con una sola banda gap de energía. Para conseguir esta eficiencia, el colector requiere una estructura fotónica en su superficie que actúe como un filtro que pare la banda espectral omnidireccional.

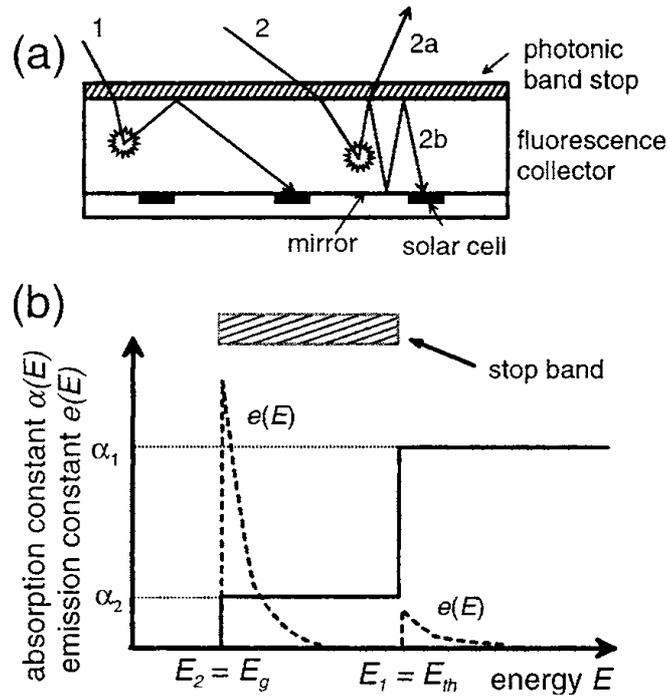


Figura 94. (a) Dibujo esquemático de un colector fluorescente con una célula solar en su base. La capa fluorescente absorbe los fotones incidentes (1) y los emiten a una menor energía. Sin una barrera de banda de fotones (PBS son sus siglas en inglés) algunos de estos fotones abandonan el colector (2a). El PBS refleja estos electrones de nuevo a la célula solar (2b). (b) Dependencia espectral de los coeficientes de absorción y emisión α y e del colorante fluorescente ideal. La eficiencia obtenida puede verse en la grafica que aportan en el artículo:

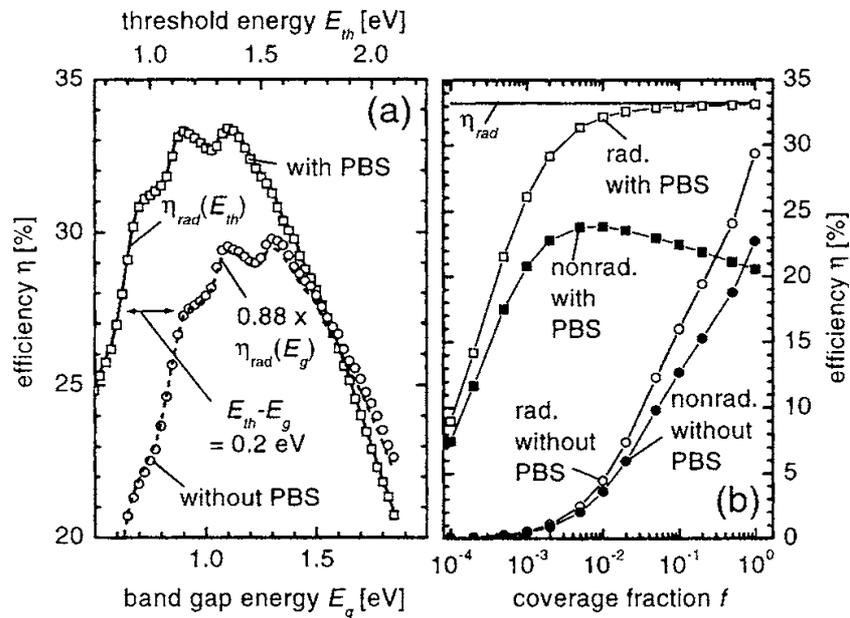


Figura 95. Graficas de eficiencias simuladas para colectores fotovoltaicos con y sin barrera de banda fotónica.

El siguiente artículo¹³ también estudia este tipo de concentradores, llevándolo un poco mas adelante la idea con un sistema doble:

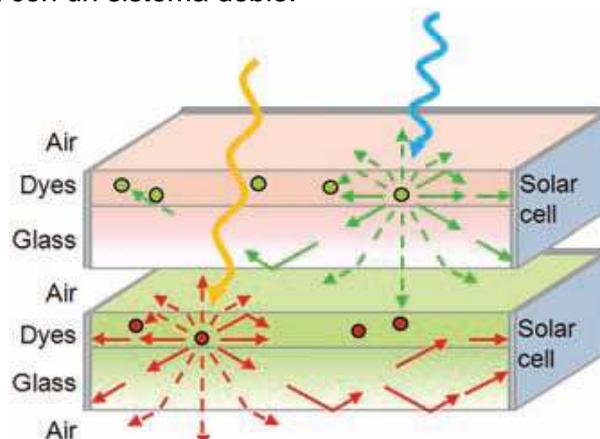


Figura 96. Diagrama del concentrador solar orgánico tándem propuesto

El concentrador orgánico superior consiste en una fina capa de colorantes orgánicos de onda corta depositados en un sustrato de cristal con un alto índice de refractancia. Los colorantes absorben la radiación solar incidente y la reemiten a una energía mas baja. Aproximadamente el 80% de los fotones reemitidos son atrapados dentro del material por la reflexión interna total para ser al final recolectados por un dispositivo fotovoltaico colocado en los bordes del sustrato. La pérdida de fotones (línea discontinua en el grafico anterior) ocurre por la no absorción de de las emisiones incidentes o por la absorción de otros colorantes. La radiación que consigue llegar hasta el dispositivo inferior puede ser de nuevo absorbida por las partículas de colorante de onda larga de la segunda para ser de nuevo emitidas en forma de luz de una energía menor, para poder ser convertidas en electricidad en un segundo dispositivo fotovoltaico con una menor banda de gap. Además, el concentrador solar orgánico de abajo podría ser reemplazado por una célula solar de bajo coste o un sistema térmico para calentar agua con la radiación solar.

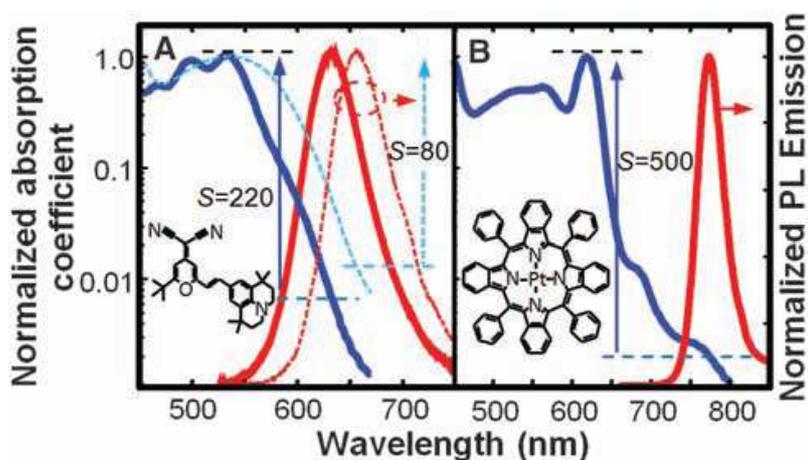


Figura 97. Espectro de absorción de los concentradores orgánicos solares para radiaciones cercanas al infrarrojo (línea roja) y al ultravioleta (línea azul). (A) Datos obtenidos para el primer colorante. (B) Datos obtenidos para el segundo. "S" es el ratio de auto absorción, definido como el ratio de los coeficientes de absorción en el momento de máxima absorción y emisión, la línea continua representa un valor de 220 y la discontinua de 80 en el grafico (A) mientras que en el (B) tiene un valor de 500.

El siguiente artículo¹⁴ propone utilizar un concentrador solar de tres colorantes capaz de transferir la energía de excitación de forma óptima. Los colorantes propuestos son derivados de la misma molécula BODIPY.

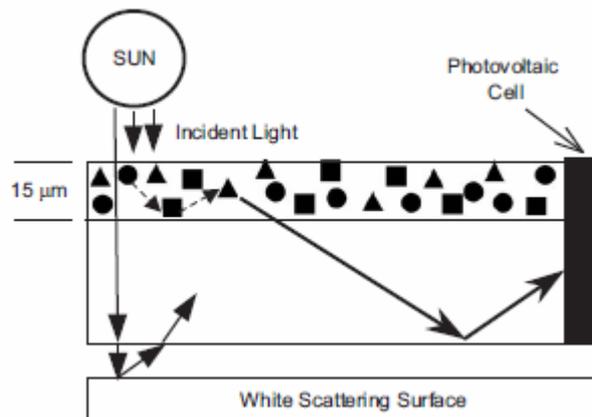


Figura 98. Esquema del módulo concentrador de colorantes (cuadrado, triángulo y círculo representan los 3 compuestos utilizados) propuesto.

Esta configuración obtiene una mejora de 45~175% con respecto a los dispositivos de un solo colorante.

3.2. Soluciones físicas

En este apartado se recopilarán todas las soluciones encontradas que no utilizan huecos para aumentar su transparencia sino que sus componentes permiten, dentro de lo que cabe, el paso de la franja lumínica visible.

3.2.1 Electrodo

Como se ha visto anteriormente, la opacidad de los electrodos es el mayor obstáculo para conseguir la transparencia de las células solares de cualquier tipo por lo que se busca con ahínco un sustituto transparente. Esto es importante sobre todo en las tecnologías con menores eficiencias (orgánicas y de colorante que además son a la vez bastante transparentes de por sí) ya que no bloquearan la llegada de los rayos solares incidentes sobre la capa activa de las células solares.

En la introducción de un artículo¹⁵ podemos encontrar una buena explicación del porque es importante la mejora de la transparencia de los electrodos:

El electrodo inferior (ánodo) de las células solares orgánicas suele hacerse cubriendo el sustrato transparente (cristal o plástico) sobre la que se hace la célula con una capa conductora como por ejemplo de óxido de indio dopado con estaño (ITO son sus siglas en inglés). En muchos casos, se cubre por rotación esta capa de ITO con un polímero conductor, como el poli(3,4-etileno dioxitiofeno)-poli-(estireno sulfonato) (PEDOT:PSS por ser buen conductor de huecos), para facilitar la inyección y extracción de carga. Quedando el problema del electrodo superior (cátodo en las células normales y ánodo en las invertidas) que es el que cubre la capa activa ya que normalmente se fabrica por deposición al vacío de metales con baja función de trabajo (W) como el aluminio y el calcio. Para evitar los posibles daños en la capa activa por la incidencia del material caliente, se suelen evaporar capas intercaladas antes de la evaporación del cátodo

metálico. Por este motivo, la deposición de los electrodos metálicos es uno de los pasos que impiden conseguir dispositivos fotovoltaicos plásticos a gran escala de bajo coste. El reto consiste en usar dos electrodos de polímeros conductores con una conductividad eléctrica lo suficientemente grande y distinta función de trabajo (ϕ) para favorecer la extracción de carga de las células solares. Recientemente, se han estado introduciendo técnicas no invasivas para la formación de los electrodos como la laminación por contacto suave. La laminación por contacto suave se aprovecha de la buena adhesión de los materiales elastoméricos suaves puesto en contacto con superficies lisas.

En el mismo artículo¹⁵ vemos como experimentan tratando de hacer el electrodo superior del mismo polímero que el utilizado en la célula solar orgánica en la que formará parte. Este está fabricado con otra forma de PEDOT hecho con VPP-PEDOT (PEDOT polimerizado en fase de vapor) con una conductividad de $10^2 \sim 10^3$ S/cm. El cátodo se coloca sobre un sustrato elastómero y hace contacto con la mezcla APFO-3/PCBM.

Los bajos valores de rectificación obtenidos en los experimentos por el VPP-PEDOT y el aluminio como electrodos sugieren que tienen valores similares de función de trabajo que es bastante bajo (4,0~4,5 eV). Además, la conductividad de las capas finas de VPP-PEDOT es mayor que la del PEDOT:PSS alrededor de dos ordenes de magnitud.

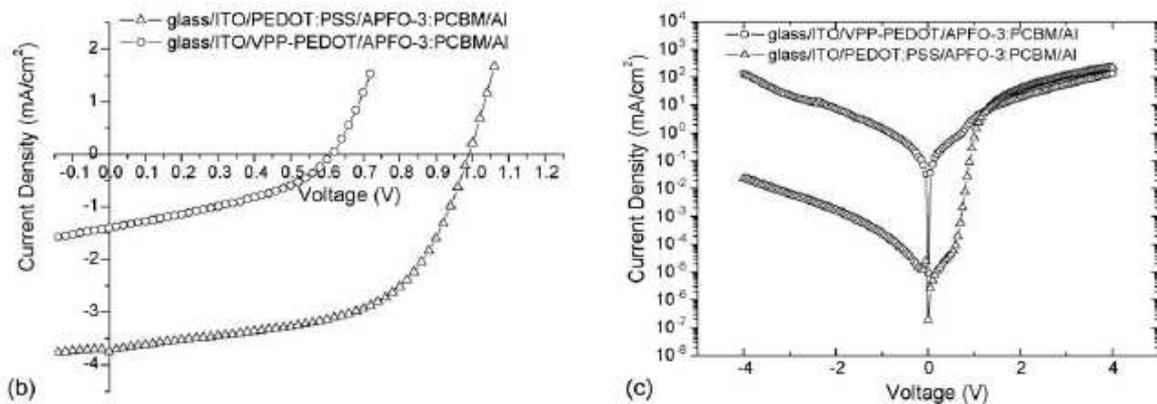


Figura 99. Graficas I-V del componente propuesto (VPP-PEDOT) y del usado para comparar (PEDOT:PSS). (b) es bajo iluminación blanca y (c) a oscuras.

Demostraron que la capa conductora de VPP-PEDOT tiene una función de trabajo lo suficientemente pequeña como para ser tomada en cuenta como electrodo polimérico para dar/recoger electrones. Añaden que todavía son necesarias mejoras para aumentar el rendimiento de los dispositivos laminados.

Hay más artículos que siguen esta línea de investigación:

- Un artículo¹⁶ propone usar el PEDOT:PSS PH1000 como electrodos tanto superior como inferior. Este material ofrece una conductividad de ~ 680 S/cm. Y la célula solar resultante obtuvo una eficiencia del 1,8%.

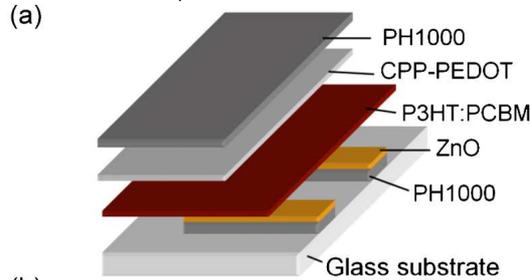


Figura 100. Estructura y composición de la célula descrita (la capa de ZnO se añade para hacer al electrodo selectivo con los electrones).

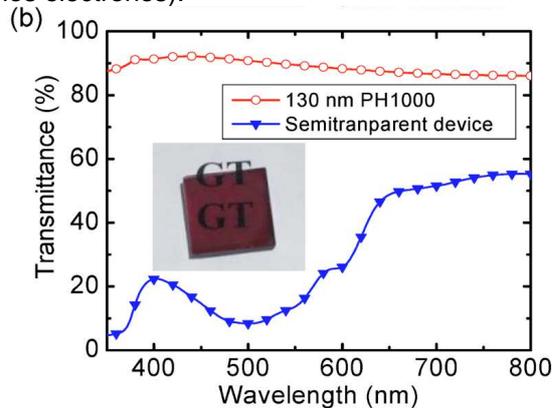


Figura 101. Espectro de transmisión del compuesto utilizado y de la célula producida.

Otro artículo¹⁷ propone también una nueva mezcla de alta conductividad para el PEDOT llamada CPP-PEDOT:PH-1000 para poder usarlo como electrodo superior en células solares invertidas. Consiguen alcanzar una conductividad de 420 S/cm:

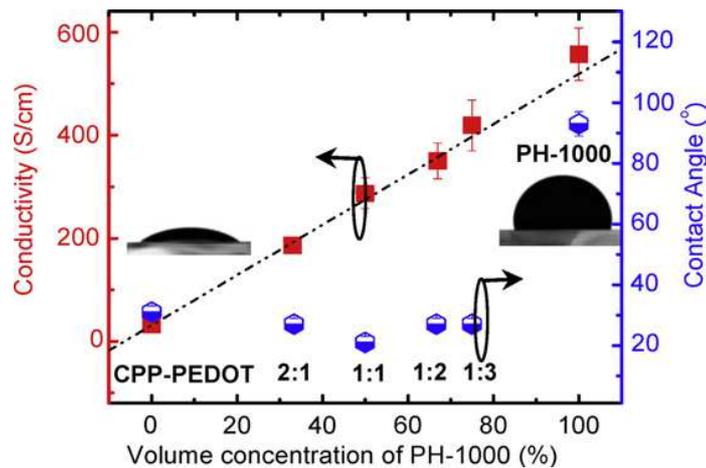


Figura 102. Conductividad del electrodo en función de la concentración de CPP-PEDOT:PH-1000.

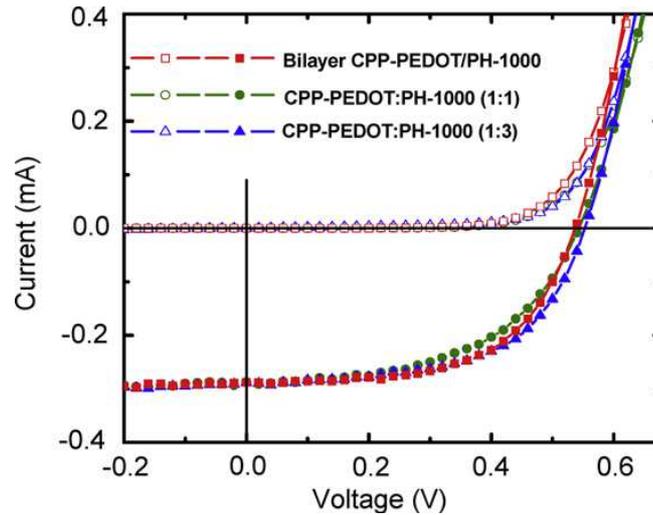


Figura 103. Gráfica I-V del compuesto estudiado en distintas concentraciones y formas.

La célula solar experimental que realizaron alcanzó una eficiencia del 2,4%, con una transmitancia de 10~70% en el rango de longitud de ondas de 400 a 800 nm.

Otras líneas de estudio¹⁸ siguen utilizando contactos metálicos consiguiendo, sin embargo, buenos niveles de transparencia en células solares orgánicas invertidas. Están fabricadas con ZnS/Ag/WO₃ (mezcla llamada ZAW), la cual puede variar la absorción modificando la estructura. Se puede regular la eficiencia por un solo sentido de paso de la radiación o igualarla para ambos lados.

Este artículo demuestra la gran sensibilidad de la célula solar al grosor de la capa de ZnS que contienen, variando la absorción de la célula con esta:

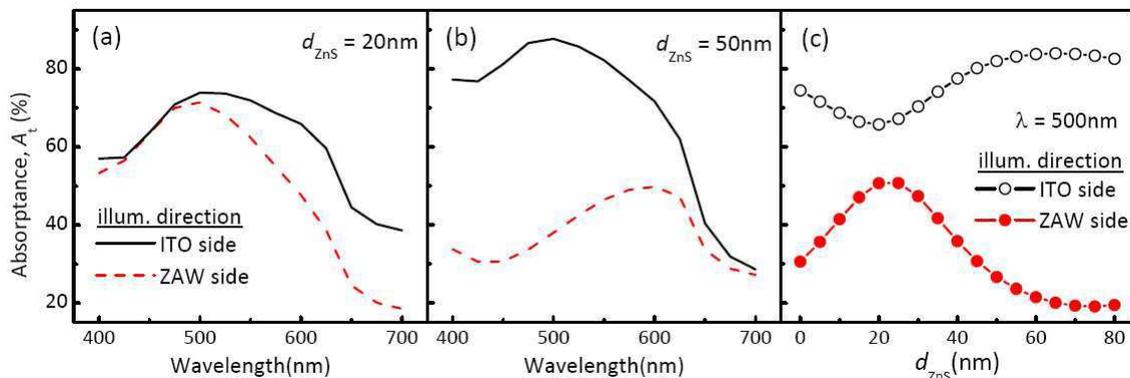


Figura 104. Espectros de absorción calculados para distintos grosores de la capa de ZnS.

Transmitancia de la célula en función del grosor de la capa de ZnS:

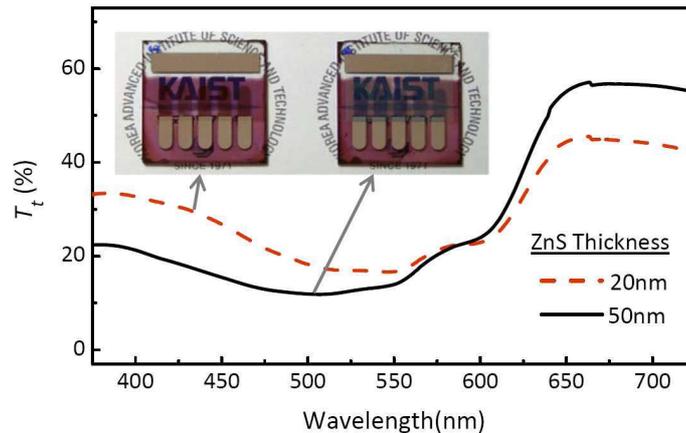


Figura 105. Transmitancia solar medida en la célula orgánica invertida para distintos grosores de la capa de ZnS.

En otro caso¹⁹ utilizan como cátodo un electrodo transparente compuesto de carbonato de cesio (Cs_2CO_3)/Ag/ITO que muestra una gran transmitancia en el rango visible. El rendimiento del dispositivo semitransparente mejoró significativamente después de un post-recocido térmico y la incorporación de una red de aluminio al contraelectrodo. El rendimiento general de la célula solar polimérica alcanzó el 2,09%.

Un cátodo transparente ideal para dispositivos comerciales debe tener a la vez una gran eficiencia recolectando electrones y una alta transparencia. Normalmente se intercala una capa muy fina entre la capa activa y el cátodo metálico para mejorar la inyección de electrones y reducir la resistencia eléctrica. Esta capa solía hacerse de LiF y recientemente el carbonato de cesio (Cs_2CO_3) ha demostrado ser un prometedor material para intercalar. Comprobaron la eficiencia de conversión energética de la célula con distintos electrodos para comprobar si mejoraba su comportamiento:

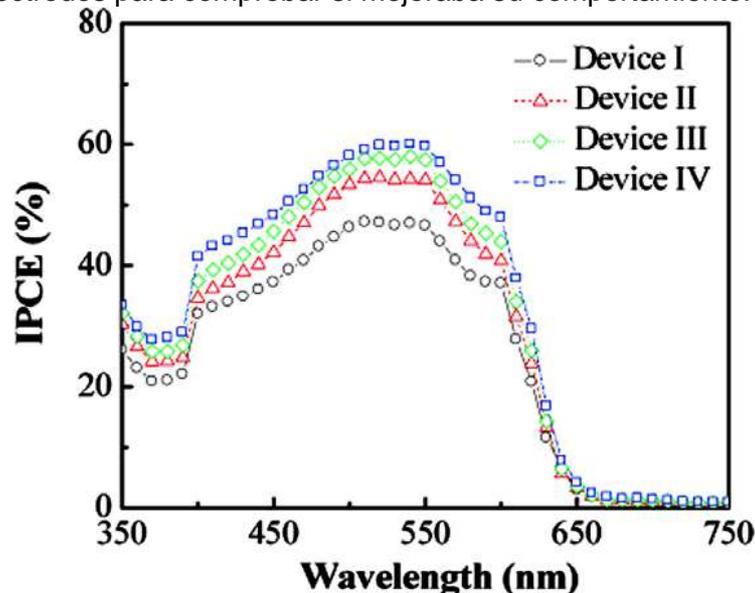


Figura 106. Curvas de eficiencia con respecto la longitud de onda de cada uno de los dispositivos estudiados: (I) Dispositivo base para comparar de ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM y Cs_2CO_3 /Ag(7 nm)/ITO(100 nm) (II) Dispositivo al que se le a hecho un tratamiento de post-recocido, (III) Dispositivo con la red de aluminio y (IV) Dispositivo con un espejo de plata en su cara posterior.

A continuación se muestra el prototipo con el que han estado trabajando junto a una grafica de transmitancia de las células experimentales (sin y con la ayuda de una red de aluminio):

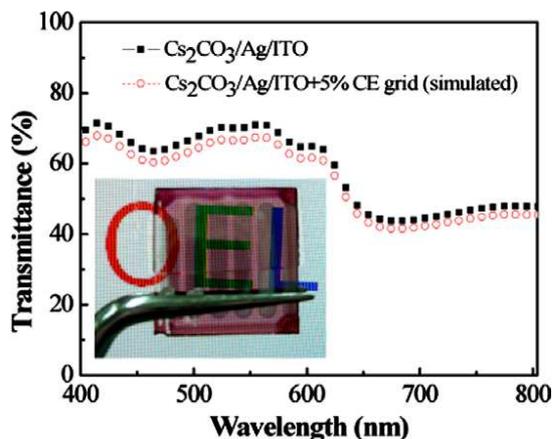


Figura 107. Espectro de transmisión del cátodo transparente de $\text{Cs}_2\text{CO}_3/\text{Ag}/\text{ITO}$ y la simulación de la transmisión del mismo con una red de Aluminio extra del 5%.

La incorporación de la red de aluminio mejora la eficiencia del electrodo bajando un poco el espectro de transmisión.

también se ha investigado²⁰ el uso del grafeno como electrodo para una célula solar invertida transparente. Se pensó en utilizar al grafeno como electrodo transparente ya que tiene una transmitancia del 97,6%.

Diagrama de la célula solar orgánica invertida propuesta en el artículo:

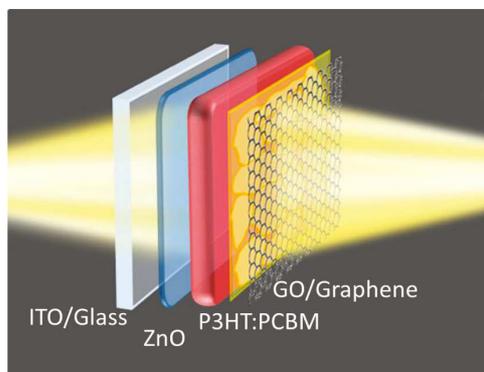


Figura 108. Estructura de la célula solar polimérica invertida.

La fabricación de esta célula sería por laminación, implicando la deposición térmica del electrodo superior de grafeno durante el recocido de las capas fotoactivas y además puede ser integrado en el proceso de fabricación “roll-to-roll” en células solares transparentes.

Sin embargo, los mejores resultados obtenidos en el rendimiento de la célula han sido cuando es iluminada por ambos lados simultáneamente como queda demostrado en la siguiente grafica:

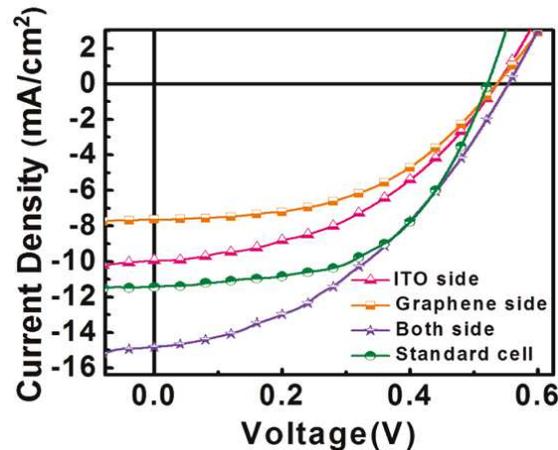


Figura 109. Curvas IV para distintas iluminaciones de la célula solar.

Sin embargo la transparencia de la célula cae cuando se intentan poner varias capas de grafeno para mejorar el paso de los electrones.

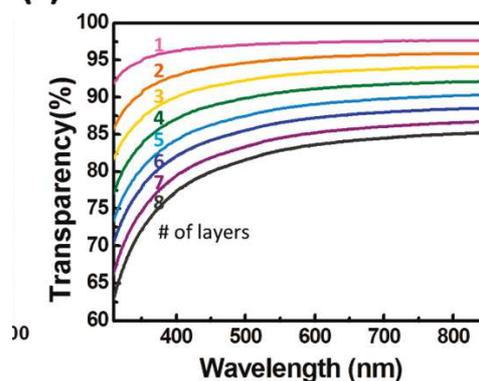


Figura 110. Grafica que muestra la transparencia de la célula en función del número de capas de grafeno usadas como electrodo.

Esta idea se ha estudiado también en el artículo²¹ que propone soluciones de fabricación a bajas temperaturas en células solares orgánicas con electrodo de grafeno.

El problema reside en hacer la escisión mecánica del grafito a gran escala. Las muestras de una sola capa son el resultado de laboriosos métodos de descamación, lo que no es ni escalable a grandes producciones ni capaz de producir capas uniformes.

Recientemente, algunos investigadores han evitado el problema usando óxido de grafito, un compuesto a capas que puede ser rápidamente colocado en laminas individuales con un buen disolvente. Aunque el óxido de grafito no es conductor, la red conjugada puede ser restaurada mediante la reducción en vapor de hidracina o con altas temperaturas después de la deposición. Sin embargo, ambos métodos de reducción tienen sus desventajas, ya que las altas temperaturas son incompatibles con los sustratos flexibles (al estar estos compuestos por tereftalato de polietileno, PET, por ejemplo) y los vapores de la hidracina solo pueden reducir la capa superficial de las películas depositadas. Se han propuesto otros métodos de reducción, como el NaBH₄, la fenil-hidracina y el KOH en solución acuosa. Sin embargo, con estos métodos se pueden encontrar reducciones incompletas o grandes cúmulos, por lo que el grafito obtenido es muy limitado, siendo este el mayor inconveniente para ser usado de transporte de cargas y conductor.

Este artículo aporta una nueva forma de producción de grafeno para ser usado en células solares sin deteriorarlas. El método mostrado propone una solución sintética competitiva usando una capa híbrida de nanotubos de carbono convertidos químicamente en grafeno. Esta tecnología es fácil, barata, escalable a cualquier tamaño y compatible con los sustratos flexibles. Obtienen unos resultados de conductividad y ópticos de $240 \Omega/\text{sq}$ con una transmitancia del 86% después del dopado químico, siendo su rendimiento comparable con el ITO usado para aplicaciones flexibles. También construyeron una aplicación como prueba de concepto en una célula solar polimérica con una eficiencia de conversión energética del 0,85%.

Se ha llegado a probar a juntar ambas soluciones. Por ejemplo podemos encontrar un estudio²² sobre electrodos transparentes híbridos de redes metálicas (Ag y ZnO) y polímeros conductores (PEDOT:PSS). Proponen esta solución para células solares orgánicas invertidas. Regulando la forma geométrica de la red metálica con una adecuada capa fina de polímero conductor se puede conseguir una transparencia similar a la del ITO. El ITO tiene desventajas para dispositivos flexibles, baja conductividad para grandes superficies, escasez del indio y complicados y caros procesos de fabricación; motivos por los que se buscan sustitutos del mismo.

Modelo propuesto:

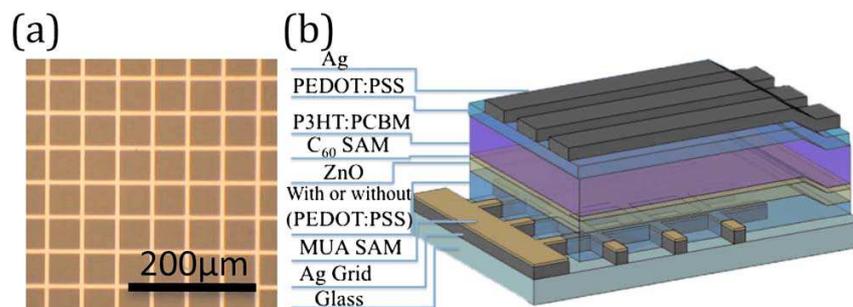


Figura 111. (a) Fotografía microscópica de la red de plata. (b) Configuración del dispositivo propuesto.

Características de la célula propuesta:

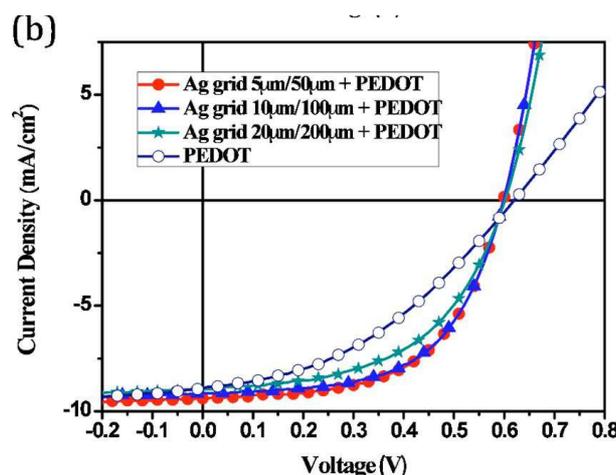


Figura 112. Características I-V de la célula solar con diferentes geometrías en su red de plata combinadas con una capa de 40nm de PEDOT:PSS PH500 medido bajo iluminación de 1,5 AM de un simulador solar calibrado con una intensidad lumínica de $100 \text{ mW}/\text{cm}^2$.

Las células solares fabricadas con este método han conseguido una eficiencia de ~3.2%.

En otro artículo se presentan cátodos completamente poliméricos²³. El material propuesto para usar como electrodo es el PEDOT:PSS acompañado de una capa orgánica con dopaje "n" como el litio dopado con batofenantrolina (BPhen:Li).

Resultados del estudio:



Figura 113. Célula solar propuesta.

Se comprobó que poner oro en el proceso de fabricación al vacío mejoró en dos órdenes de magnitud el paso de la corriente en las uniones pn. Gráficas obtenidas en los experimentos:

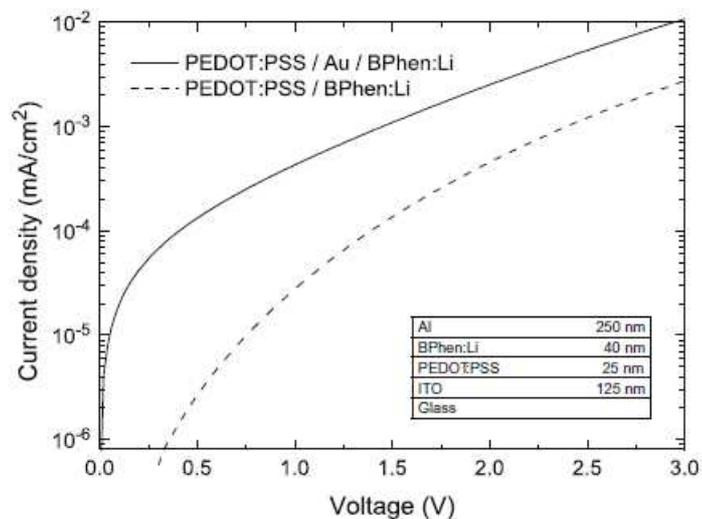


Figura 114. Curvas I-V de los ensayos finales realizados. Acompañado de la composición de la célula solar fabricada.

Otra forma de abaratar costes es simplificando la fabricación de la célula, en este caso entra el siguiente artículo²⁴ que propone aplicar el electrodo superior de una célula solar orgánica mediante un spray. El artículo sugiere una forma nueva de aplicar una mezcla de PEDOT:PSS altamente conductora para hacer de electrodo superior ($\sim 2,1 \mu\text{m}$) en una célula solar orgánica invertida capaz de alcanzar un 2% de eficiencia:

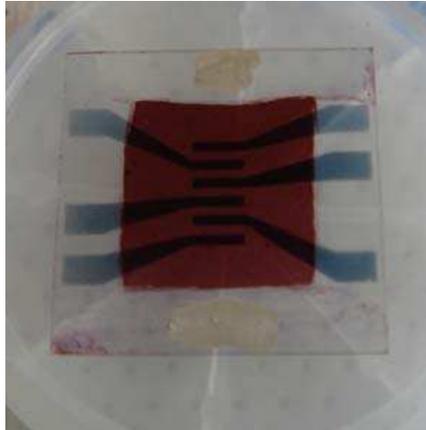


Figura 115. Célula solar terminada fabricada mediante el proceso propuesto en la ref. 22.

Datos eléctricos de la célula:

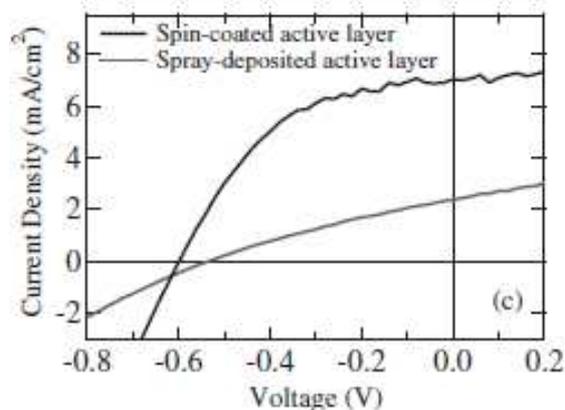


Figura 116. Curvas I-V comparando células fabricadas con distintos métodos.

El estudio muestra que el electrodo aplicado en spray de PEDOT:PSS puede sustituir al metal evaporizado térmicamente como el electrodo superior en células solares invertidas de P3HT:PCBM. La propuesta de que la capa activa sea también aplicada en spray se ha estudiado también aunque con las técnicas actuales hace que la eficiencia baje hasta el 0,4%.

Otra solución propuesta²⁵ es usar capas de nanohilos de plata entrecruzados como electrodos transparentes. Los nanohilos de plata fueron sintetizados mediante una reducción de nitrato de plata en la presencia de PVP (poli(vinil-pirrolidona) en etilenglicol. Los nanohilos de plata resultantes tenían una longitud de $\sim 8,7 \mu\text{m}$ con un diámetro de $\sim 103 \text{ nm}$. Para fabricar electrodos transparentes usando suspensiones de nanohilos, se coloca una cantidad de la suspensión en un sustrato cristalino.

Características de distintos tipos de electrodos incluido el del experimento para comparar:

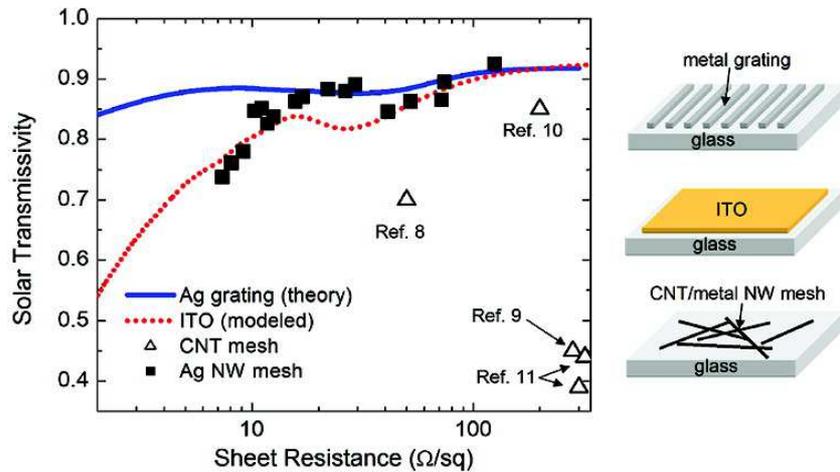


Figura 117. Grafica de la resistencia de distintos materiales comparados con su transmisividad. A la derecha hay un esquema representando las distintas capas de la célula solar propuesta.

Estudio de la resistividad de los nanohilos de plata en funcion de la densidad de los mismos:

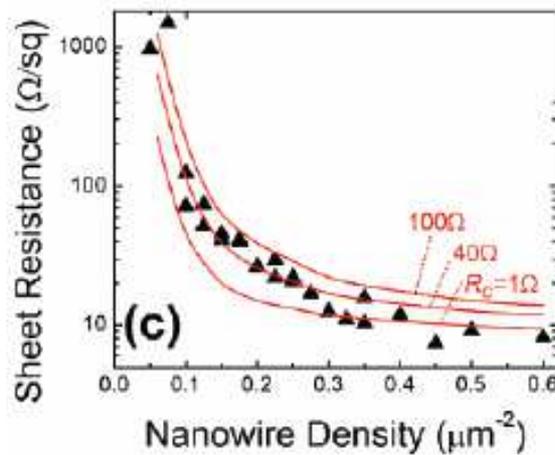


Figura 118. Datos experimentales de la resistencia laminar con respecto a la densidad aérea (triángulos) y los resultados teóricos para nanohilos de 8,7 μm de longitud y 103 nm de diámetro ($R_w = 18\Omega$) y para distintos valores de resistencias de contacto $R_c = 1, 40$ y 100Ω (líneas rojas).

El estudio²⁶ también propone usar nanohilos de plata como electrodo superior de células solares orgánicas.

Otro estudio²⁷ propone usar ánodos transparentes de $\text{MnO}_3/\text{Ag}/\text{MnO}_3$ en células orgánicas invertidas. La capa de MnO_3 usada como capa de unión entre la capa activa y el ánodo no solo reduce la resistencia mejorando la eficiencia de conversión energética sino que incrementa la transmisión de luz de todo el dispositivo.

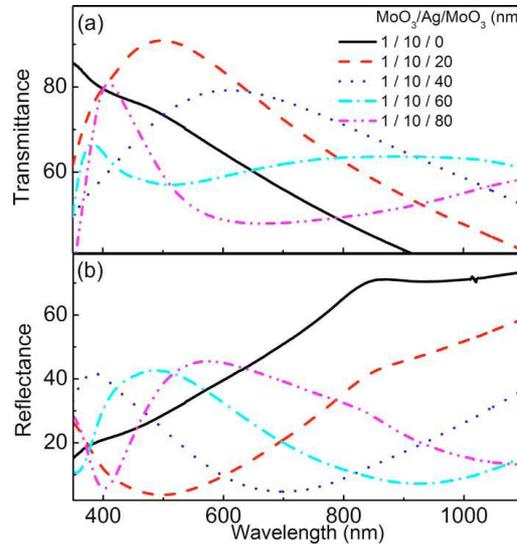


Figura 119. Espectro de transmisión (a) y el de reflexión para distintos grosores del ánodo de $\text{MnO}_3/\text{Ag}/\text{MnO}_3$.

En el siguiente artículo²⁸ encontramos un ánodo superior multicapas para células solares invertidas de $\text{WO}_3/\text{Ag}/\text{WO}_3$. La capa interna de WO_3 hace de capa de extracción de huecos, mientras que la superior mejora el paso de la luz por la célula. Consiguen un dispositivo con una eficiencia de 0,7~2,2%.

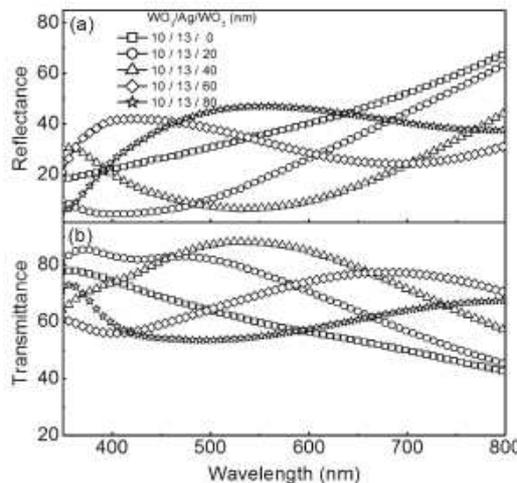


Figura 120. Espectro de reflexión y de transmisión en función del grosor del ánodo de $\text{WO}_3/\text{Ag}/\text{WO}_3$ propuesto.

Este artículo²⁹ propone usar un electrodo multicapa de LiF/Al/Au como contacto superior de un célula orgánica. Dicen que este cátodo tiene un 80% de transparencia y la célula solar construida con el consiguió una eficiencia del 2,6%.

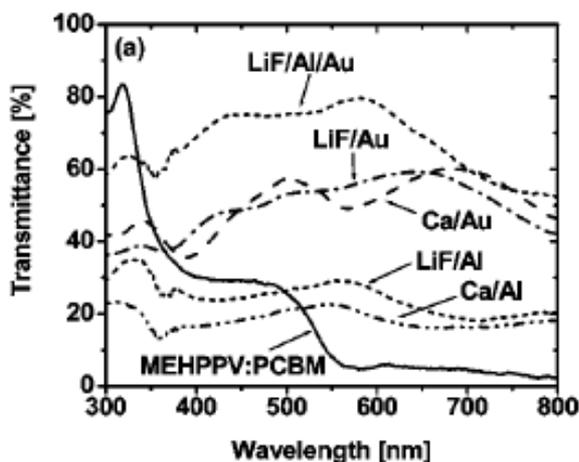


Figura 121. Espectro de transmisión de los distintos cátodos experimentados.

El siguiente artículo³⁰ propone el uso de una capa fina de poli(vinilcabazol)/TiO₂ en células solares orgánicas.

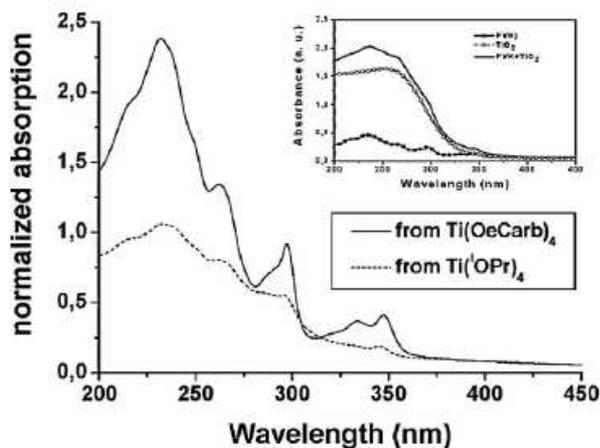


Figura 122. Espectro de absorción de las películas propuestas de TiO₂/PVK (poli(vinilcarbazol)).

El artículo³¹ propone usar electrodos de Al/BPhen/Ag como contacto superior de células solares orgánicas transparentes. Calculan que pueden mejorar el rendimiento de los electrodos un 50%.

El siguiente artículo³² propone electrodos completamente poliméricos libres de ITO para células solares orgánicas invertidas. Proponen variantes del PEDOT:PSS como electrodos. El prototipo construido tiene una eficiencia de conversión energética de 0,47%.

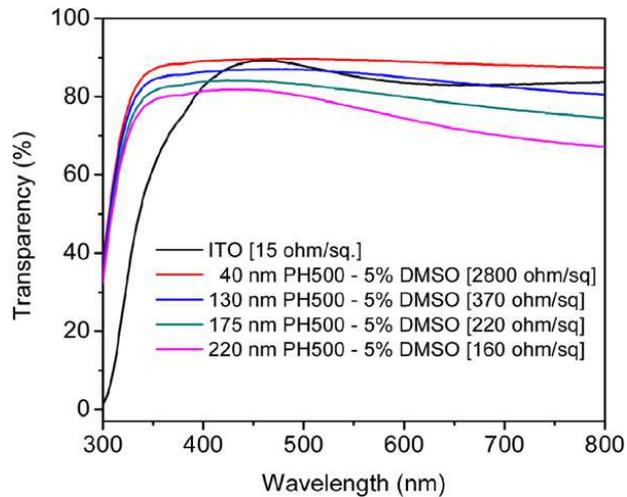


Figura 123. Espectro de transparencia de distintas variaciones probadas de PEDOT:PSS comparada con la del ITO.

Otro artículo³³ propone intercalar una capa de MoO_3 entre el electrodo y la capa activa. Esta capa de MoO_3 hace las veces de capa de extracción de huecos y además protege los materiales orgánicos en el proceso de deposición del ITO. La célula solar resultante consigue una eficiencia energética máxima de 2,1%.

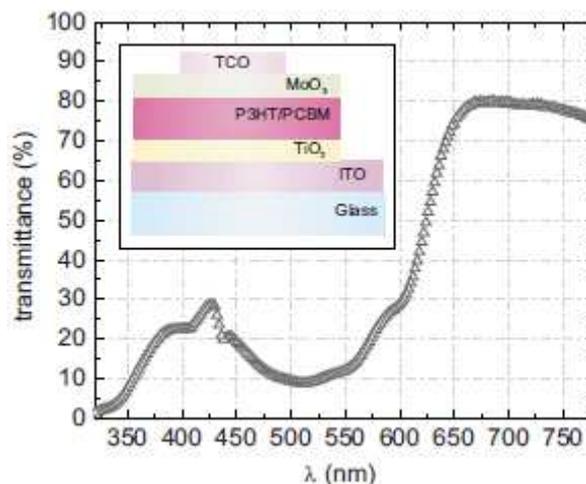


Figura 124. Transmitancia de una célula solar orgánica con una capa de 40nm de MoO_3 . Detalle de la estructura de dicha célula.

En este otro artículo³⁴ utilizan electrodos metálicos en células solares orgánicas de ZnPc:C60. Los electrodos propuestos son de Al/Ag. Obteniendo una eficiencia del 2,2% con un electrodo de 1nm de aluminio y 14nm de plata.

En el artículo³⁵ dicen de usar una solución de óxido de titanio como contacto selectivo de electrones que cubra al electrodo de ITO de una célula solar orgánica invertida. Consiguen una eficiencia del 3,1%. Este artículo propone usar un cátodo compuesto de Ag/ITO (con una transmitancia del 60%) para células solares orgánicas, obteniendo una eficiencia general de 0,28%. Incrementando el grosor de la capa de plata (baja la transmitancia al 26%) pero se obtiene una eficiencia de 0,62%. En una célula solar con estructura tándem se obtuvo una eficiencia de 0,48% y una transmitancia del 44%.



Figura 125. Ejemplo de la transparencia conseguida con esta propuesta.

En este artículo³⁶ proponen usar los electrodos por nanotubos de carbono para células solares orgánicas. Consiguiendo una eficiencia del 2,5%. La célula tiene una alta transmisibilidad cercana al 80% en el rango de 670 nm a 1,2 μm . La transmitancia baja al 60% en el rango de 1,2 μm a 2,5 μm .

3.2.2 Orgánicas

Por su extrema delgadez son las que dejan pasar la luz a su través más fácilmente sin lograr una transparencia cristalina. Esta última condición sería la más deseable de conseguir.

Como bien apuntan en un artículo³⁷ es un reto encontrar un polímero que tenga las propiedades requeridas para dispositivos de alto rendimiento, tales como una gran y fuerte absorción, una alta movilidad de portadores y los adecuados niveles de energía. Una posible solución para evitar los estrictos requerimientos de material es unir dos o más dispositivos con diferentes respuestas espectrales, dando a lugar a un uso más eficiente de la energía solar.

En el mismo artículo proponen un método de fabricación laminar capaz de producir células solares sin ninguna parte metálica, semitransparentes, flexibles, autoencapsulado y con una eficiencia del 3%:

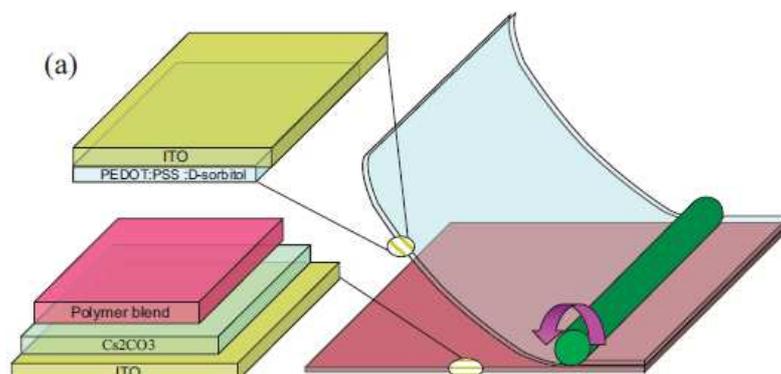


Figura 126. Método de fabricación laminar propuesto.

Para unir las distintas capas usan como elemento de unión PEDOT:PSS y la mezcla polimérica utilizada es una capa de RR-P3HT:PCBM de 200 nm de grosor. El aspecto más importante en este tipo de células son las características ópticas de la misma:

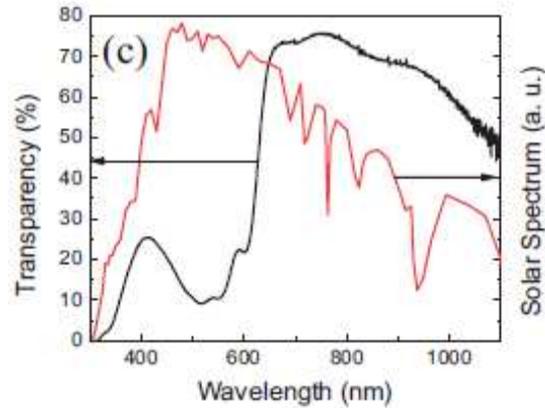


Figura 127. Grafica de transparencia general de la célula en función de la longitud de onda (línea roja) comparado con el espectro solar (línea negra). Se aprecia que la célula tendrá un aspecto rojizo.

Aspecto de la célula solar terminada:



Figura 128. Célula solar experimental fabricada mediante procesos laminares.

Los mismos investigadores continúan investigando³⁸ polímeros para células solares orgánicas de capas activas finas basadas en la heterounión de copolímero de polifluoreno y fullereno.

Otro artículo³⁹ explica la diferencia que supone recibir la radiación por su parte delantera o trasera en las células solares orgánicas. Las células solares del estudio están basadas en P3HT y PCBM con ITO como electrodo inferior y un electrodo superior metálico semitransparente.

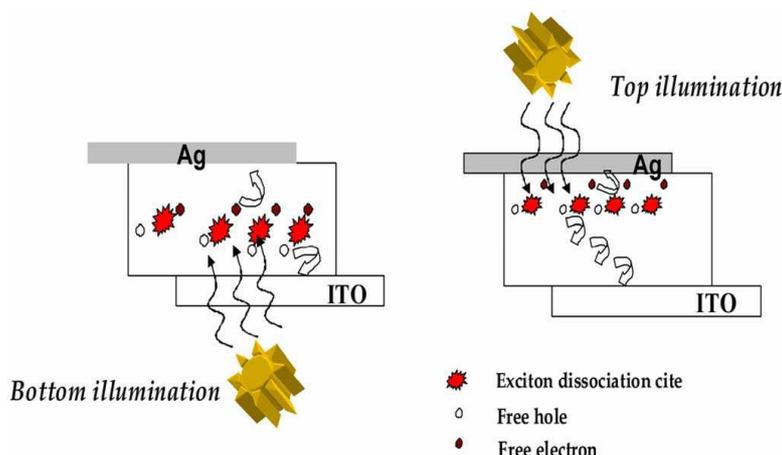


Figura 129. Diagrama explicativo sobre la diferencia de comportamiento en función de la dirección de la iluminación. En el caso de iluminación superior los huecos han de hacer un mayor recorrido hasta llegar al electrodo de ITO, recombinándose algunos por el camino.

La corriente de cortocircuito es mucho menor en el caso de iluminación por arriba debido a que se reduce 10 veces la intensidad del campo eléctrico en comparación a cuando se ilumina la célula desde abajo. Sin embargo la V_{oc} es mayor cuando se ilumina por abajo debido al mayor campo eléctrico ya que el voltaje de circuito abierto incrementa conforme lo hace la iluminación. La distribución del campo eléctrico también explicaría la reducción del 22% del factor de llenado (FF) cuando la iluminación se produce desde arriba.

Device	V_{oc} (V)	J_{sc} ($mA\ cm^{-2}$)	FF	PCE (%)
<i>Top illuminated:</i>				
18 nm silver	0.582	0.37	0.375	0.08
<i>Bottom illuminated:</i>				
18 nm silver	0.656	3.55	0.484	1.12

Figura 130. Datos obtenidos en los experimentos conducidos en la ref. 25.

Este comportamiento es debido a que con iluminación por la parte de abajo, los excitones fotogenerados se disocian como la heterounión entre el P3HT y el PCBM que forma una separación de 10 nm, mientras que con iluminación superior la intensidad del campo es mayor cerca del electrodo de polímero-plata y decae al mínimo cerca de la mitad de la capa P3HT:PCBM. Esto lleva a la formación por fotogeneración de excitones y una disociación cerca del electrodo de plata colector de electrones y lejos del electrodo de ITO colector de huecos. Además es ampliamente aceptado que la movilidad de huecos en el P3HT es menor que la movilidad de electrones en el PCBM. La conclusión del artículo es que dependiendo de nuestras necesidades hemos de elegir como recibir la radiación lumínica en nuestra célula solar orgánica por el distinto comportamiento que tendrá ya que las simulaciones de la intensidad del campo eléctrico muestran que su magnitud y distribución es mucho menos favorable con iluminación superior.

En el artículo⁴⁰ encontramos una propuesta de una célula solar orgánica compuesta por cristal/ITO/PEDOT:PSS(40 nm)/P3HT:PCBM(75 nm)/Ca(10 nm)/Ag(10nm)/ITO(60 nm) con una transmisión del espectro visible del 30% y una eficiencia de 1,7%.

3.2.3 Invertidas

Son células solares en las cuales se ha invertido el diagrama de bandas energéticas respecto a la arquitectura tradicional.

Comparación⁴¹ de una célula orgánica convencional y una invertida:

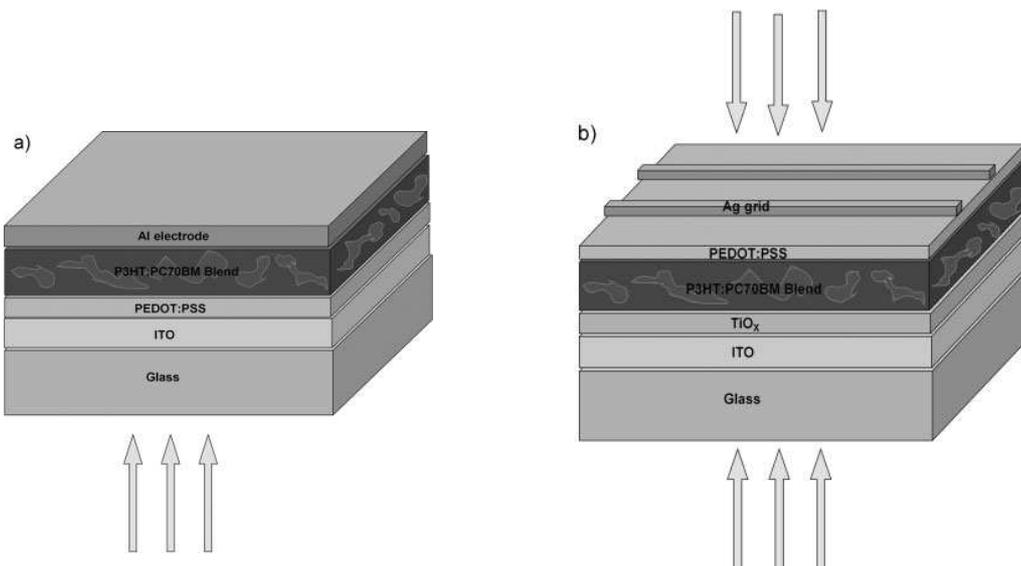


Figura 131. (a) Representación esquemática de una célula orgánica no transparente convencional. (b) Representación de una célula solar polimérica invertida semitransparente.

Se aprecia en los diagramas como la capa activa (PEDOT:PSS y P-HT) se coloca al revés en la invertida.

El siguiente estudio⁴² ha tratado de mejorar la eficiencia de las células solares orgánicas invertidas.

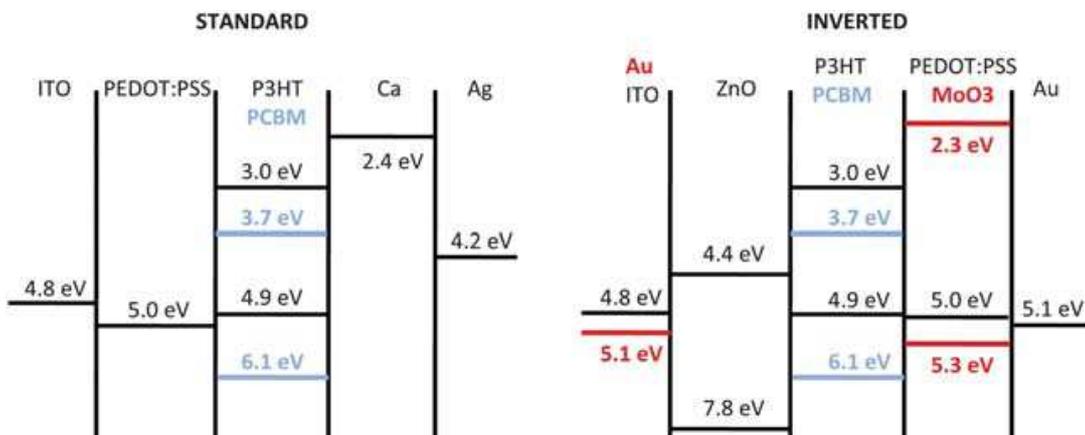


Figura 132. Niveles de energía en una célula solar estándar y en una invertida. En rojo aparecen valores alternativos obtenidos por el uso de otros electrodos rectificadores. El dispositivo esta construido de izquierda a derecha. La luz incide por la izquierda.

Muestran dispositivos fotovoltaicos en los que el contacto eléctrico estándar de ITO ha sido sustituido por electrodos metálicos ultrafinos de bajo coste.

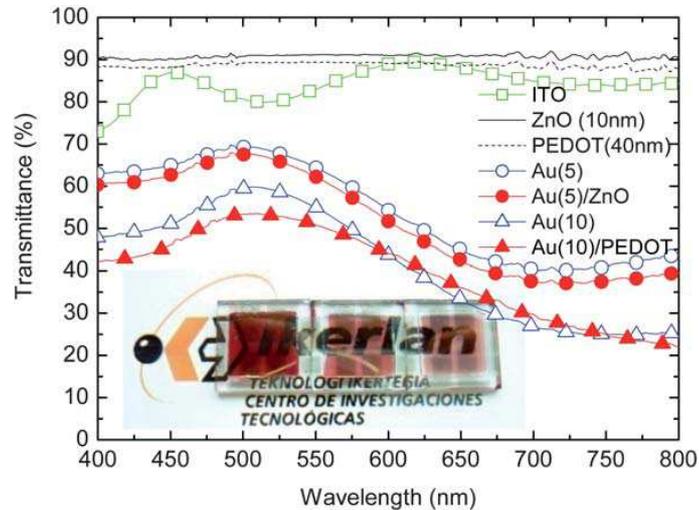


Figura 133. Transmitancia de los distintos electrodos probados. El grosor de las capas se indica entre paréntesis. Se puede ver además un ejemplo de la célula fabricada.

Los semiconductores de tipo n y tipo p capaces de ser fabricados por métodos de vacío y por soluciones hacen de electrodo con el comportamiento rectificador del diodo. De esta manera se puede invertir el campo eléctrico de la célula según se requiera y hacer el dispositivo deliberadamente tanto sensible por la parte superior como por la parte inferior, con la misma eficiencia en función de la aplicación. Con estos nuevos electrodos consiguen factores de llenado de ~70% y eficiencias del 3,5% en células solares orgánicas invertidas, del 2,5% en células sin ITO y del 2,6% en células solares semitransparentes.

Otro estudio⁴³ ha conseguido células solares orgánicas invertidas de gran superficie con una transparencia del 30% con métodos de fabricación en spray. La célula solar polimérica invertida consiste en cuatro capas, en el siguiente orden: ITO, Cs_2CO_3 , P3HT:PCBM y PEDOT:PSS modificado sobre un sustrato de cristal. Al usar PEDOT:PSS semitransparente como ánodo, el módulo solar terminado muestra una transmisión del 30% en el rango visible cercano al infrarrojo. La eficiencia obtenida por los módulos llegó al 1,8%.

Para la fabricación de la célula han propuesto un curioso patrón geométrico en sus capas:

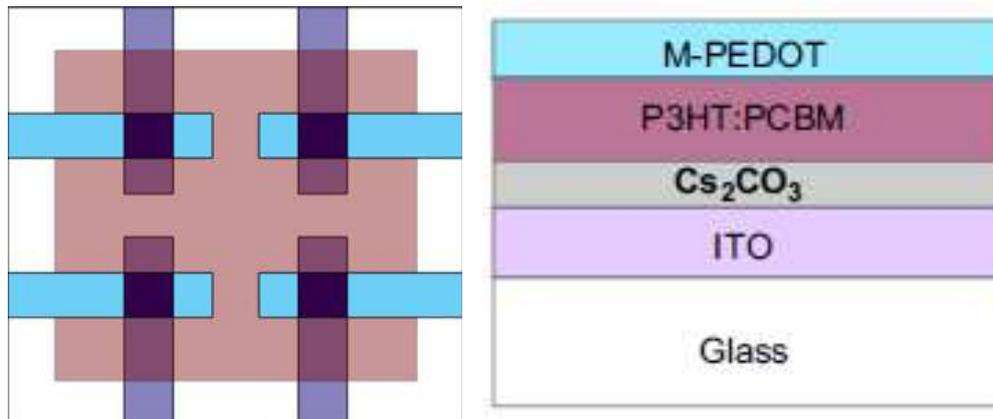


Figura 134. Esquema de la situación de las diferentes capas que componen la célula.

Graficas de comparación de la transmitancia obtenida con el compuesto modificado de PEDOT:PSS y el usado habitualmente en este tipo de células:

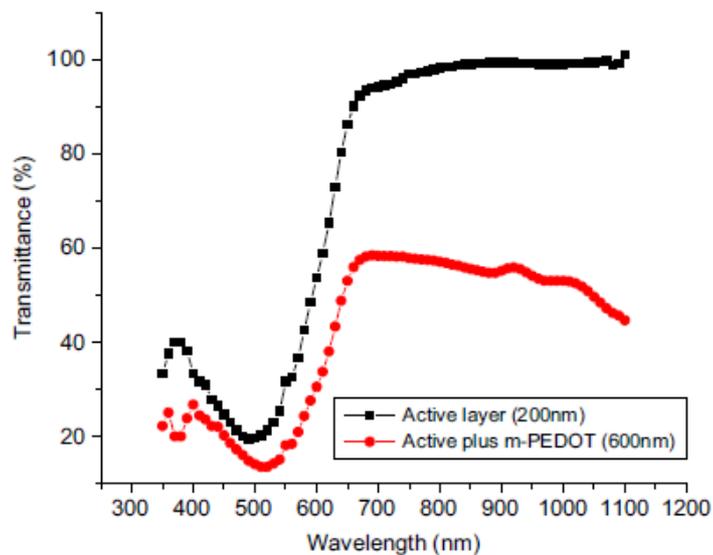


Figura 135. Espectro de transmisión de una capa activa de P3HT:PCBM de 200nm y la de la capa modificada de PEDOT:PSS de 600nm.

En el estudio descubrieron que se conseguía aumentar bastante la eficiencia de conversión energética de la célula con un recocido:

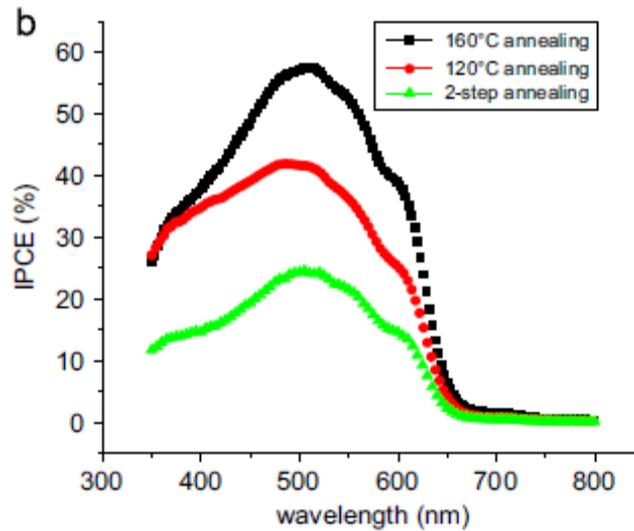


Figura 136. Eficiencia en el espectro de radiación con un tratamiento de recocido a distintas temperaturas.

Siendo este último proceso el factor que más incrementó la eficiencia de la célula solar polimérica invertida.

Otro artículo⁴⁴ propone utilizar una capa intercalada de poli(alilamina clorhidrato) y dextrano (PAH-D) para modificar la humectabilidad de la superficie de P3HT:PCBM para depositar el ánodo de PEDOT:PSS PH500. A la vez que aumenta la adhesión de la unión entre las capas. La mayor eficiencia conseguida en una célula solar polimérica invertida con este método es del 1,86%

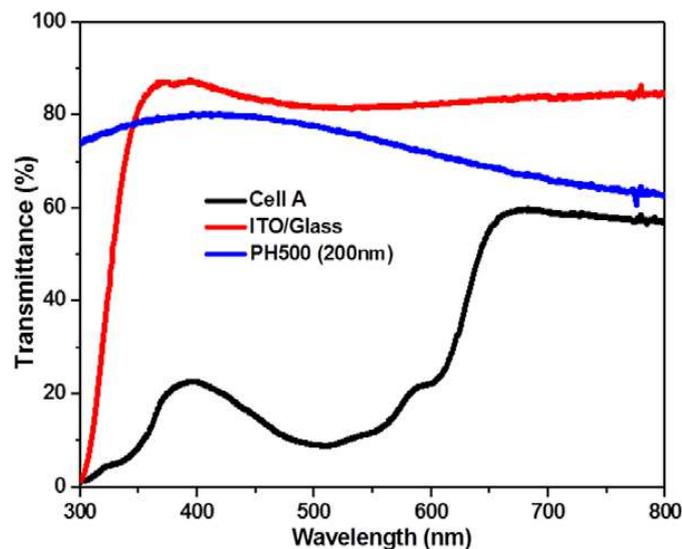


Figura 137. Espectro de transmisión de la célula final, del sustrato y del ánodo utilizados.

En otro artículo⁴¹ sugieren utilizar como electrodo en las células solares poliméricas invertidas una capa de PEDOT:PSS PH500 y una red de plata simultáneamente. La célula solar que proponen esta compuesta de P3HT:PC70BM en una estructura invertida. Consiguen una eficiencia del 2% cuando se iluminan a la vez ambas caras de la célula solar. La curiosidad del artículo es que calculan la transparencia en función de la percepción de transparencia del ojo humano.

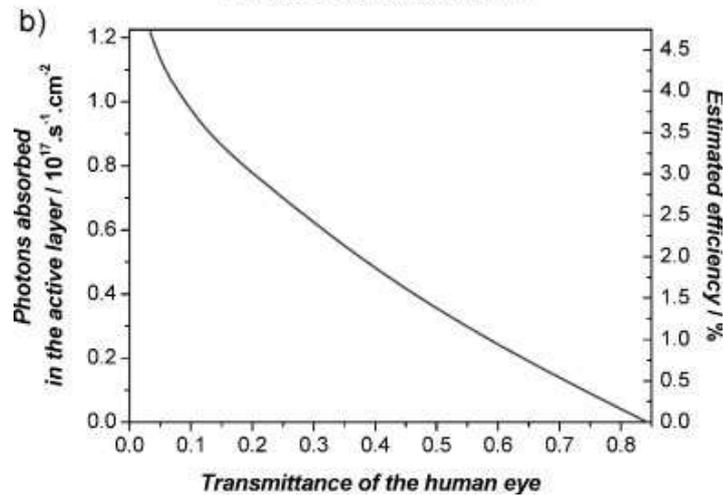


Figura 138. Grafica que compara los datos calculados de eficiencia y de numero de fotones capturados por la capa activa de P3HT:PC70BM con la percepción de transparencia del ojo humano para una célula con $V_{oc} = 0,55V$, $FF = 0,55$ y IQE (Eficiencia cuántica interna)= 80%.

Han estudiado el color de la transparencia de la célula conforme incrementan el grosor de distintas capas activas. En el caso del P3HT:PC70BM cuando esta cercano a los 500 nm se torna rojizo, el P3HT:PC60BM se volvería amarronado, el PCPDTBT:PC70BM adquiriría un tono amarillento y el PCPDTBT:PC60BM adquiere tonos verdosos.

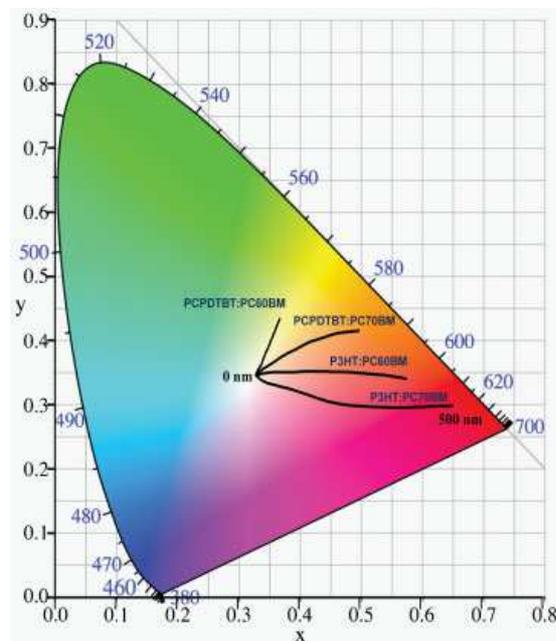


Figura 139. Representación de las coordenadas de color de los distintos dispositivos transparentes al variar el grosor de la capa activa de 0 a 500nm.

Sugieren que el uso de materiales con una banda de gap baja como el PCPDTBT puede tener un mejor potencial para dispositivos semitransparentes.

El artículo⁴⁵ propone mejorar las células invertidas intercalando una capa de oxido de polietileno entre el electrodo de ITO y las capas activas mejorando cuatro veces la eficiencia de producción de energía con respecto de la misma célula sin esta capa extra. Llegando hasta 0,54%, aunque los autores piensan que podrían lograr alcanzar una eficiencia del 0,7%.

El artículo⁴⁶ propone una solución mas original al enrollar sobre si misma la célula solar invertida.

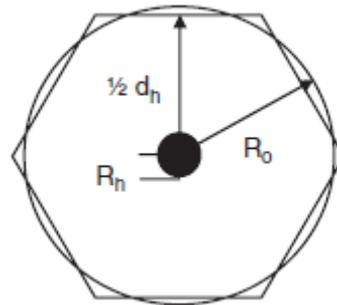


Figura 140. Corte de la sección de la célula propuesta.

De esta forma aseguran poder prescindir del caro electrodo de ITO. En este concepto, el contacto del agujero esta hecho de PEDOT:PSS, el cual se conecta mediante agujeros en la célula solar con una capa metálica de baja resistencia. El dispositivo experimental alcanzó una eficiencia de 1,1~2%.

En el artículo⁴⁷ encontramos un estudio comparativo de distintos polímeros usados en células solares orgánicas tanto normales como invertidas.

Este otro artículo⁴⁸ utilizan capas intermedias de oxido de vanadio (V_2O_5) y carbonato de cesio (Cs_2CO_3) en células solares orgánicas invertidas de P3HT:PCBM obteniendo una eficiencia del 2,25%.

3.2.4 Colorante

Para mejorar las propiedades de las células sensibilizadas por colorante es importante seguir investigando para buscar el colorante idóneo que se adecue a nuestras necesidades, ya sean estas una mejor eficiencia o una mayor transparencia al rango lumínico visible.

Un artículo⁴⁹ propone usar la 4-fenilpiridina como ligando secundario para compuestos de rutenio (II) como sensibilizante de electrodos de TiO₂ tipo n. Los compuestos exactos estudiados con el $\text{cis} - [(\text{dcbH}_2)_2\text{Ru}(\text{ppy})_2]^{2+}$ y el $\text{cis} - [(\text{dcbH}_2)_2\text{Ru}(\text{ppy})(\text{H}_2\text{O})]^{2+}$ siendo el $\text{dcbH}_2 = 4,4' - (\text{CO}_2\text{H})_2 - 2,2' - \text{bipiridina}$ y el $\text{ppy} = 4\text{-fenilpiridina}$. Se adjunta una grafica de la absorción conseguida por cada uno:

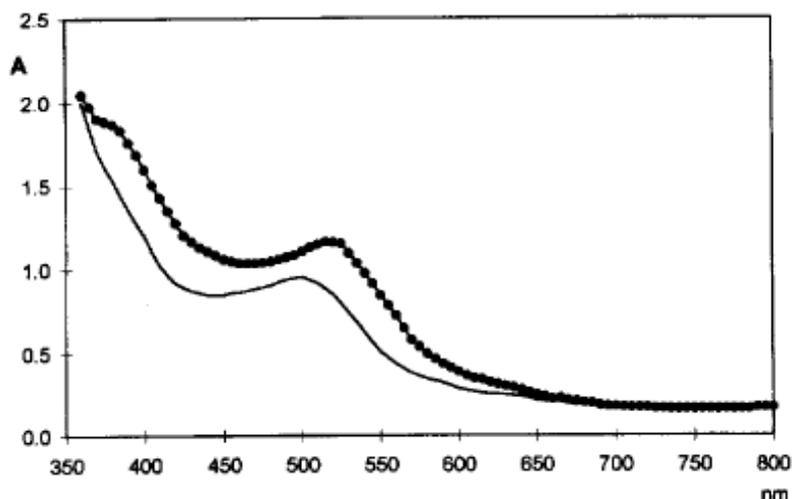


Figura 141. Absorción del $[(\text{dcbH}_2)_2\text{Ru}(\text{ppy})_2](\text{ClO}_4)_2$ (línea continua) y del $[(\text{dcbH}_2)_2\text{Ru}(\text{ppy})(\text{H}_2\text{O})](\text{ClO}_4)_2$ (línea punteada) absorbidos en TiO₂ que recubren electrodos de TCO.

También proporcionan una grafica de la eficiencia obtenida con cada uno de los compuestos que proponen:

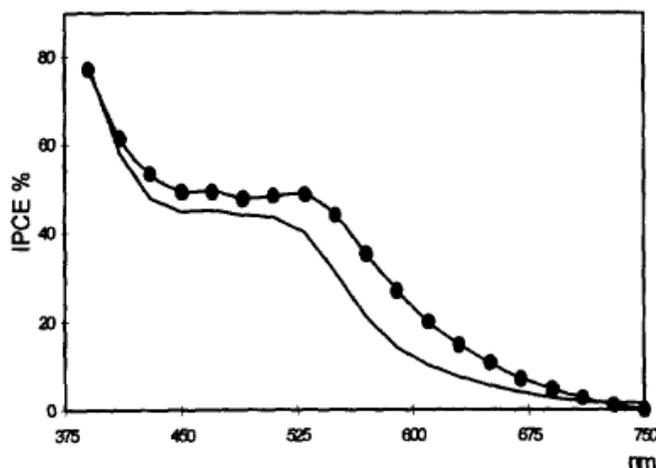


Figura 142. Eficiencia de conversión energética del $[(\text{dcbH}_2)_2\text{Ru}(\text{ppy})_2](\text{ClO}_4)_2$ (línea continua) y del $[(\text{dcbH}_2)_2\text{Ru}(\text{ppy})(\text{H}_2\text{O})](\text{ClO}_4)_2$ (línea punteada) en función de la longitud de onda.

El artículo concluye que ha mejorado la respuesta espectral del TiO₂ a la luz visible con el uso de los colorantes sugeridos, llegando a alcanzar ~50% para longitudes de onda de 550 nm.

Un artículo⁵⁰ busca la optimización de las células solares sensibilizadas por colorante de gran tamaño. Proponen hacer células con una transparencia en la región visible del 50% con una moderada eficiencia del 1%, sin embargo consiguen una gran esperanza de vida para la célula.

El uso en células solares sensibilizadas por colorante de electrolitos poliméricos gelificados preparados por la incorporación de electrolito líquido en una matriz polimérica como el polimetilmetacrilato presenta resultados alentadores. Se consiguió una corriente de cortocircuito de 4,45 mA/cm² con un voltaje de circuito abierto de 0,5 V en la célula solar estándar sensibilizada con cis-bis(tiociano) rutenio(II)-bis-2,2'-bipirideno-4,4'-dicarboxilato. Tests a gran escala demuestran que sería fácil fabricar un módulo de 625 cm² conectados en serie que podrían llegar a producir hasta 100mW con una $I_{sc} = 25,1$ mA y una $V_{oc} = 10,65$ V en condiciones estándar de iluminación.



Figura 143. Módulo solar sensibilizado con colorante de 100 cm² con una transparencia del 50% en el rango de 400~800 nm compuesto por 9 elementos fotovoltaicos de 4,5cm² conectados en serie.

Podemos encontrar una revisión de las eficiencias conseguidas por distintos colorantes en este artículo⁵¹.



Figura 144. Ejemplo de las distintas tonalidades que pueden adquirir las células solares sensibilizadas por colorante.

En este artículo⁵² podemos encontrar un resumen de distintos tipos de colorantes usados en las células solares sensibilizadas con una eficiencia máxima del 8%.



Figura 145. Ejemplo de célula solar sensibilizada por colorante semitransparente.

En el artículo⁵³ podemos encontrar otro resumen de tecnologías de colorante y el comentario de que estamos bastante cerca de conseguir eficiencias del 15%.

En este artículo⁵⁴ proponen un proceso de absorción de dos fotones en células solares sensibilizadas por colorante. Se trata de una investigación todavía en desarrollo.

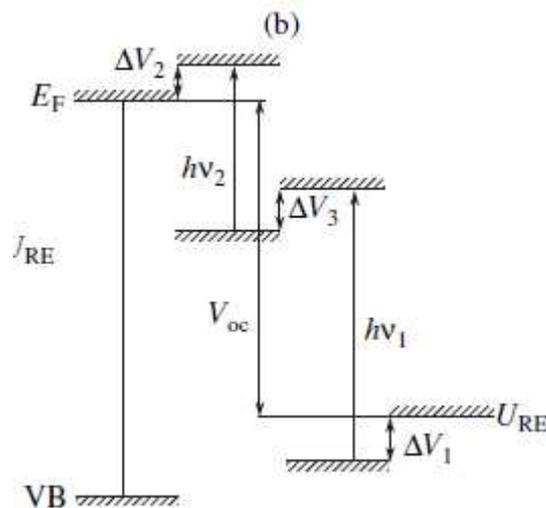


Figura 146. Esquema de energía del concepto de célula solar sensibilizada por colorante de dos fotones. Siendo VB la banda de valencia y E_F la energía de Fermi ambas del dióxido de titanio y U_{RE} es el potencial de reducción del electrolito.

3.2.5 Silicio

También incluso se ha intentado⁵⁵ hacer lo mas transparente posible a células solares de silicio amorfo, aunque las transparencias obtenidos son muy reducidas.

Sin embargo, mejores resultados ha obtenido el siguiente artículo con células solares de silicio amorfo con una transmisión de más del 40% y una eficiencia del 3%.



Figura 147. Ejemplo de células solares de silicio amorfo obtenidas.

4. Cálculos energéticos del uso de células semitransparentes

Un dato a tener en cuenta aparece en el estudio⁵⁶ que relaciona la cantidad de luz que entra a un edificio con el consumo eléctrico que esto conlleva. Una primera reflexión que hace este estudio es que a mayor transparencia menor gasto en luz artificial por el oscurecimiento producido en las estancias con ventanas. Por lo tanto sugiere que es recomendable alcanzar grandes transparencias a pesar de la pérdida de eficiencia ya que se verá recompensado energéticamente.

Graficas obtenidas mediante simulaciones en un edificio de oficinas (acristalado):

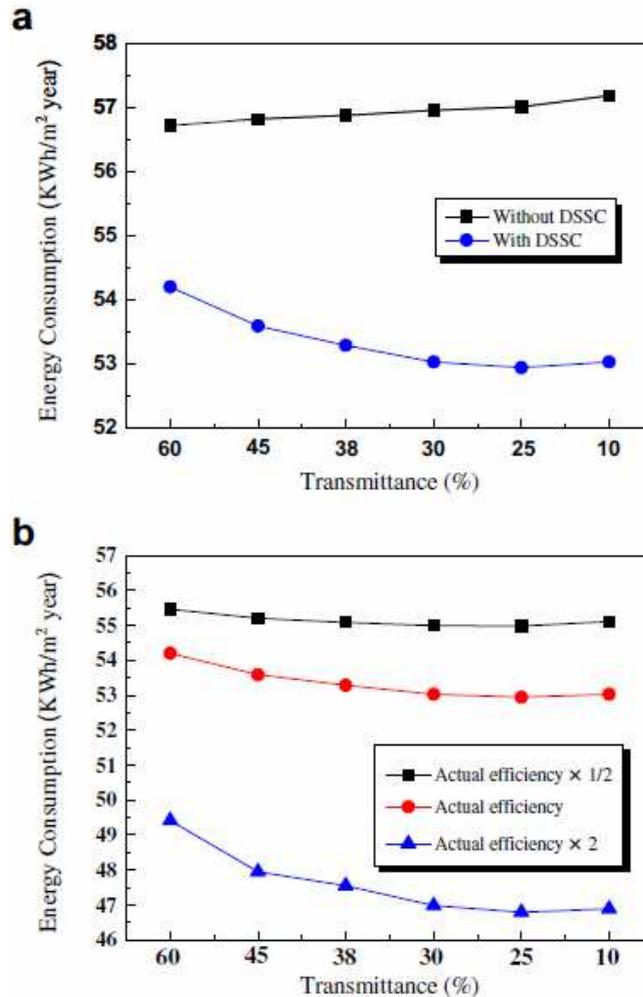


Figura 148. (a) Comparación de una ventana y una célula solar sensibilizada por colorante (DSSC) en términos de consumo energético, (b) comparación de la energía total consumida variando la eficiencia del DSSC.

El menor consumo energético se consiguió en simulaciones con paneles solares con un 25% de transmitancia. Esto se debe a la producción eléctrica de las células solares sensibilizadas por colorante comparadas con la energía usada cuando la transmitancia de las ventanas varía entre el 60 y el 10%. Los resultados de esta simulación muestran que un 25% de transmitancia de la célula solar sensibilizada por colorante dan a lugar al mínimo consumo de energía cuando se instalan ventanas fotovoltaicas de este tipo en los cuatro costados del edificio. La energía ahorrada por las células solares sensibilizadas por colorante es del 11,61% en el caso de 25% de transmitancia.

Otro estudio⁵⁷ busca los valores del ratio ventana-muro y de transparencia que proporcionan un mayor ahorro en el consumo eléctrico y una mayor producción energética por parte de las ventanas fotovoltaicas. Estos datos los fijan en una transmitancia del 40% y un ratio ventana-muro del 50% cuando la iluminación es controlada por la iluminación solar. Usando las ventanas fotovoltaicas adecuadas se conseguía reducir el consumo eléctrico un 55% comparado con el ahorro conseguido solamente con ventanas de una capa con un ratio ventana-muro del 30%.

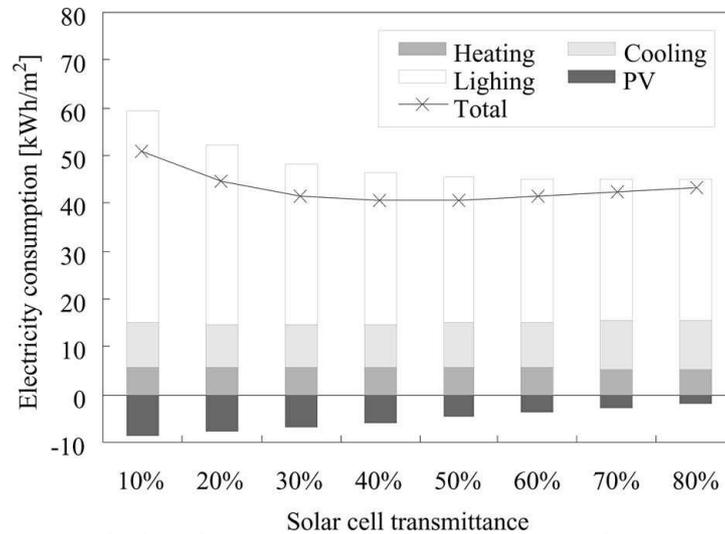


Figura 149. Grafica que relaciona la transmitancia de la célula con el consumo eléctrico.

Se comprobó que transmitancias tenían que tener las células solares para obtener los mejores resultados según el ratio ventana-muro que tenga el edificio:

Ratio ventana-muro	Transmitancia
30%	80%
40%	60%
50%	40%

Figura 150. Tabla de transmitancias en función del ratio ventana-muro.

Se estudiaron distintas configuraciones en el edificio para comparar los consumos eléctricos:

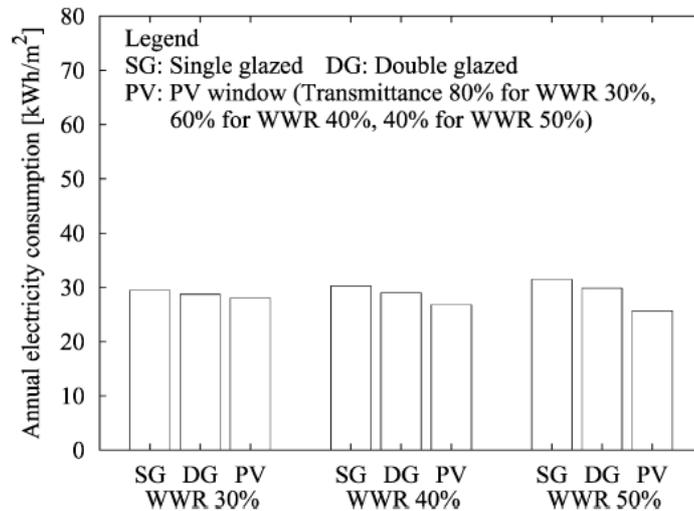


Figura 151. Grafica que compara distintas posibles instalaciones (cristales de una capa, de doble capa y ventanas fotovoltaicas) con el ahorro eléctrico que consiguen:

Podemos observar que los datos se mantienen bastante iguales sin producir grandes variaciones.

Cálculos económicos y energéticos

Los siguientes datos provienen de un análisis energético y económico sobre la instalación de paneles fotovoltaicos semitransparentes en un edificio de oficinas⁵⁸. El estudio quiere demostrar que se pueden usar ventanas fotovoltaicas semitransparentes para generar electricidad que contribuyan a reducir las necesidades energéticas y la demanda de refrigeración. Los beneficios energéticos, económicos y ambientales los han calculado sobre ejemplos del sistema de aire acondicionado genérico de un edificio de oficinas. La simulación se situó en Hong Kong (situado en el subtropical del hemisferio norte), donde hay una gran densidad de altos edificios (de 20 o más plantas). La mayoría de los edificios tienen las fachadas cubiertas por cristalerías tintadas. El ratio ventana por pared de estos edificios se estima en 0.43. Por lo que se creará un modelo genérico con estos datos que se usará como referencia para comparar y evaluar. El edificio de referencia es un bloque de oficinas de 40 pisos de planta cuadrada (35 x 35 m) con sus fachadas encaradas al noreste, sureste, suroeste y noroeste. La altura de planta a planta es de 3,5 m y las ventanas son de 1,5 m de altura consiguiendo un ratio ventana-pared del 43%. Aspecto de una planta del edificio:

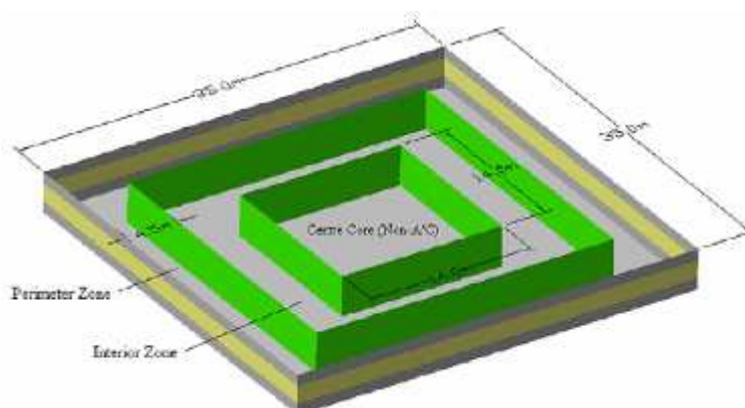


Figura 152. Disposición típica de una planta de un edificio de oficinas genérico.

Consumo eléctrico anual

Se simularon cuatro casos de gastos eléctricos del edificio en un año. La siguiente grafica muestra los beneficios eléctricos (electricidad generada más la electricidad ahorrada) de cada caso estudiado comparado con el caso de comparación (Caso i):

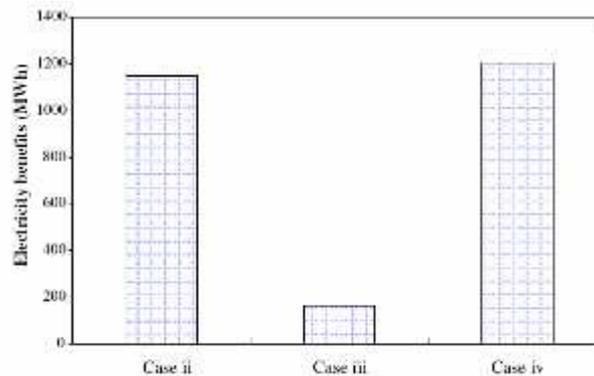


Fig. 8. The electricity benefits (electricity generated plus electricity saved) for cases ii, iii and iv.

Figura 153. Beneficios eléctricos (electricidad generaba mas la ahorrada) en los casos ii, iii y iv.

Sin ningún tipo de obstrucción externa, las cuatro fachadas de varias plantas están expuestas al cielo directamente lo que les hace recibir más luz solar. En el Caso ii en el que se usan reguladores de oscuridad (dimmers: reguladores de intensidad de luz), la energía lumínica anual disminuye significativamente cerca de 903 MWh. Anteriores simulaciones mostraron que la consumo de electricidad anual para el caso base (Caso i) era de alrededor de 10 GWh y la reducción de energía lumínica representaba sobre el 9% del total de energía que usa el edificio. El análisis también indica un pequeño ahorro de 246 MWh en los requerimientos de refrigeración resultado de unas ganancias de calor menos sensibles producidas por el equipamiento de luz artificial. Cuando los paneles fotovoltaicos semitransparentes fueron instalados en la fachada suroeste (Caso iii), la electricidad anual generada fue de aproximadamente 94 MWh alcanzando menos del 1% del consumo de energía anual del edificio.

Por otra parte, los paneles fotovoltaicos semitransparentes pueden bloquear parte del calor solar que entra en el interior del edificio, reduciendo los requerimientos de refrigeración anual 69 MWh. Cuando se combinaron los reguladores de oscuridad con las fachadas solares semitransparentes (Caso iv), se obtuvieron mayores ahorros energéticos debido a la electricidad necesaria en este caso. El ahorro de electricidad anual (electricidad generada y ahorrada) fue de 1203 MWh, alcanzando el 12% del gasto de la electricidad consumida en un año en el edificio.

Pico de demanda de refrigeración

Los picos de consumo eléctrico ocurren siempre que tienen lugar los picos de demanda de refrigeración, esto es así ya que la electricidad gastada en iluminación que se consume día a día no sufre grandes variaciones de un día a otro. Este dato no es inesperado ya que el aire acondicionado supone cerca del 50% de la electricidad total usada en edificios de oficinas con gran necesidad de refrigeración. Conocer los picos de demanda de refrigeración es útil para dimensionar el equipamiento necesario y la maquinaria de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC plant).

Los costes iniciales y las estrategias de operación están afectados por las demandas máximas aunque la energía de refrigeración anual consumida no se vea afectada significativamente. Los picos de carga de refrigeración se determinaron para varios casos y se muestra en la siguiente grafica donde se compara las reducciones de carga con el caso base (Caso i):

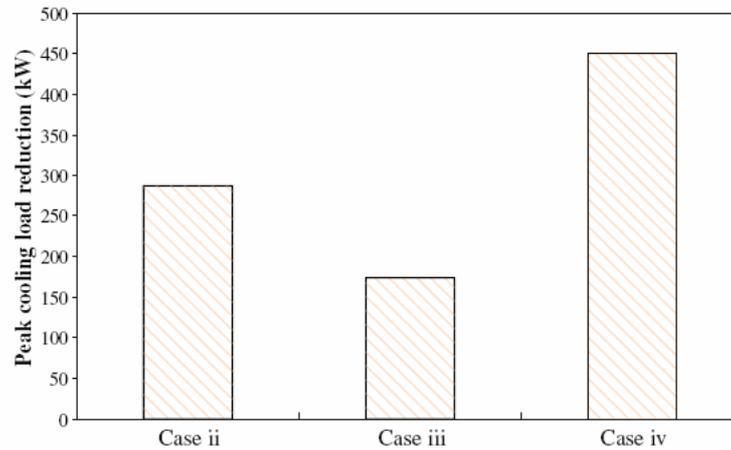


Figura 154. La reducción del pico de carga para los casos ii, iii y iv.

Cuando se utilizaron controles de luz solar (Caso ii), la carga de electricidad para iluminación decreció sustancialmente. Con ganancias de calor menos sensibles a la iluminación eléctrica, el pico de demanda de refrigeración se redujo 287 kW. Cuando se instalaron los paneles fotovoltaicos semitransparentes en la fachada suroeste (Caso iii), la demanda de refrigeración máxima bajó 173 kW. En el Caso iv se consideran a la vez tanto las fachadas fotovoltaicas semitransparentes como los reguladores de oscuridad, el pico de carga de refrigeración decreció 450 kW. Los resultados apoyan que el uso conjunto de la fachada fotovoltaica semitransparente y el control de iluminación según la luz solar recibida es una solución efectiva para reducir la carga de refrigeración del edificio en regiones subtropicales y que dichos sistemas dobles son una estrategia de diseño apta para edificios de oficinas con aire acondicionado.

Beneficios medioambientales

La amenaza al medioambiente global que supone las emisiones de la combustión de los combustibles fósiles se ha convertido en una fuerza poderosa para usar energías renovables y sostenibles. En Hong Kong, la electricidad es producida sobre todo quemando combustibles fósiles en dos compañías energéticas locales. Los gases de efecto invernadero y contaminantes producidos en la generación de electricidad son considerados unos de las mayores causas de contaminación del aire local. En la siguiente tabla se resume la electricidad generada y los gases emitidos por una de las compañías energéticas antes mencionadas:

Electricity generated	23809 GWh
CO ₂	16867 × 10 ³ ton
SO ₂	51800 ton
NO _x	28600 ton
Particulates	2200 ton

Figura 155. Generación eléctrica y emisiones de gas producidas por la compañía “China Light and Power” en el 2004

La electricidad anual producida por esta compañía energética fue de aproximadamente 23800 GWh y el CO₂ fue el gas de efecto invernadero emitido en mayor cantidad con una cantidad de mas de 16860 kton. Otros contaminantes, las emisiones fueron bastante menores que la del CO₂, que van desde 2,2 kton para partículas suspendidas a 51,8 kton para el SO₂. Los beneficios medioambientales pueden ser predichos basándose en los resultados calculados. En la siguiente grafica se presenta la reducción anual de CO₂, SO₂, NO_x y de partículas suspendidas para los tres casos:

Case	ii	iii	iv
CO ₂	814	115	852
SO ₂	2.50	0.36	2.62
NO _x	1.38	0.20	1.45
Particulates	0.11	0.02	0.11

Figura 156. Reducción de emisiones en toneladas para los casos ii, iii y iv.

En general, los beneficios medioambientales son significativos. La reducción anual de emisiones de CO₂ puede llegar a 852 ton. Dado que el sector comercial es el destinatario principal de energía consumiendo dos tercios del total del consumo energético en edificios, los beneficios medioambientales de usar diseños capaces de aprovechar la luz solar y que usen sistemas fotovoltaicos son muy sustanciales.

Beneficios económicos

También se realizó el estudio financiero para tener una mayor justificación para el usuario. Se asumió que la energía generada por el sistema de cubierta fotovoltaica fuera inyectada a la red de distribución para un posterior uso y la tarifa eléctrica media para uso comercial era de 0,974 \$HK/kWh (~0,125 \$/kWh). El ahorro anual en la factura de la luz sería producto de la tarifa eléctrica media (0,974 \$HK/kWh) por el ahorro eléctrico conseguido (la electricidad no consumida y la generada) para casos individuales. Los costes iniciales incluyendo los módulos fotovoltaicos semitransparentes y la instalación eléctrica adicional para los reguladores de oscuridad fueron estimados. Se asumió que los costes del cableado eléctrico y del trabajo adicional podían ser incluidos en los costes de construcción por lo que no fueron considerados para determinar el periodo de retorno de la inversión. El coste del sistema fotovoltaico semitransparente, los inversores y el cableado fue de 10029 \$HK/m² (~1286 \$/m²) y de 1000 \$HK/m² (~128 \$/m²) para los cristales tintados. Para los controles de oscuridad, los precios de mercado para cada fotosensor así como de los componentes electrónicos de regulación y los demás componentes electrónicos restantes fueron respectivamente de 550 \$HK (~70 \$), 230 \$HK (~30 \$) y 80 \$HK (~10 \$).

Aparte de la tarifa eléctrica, una planta de refrigeración de menor coste podría ser seleccionada para la instalación al disminuir el pico de demanda de refrigeración. Se asumió el coste de la planta de refrigeración en 910 \$HK/kW (117 \$/kW). Recientemente, una compra-venta de la tasa de emisión de CO₂ se ha puesto en marcha para apoyar la mejora del medio ambiente y se adoptó una tasa de mercado de 0,219 \$HK/kg (~0,028 \$/kg). Teniendo en cuenta todos estos costes, se estimaron los periodos de retorno de la inversión para los casos estudiados y se muestran en la siguiente grafica:

Case	ii	iii	iv
Payback (considering electric tariff only)	1.8	119.4	17.9
Payback (considering electric tariff, chiller plant cost and CO ₂ trading)	1.3	102.1	15.1

Figura 157. Periodos de retorno económico en años para los casos ii, iii y iv.

Si solo se considerase la tarifa eléctrica, los periodos estimados de retorno son de 1,8 años para el Caso ii, 119,4 años para el Caso iii y 17,9 años para el Caso iv. Cuando se incluyeron el coste de la planta de refrigeración y el de la tasa de emisiones de CO₂, los periodos de retorno se redujeron a 1,3, 102,1 y 15,1 años para los Casos ii, iii y iv respectivamente. Una vez más, los resultados demuestran que el aprovechamiento de la luz solar es una forma efectiva de ahorrar energía mejorando la eficiencia y conservación energética de los edificios.

Conclusiones

Se realizaron mediciones de campo de un modulo fotovoltaico de silicio amorfo semitransparente. Se midieron los parámetros más importantes que incluyan la iluminación diaria, irradiancia solar y la energía generada. La luz visible medida media era del 11,7%, la transmitancia de la irradiación solar era de 11,4% y la eficiencia media de conversión eléctrica fue de 6,3%.

Se llevaron a cabo estudios de los casos basados en la referencia genérica de un edificio de oficinas para comprobar la eficiencia de estos sistemas fotovoltaicos en términos energéticos, medioambientales y económicos. Cuando se usaron conjuntamente los paneles fotovoltaicos semitransparentes con los controles de oscuridad el ahorro anual

de electricidad del edificio bajó 1203 MWh y la reducción del pico de carga de refrigeración fue de 450kW. Desde el punto de vista del medio ambiente, las emisiones anuales de CO₂, SO₂, NO_x y de partículas en suspensión pueden ser reducidas respectivamente 852, 2,62, 1,45 y 0,11 toneladas. En el aspecto financiero, el retorno de la inversión para 15 años fue estimada si la tarifa eléctrica, el coste de la planta de refrigeración y las tasas de emisión de CO₂ fuesen consideradas.

Las fachadas fotovoltaicas integradas en los edificios (BIPV) semitransparentes producen electricidad, reducen la ganancia de calor solar y facilitan diseños con una mejor entrada de luz solar, los cuales reducen el consumo de energía eléctrica y las necesidades de refrigeración. Usar instalaciones integradas puede reducir los costes de construcción.

Los resultados pueden ayudar a arquitectos y profesionales de la construcción a estimar los beneficios que se obtendrán usando estos diseños de edificios y contribuir así al establecimiento de las energías renovables y sostenibles para conseguir un medioambiente más saludable.

Otros

Hay numerosos artículos que presentan los cálculos energéticos, medioambientales y económicos del uso células solares transparentes integradas en edificios:

- Encontramos en este artículo⁵⁹ una recopilación del rendimiento térmico, la generación de electricidad, modelos de iluminación solar y el potencial de ahorro energético en aplicaciones residenciales de BIPV en distintas ciudades japonesas.
- Este artículo⁶⁰ hace un estudio térmico de un edificio que utilice células solares semitransparentes como fachada.
- El siguiente artículo⁶¹ estudia el rendimiento de unas ventanas fotovoltaicas basadas en tiras de prismas, parecido a una persiana. Es semitransparente ya que según se incline los componentes del módulo deja pasar la luz
- Realizan en este otro⁶² un estudio térmico y eléctrico de módulos fotovoltaicos semitransparentes para edificios.
- Este otro artículo⁶³ es un poco más genérico ya que estudia aplicaciones energéticas y medioambientales de varios tipos de cristal. Pudiéndose aplicar a nuestra línea de estudio si se usa cristal como sustrato.
- En este estudio⁶⁴ comparan el rendimiento de varias cubiertas fotovoltaicas para ser usadas en edificios de zonas calidas.
- Comprueban el comportamiento térmico de un sistema de células solares refrigeradas semitransparentes para cubiertas de edificios en este artículo⁶⁵.
- En el artículo⁶⁶ siguiente estudian los beneficios energéticos y económicos de claraboyas fotovoltaicas semitransparentes.
- En este⁶⁷, analizan la generación de electricidad de un módulo fotovoltaico de capa fina integrado en un edificio (BIPV).

5. Usos

A continuación se agrupan los distintos casos en los que se han usado células solares transparentes.

5.1 Integración arquitectónica

Hay numerosa información y artículos de cómo integrar las células solares transparentes en edificios (BIPV), suelen ser una recopilación de ideas generales para arquitectos e ingenieros de cómo realizar tal integración. Hay una guía básica⁶⁸ con las nociones para entender saber que componentes son necesarios llevar a cabo una instalación:

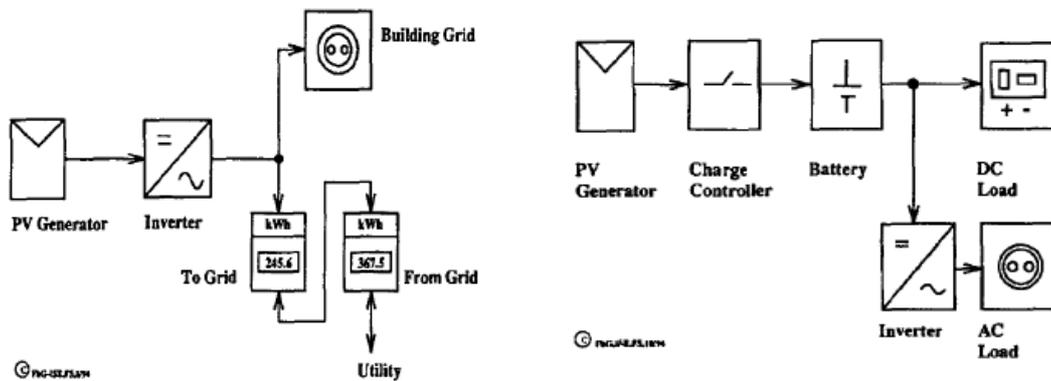


Figura 158. Diagramas eléctricos de una instalación fotovoltaica conectada a red (izq.) y aislada (der.).

Otro artículo⁶⁹ propone mejorar aun mas la eficiencia de los paneles solares integrados en edificios utilizando concentradores. Realiza un estudio de varios tipos de concentrador:

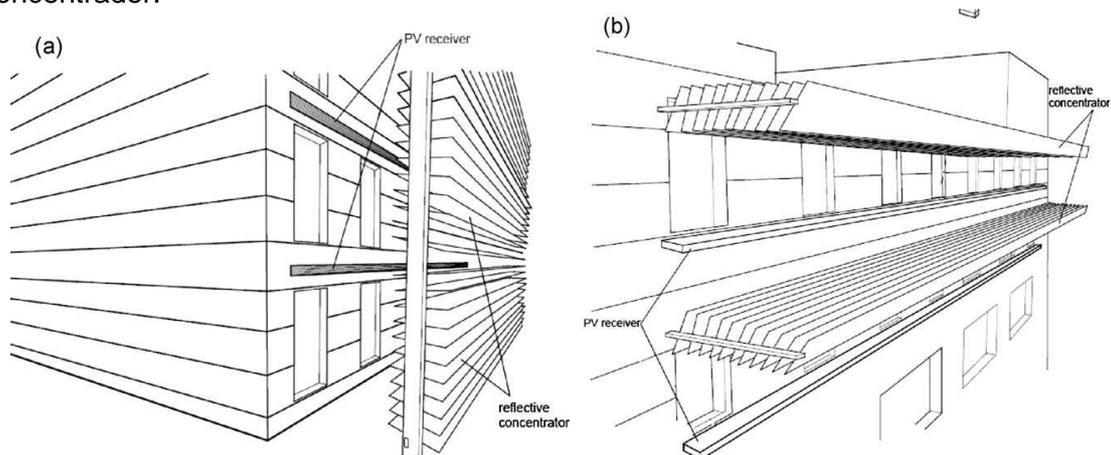


Figura 159. Configuraciones de armazones para edificios con concentradores: verticales (a) y horizontales (b).

Un resumen de tipos de concentradores solares para usarlos con células fotovoltaicas lo podemos encontrar en el siguiente artículo⁷⁰.

Se ha investigado⁷¹ también usar módulos fotovoltaicos con la capacidad de cambiar su transparencia con la aplicación de corriente:

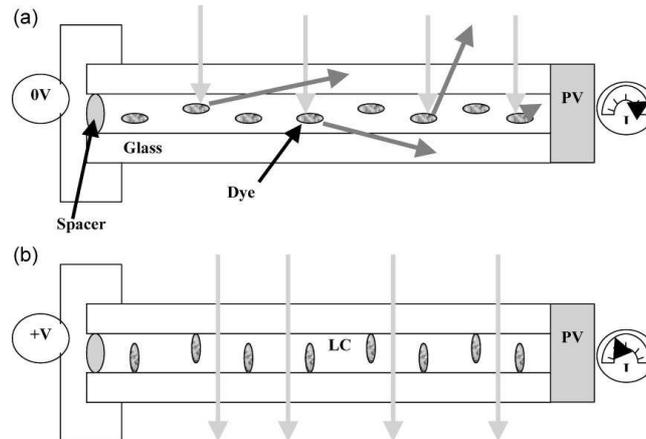


Figura 160. Dibujo de marco fotovoltaico con partículas electrocrómicas en su modulo.

Otro estudio⁷² trata de unir el electrocromismo y las células fotovoltaicas en un solo dispositivo:

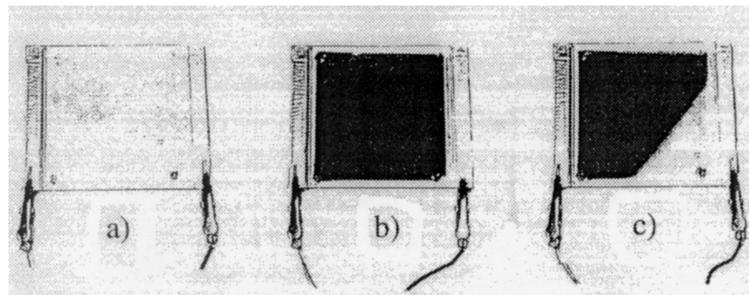


Figura 161. Modulo fotovoltaico electrocrómico autoficiente.

No son los únicos que descartan el electrocromismo en una célula solar, ya que podemos encontrar un estudio sobre el tema en el artículo⁷³.

Hay un documento⁷⁴ donde podemos encontrar ejemplos de aplicaciones reales de soluciones fotovoltaicas en edificios, pudiendo comprobar que esta empezando a generalizarse el uso de esta tecnología integrada en edificios.



Figura 162. Estación de tren Lehrter en Berlín (Alemania) de módulos fotovoltaicos transparentes.

Aparte de tener un buen resumen de tecnologías y otros datos interesantes básicos para conocer, hace además estimaciones del techo aprovechable en partes del mundo para instalaciones solares:

Available Roof Surface					
	Net Available Solar Surface (Km ²)	Installable PV "Potential" (GW)	Estimated Electricity production (Twh/year)	Residential Electricity consumption 2006 (TWh/year)	% of PV
Europe (75%: Germany, France, UK, Italy, Spain)	3.723	465,4 (8m ² /Kwp)	511,9	859	59%
		161,9 (23m ² /KWp)	178,1		20%
USA	4.563	570,4 (8m ² /Kwp)	570,4	1351	42%
		198,4(23m ² /KWp)	198,4		14%
Japan	1.050	131,3 (8m ² /Kwp)	118,1	229	51%
		45,7 (23m ² /KWp)	41,1		18%

Figura 163. Estudio de superficies disponibles por el mundo y la energía que producirían.

Células solares transparentes: desarrollo actual y aplicaciones

Existen varios artículos que recogen las experiencias de haber instalado soluciones fotovoltaicas transparentes integradas en edificios:

- El edificio de investigación y desarrollo del instituto de ingeniería y construcción Kolon en Corea fue cubierto⁷⁵ en su cara frontal con módulos fotovoltaicos transparente de silicio amorfo.



Figura 164. Edificio Kolon y detalle del mismo con instalación BIPV.

- Un artículo⁷⁶ recoge un buen número de instalaciones BIPV hechas en Australia



Figura 165. Primera instalación del mundo con células sensibilizadas con colorante en un edificio.

- Ejemplos⁷⁷ de instalaciones BIPV en Alemania:

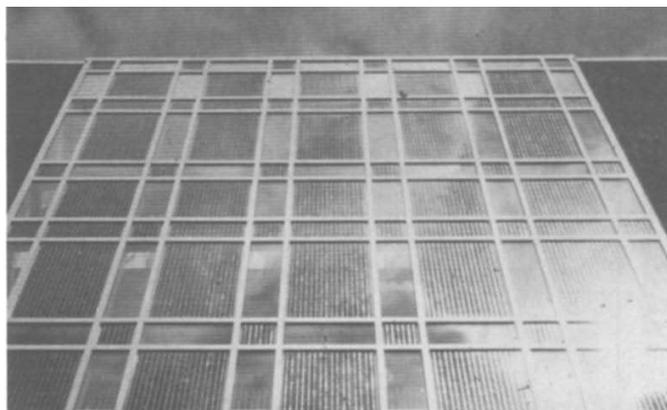


Figura 166. Fachada fotovoltaica instalada en Alemania.

5.2 Otros

Curiosamente también se ha planteado⁷⁸ usar la semitransparencia de las células solares orgánicas como patrones para tejidos. Esta idea se aprovecha además de la ligereza y flexibilidad de este tipo de tecnología.



Figura 167. Patrón de célula solar sobre un tejido para ser usado en ropa

También podemos encontrar estudios⁷⁹ de colectores térmicos semitransparentes que podrían usarse acoplados a una solución fotovoltaica transparente.

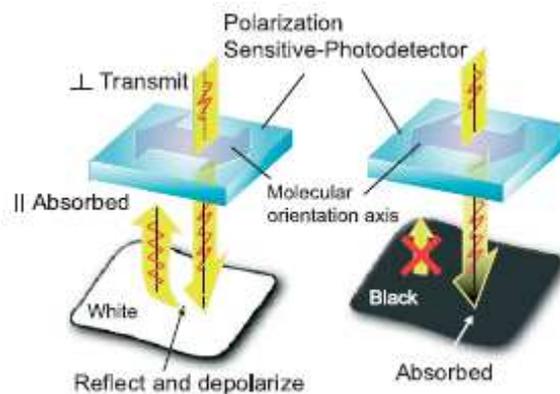


Figura 168. Representación esquemática de un sensor formado por un fotodiodo orgánico transparente sensible a la polarización (blanco y negro).

6. Conclusiones

Se ha podido ver a lo largo del proyecto el gran movimiento tanto de patentes, artículos como soluciones empresariales que tienen como objetivo la búsqueda de la transparencia de las células solares. El fin de este esfuerzo se reafirma para su integración en edificaciones (BIPV) para hacer de ventanas fotovoltaicas.

Este interés puede que esté motivado por un cambio en la mentalidad de las personas hacia una vida más ecológica y respetuosa con el medio ambiente. Dicho cambio es debido la actual preocupación por los efectos del cambio climático y la perspectiva de un futuro cercano donde escaseen los combustibles fósiles.

Numerosos son los artículos que aportan nuevas perspectivas para conseguir este reto buscando cada uno mejorar una parte del mismo. Ya sea hacer los electrodos mas transparentes, mejorar la absorción lumínica de la mezcla polimérica de la capa activa o encontrar un proceso de fabricación sencillo, rápido y barato. Todas tratan de aportar su grano de arena en la obtención de células solares transparentes eficientes.

Se pueden encontrar bastantes patentes que registran y protegen ideas entorno a este tema. Algunas oportunistas y sin mucha aclaración del proceso de fabricación de la misma ni los principios en que se basa el concepto mismo de transparencia que proponen. Aun así hay un gran número de ellas que registran ideas, usos y procesos que acertadamente o no muestran el interés en buscar soluciones fotovoltaicas transparentes.

Sin embargo los mejores resultados los ha obtenido empresas privadas, cuyos récords de eficiencia y de transparencia conseguida en sus productos no han conseguido igualarse en el mundo académico. Han hecho tantos avances en la materia que hay más de una empresa capaz de ofrecer comercialmente sus productos. Que sea este sector el más avanzado de todos puede dar una idea del potencial que han visto en las células solares transparentes para esforzarse tanto en su desarrollo.

Visto el gran interés mostrado tanto en sectores académicos como empresariales podemos aventurar a asegurar que en un futuro cercano se obtendrán los resultados deseados y en poco tiempo estas soluciones se convertirán accesibles y habituales. Las células solares transparentes ya han dejado de ser la fantasía de un visionario para estar ya casi al alcance de cualquiera que desee utilizarlas. Sin embargo, para conseguir esto todavía hace falta más investigación para asegurar un futuro el que las ventanas fotovoltaicas sean una realidad cotidiana.

Referencias

1. Luque,A. & Hegedus,S. Handbook of Photovoltaic Science and Engineering. John Wiley&Sons, (2003).
2. Archer,M.D. & Hill,R. CLEAN ELECTRICITY FROM PHOTOVOLTAICS. Imperial College Press, (200).
3. Sun,S.-S. & Sariciftci,N.S. Organic Photovoltaics: Mechanisms, Materials, and Devices. Taylor&Francis, (2005).
4. Takeoka,A. *et al.* Development and application of see-through a-Si solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells* **29**, 243-252 (1993).
5. Fath,P., Nussbaumer,H. & Burkhardt,R. Industrial manufacturing of semitransparent crystalline silicon POWER solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells* **74**, 127-131 (2002).
6. Yoon,J. *et al.* Ultrathin silicon solar microcells for semitransparent, mechanically flexible and microconcentrator module designs. *Nature Materials* **7**, 907-915 (2008).
7. Biancardo,M. *et al.* Characterization of microspherical semi-transparent solar cells and modules. *Solar Energy* **81**, 711-716 (2007).
8. Chau,J.L.H., Chen,R.T., Hwang,G.L., Tsai,P.Y. & Lin,C.C. Transparent solar cell window module. *Solar Energy Materials and Solar Cells* **94**, 588-591 (2010).
9. Gallagher,S.J., Norton,B. & Eames,P.C. Quantum dot solar concentrators: Electrical conversion efficiencies and comparative concentrating factors of fabricated devices. *Solar Energy* **81**, 813-821 (2007).
10. Gallagher,S.J., Rowan,B.C., Doran,J. & Norton,B. Quantum dot solar concentrator: Device optimisation using spectroscopic techniques. *Solar Energy* **81**, 540-547 (2007).
11. Weber,W.H. & Lambe,J. Luminescent Greenhouse Collector for Solar-Radiation. *Applied Optics* **15**, 2299-2300 (1976).
12. Rau,U. Efficiency limits of photovoltaic fluorescent collectors. *Appl. Phys. Lett.* **87**, 171101 (2005).
13. Currie,M.J., Mapel,J.K., Heidel,T.D., Goffri,S. & Baldo,M.A. High-efficiency organic solar concentrators for photovoltaics. *Science* **321**, 226-228 (2008).
14. Seemann,A., Egelhaaf,H.J., Brabec,C.J. & Hauch,J.A. Influence of oxygen on semi-transparent organic solar cells with gas permeable electrodes. *Organic Electronics* **10**, 1424-1428 (2009).
15. Gadisa,A. *et al.* Transparent polymer cathode for organic photovoltaic devices. *Synthetic Metals* **156**, 1102-1107 (2006).

16. Zhou, Y.H. *et al.* Indium tin oxide-free and metal-free semitransparent organic solar cells. *Appl. Phys. Lett.* **97**, (2010).
17. Zhou, Y.H., Cheun, H., Choi, S., Fuentes-Hernandez, C. & Kippelen, B. Optimization of a polymer top electrode for inverted semitransparent organic solar cells. *Organic Electronics* **12**, 827-831 (2011).
18. Han, D., Kim, H., Lee, S., Seo, M. & Yoo, S. Realization of efficient semitransparent organic photovoltaic cells with metallic top electrodes: utilizing the tunable absorption asymmetry. *Opt. Express* **18**, A513-A521 (2010).
19. Chen, F.C., Wu, J.L., Hsieh, K.H., Chen, W.C. & Lee, S.W. Polymer photovoltaic devices with highly transparent cathodes. *Organic Electronics* **9**, 1132-1135 (2008).
20. Lee, Y.Y. *et al.* Top Laminated Graphene Electrode in a Semitransparent Polymer Solar Cell by Simultaneous Thermal Annealing/Releasing Method. *Acs Nano* **5**, 6564-6570 (2011).
21. Tung, V.C. *et al.* Low-Temperature Solution Processing of Graphene/Carbon Nanotube Hybrid Materials for High-Performance Transparent Conductors. *Nano Letters* **9**, 1949-1955 (2009).
22. Zou, J. Metal grid/conducting polymer hybrid transparent electrode for inverted polymer solar cells. *Appl. Phys. Lett.* **96**, 203301 (2010).
23. Nickel, F. *et al.* Cathodes comprising highly conductive poly(3,4-ethylenedioxythiophene):poly(styrenesulfonate) for semi-transparent polymer solar cells. *Organic Electronics* **11**, 535-538 (2010).
24. Lim, Y. Spray-deposited poly(3,4-ethylenedioxythiophene):poly(styrenesulfonate) top electrode for organic solar cells. *Appl. Phys. Lett.* **93**, 193301 (2008).
25. Lee, J.Y., Connor, S.T., Cui, Y. & Peumans, P. Solution-processed metal nanowire mesh transparent electrodes. *Nano Letters* **8**, 689-692 (2008).
26. Lee, J.Y., Connor, S.T., Cui, Y. & Peumans, P. Semitransparent Organic Photovoltaic Cells with Laminated Top Electrode. *Nano Letters* **10**, 1276-1279 (2010).
27. Tao, C. *et al.* Semitransparent inverted polymer solar cells with MoO(3)/Ag/MoO(3) as transparent electrode. *Appl. Phys. Lett.* **95**, (2009).
28. Tao, C., Xie, G.H., Meng, F.X., Ruan, S.P. & Chen, W.Y. Tailoring Spatial Distribution of the Optical Field Intensity in Semitransparent Inverted Organic Solar Cells. *Journal of Physical Chemistry C* **115**, 12611-12615 (2011).
29. Shrotriya, V., Wu, E.H.E., Li, G., Yao, Y. & Yang, Y. Efficient light harvesting in multiple-device stacked structure for polymer solar cells. *Appl. Phys. Lett.* **88**, (2006).
30. Davenas, J.I. *et al.* Hybrid polymer/TiO₂ films by in situ hydrolysis condensation of titanium alkoxide precursors for photovoltaic transparent windows. *phys. stat. sol. (a)* **207**, 1627-1630 (2010).

31. Olthof,S., Meiss,J., L++ssem,B., Riede,M.K. & Leo,K. Photoelectron spectroscopy investigation of thin metal films employed as top contacts in transparent organic solar cells. *Thin Solid Films* **519**, 1872-1875 (2011).
32. Hau,S.K., Yip,H.L., Zou,J.Y. & Jen,A.K.Y. Indium tin oxide-free semi-transparent inverted polymer solar cells using conducting polymer as both bottom and top electrodes. *Organic Electronics* **10**, 1401-1407 (2009).
33. Schmidt,H. Efficient semitransparent inverted organic solar cells with indium tin oxide top electrode. *Appl. Phys. Lett.* **94**, 243302 (2009).
34. Meiss,J. Towards efficient tin-doped indium oxide (ITO)-free inverted organic solar cells using metal cathodes. *Appl. Phys. Lett.* **94**, 013303 (2009).
35. Waldauf,C. Highly efficient inverted organic photovoltaics using solution based titanium oxide as electron selective contact. *Appl. Phys. Lett.* **89**, 233517 (2006).
36. Xia,X. *et al.* Infrared-transparent polymer solar cells. *J. Mater. Chem.* **20**, 8478-8482 (2010).
37. Huang,J.S., Li,G. & Yang,Y. A semi-transparent plastic solar cell fabricated by a lamination process. *Adv. Mater.* **20**, 415-+ (2008).
38. Chen,M.H. *et al.* Efficient Polymer Solar Cells with Thin Active Layers Based on Alternating Polyfluorene Copolymer/Fullerene Bulk Heterojunctions. *Adv. Mater.* **21**, 4238-+ (2009).
39. Pandey,A.K. & Samuel,I.D.W. Photophysics of Solution-Processed Transparent Solar Cells Under Top and Bottom Illumination. *Ieee Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* **16**, 1560-1564 (2010).
40. Ng,G. Optical enhancement in semitransparent polymer photovoltaic cells. *Appl. Phys. Lett.* **90**, 103505 (2007).
41. Ameri,T. *et al.* Fabrication, Optical Modeling, and Color Characterization of Semitransparent Bulk-Heterojunction Organic Solar Cells in an Inverted Structure. *Advanced Functional Materials* **20**, 1592-1598 (2010).
42. Ajuria,J. *et al.* Inverted ITO-free organic solar cells based on p and n semiconducting oxides. New designs for integration in tandem cells, top or bottom detecting devices, and photovoltaic windows. *Energy Environ. Sci.* **4**, 453-458 (2011).
43. Lewis,J.E., Lafalce,E., Toglia,P. & Jiang,X.M. Over 30% transparency large area inverted organic solar array by spray. *Solar Energy Materials and Solar Cells* **95**, 2816-2822 (2011).
44. Dong,Q.F. *et al.* All-spin-coating vacuum-free processed semi-transparent inverted polymer solar cells with PEDOT:PSS anode and PAH-D interfacial layer. *Organic Electronics* **11**, 1327-1331 (2010).
45. Zhou,Y.H. *et al.* Inverted and transparent polymer solar cells prepared with vacuum-free processing. *Solar Energy Materials and Solar Cells* **93**, 497-500 (2009).

46. Zimmermann, B. *et al.* ITO-free wrap through organic solar cells - A module concept for cost-efficient reel-to-reel production. *Solar Energy Materials and Solar Cells* **91**, 374-378 (2007).
47. Ameri, T. Realization, characterization, and optical modeling of inverted bulk-heterojunction organic solar cells. *J. Appl. Phys.* **103**, 084506 (2008).
48. Li, G., Chu, C.W., Shrotriya, V., Huang, J. & Yang, Y. Efficient inverted polymer solar cells. *Appl. Phys. Lett.* **88**, (2006).
49. Garcia, C.G., Iha, N.Y.M., Argazzi, R. & Bignozzi, C.A. 4-Phenylpyridine as ancillary ligand in ruthenium(II) polypyridyl complexes for sensitization of n-type TiO₂ electrodes. *Journal of Photochemistry and Photobiology A-Chemistry* **115**, 239-242 (1998).
50. Biancardo, M., West, K. & Krebs, F.C. Optimizations of large area quasi-solid-state dye-sensitized solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells* **90**, 2575-2588 (2006).
51. Park, N.G. & Kim, K. Transparent solar cells based on dye-sensitized nanocrystalline semiconductors. *phys. stat. sol. (a)* **205**, 1895-1904 (2008).
52. Hirsch, A. *et al.* Material development for dye solar modules: results from an integrated approach. *Prog. Photovolt: Res. Appl.* **16**, 489-501 (2008).
53. Goncalves, L.M., Zea Bermudez, V., Ribeiro, H.A. & Mendes, A.M. Dye-sensitized solar cells: A safe bet for the future. *Energy Environ. Sci.* **1**, 655-667 (2008).
54. van Roosmalen, J. Molecular-based concepts in PV towards full spectrum utilization. *Semiconductors* **38**, 970-975 (2004).
55. Brien, P.G. *et al.* Selectively transparent and conducting photonic crystal rear-contacts for thin-film silicon-based building integrated photovoltaics. *Opt. Express* **19**, 17040-17052 (2011).
56. Yoon, S. *et al.* Application of transparent dye-sensitized solar cells to building integrated photovoltaic systems. *Building and Environment* **46**, 1899-1904 (2011).
57. Miyazaki, T., Akisawa, A. & Kashiwagi, T. Energy savings of office buildings by the use of semi-transparent solar cells for windows. *Renewable Energy* **30**, 281-304 (2005).
58. Li, D.H.W., Lam, T.N.T., Chan, W.W.H. & Mak, A.H.L. Energy and cost analysis of semi-transparent photovoltaic in office buildings. *Applied Energy* **86**, 722-729 (2009).
59. Wong, P.W., Shimoda, Y., Nonaka, M., Inoue, M. & Mizuno, M. Semi-transparent PV: Thermal performance, power generation, daylight modelling and energy saving potential in a residential application. *Renewable Energy* **33**, 1024-1036 (2008).
60. Fung, T.Y.Y. & Yang, H. Study on thermal performance of semi-transparent building-integrated photovoltaic glazings. *Energy and Buildings* **40**, 341-350 (2008).

61. Yamada,N., Kanno,K., Hayashi,K. & Tokimitsu,T. Performance of see-through prism CPV module for window integrated photovoltaics. *Opt. Express* **19**, A649-A656 (2011).
62. Park,K.E., Kang,G.H., Kim,H.I., Yu,G.J. & Kim,J.T. Analysis of thermal and electrical performance of semi-transparent photovoltaic (PV) module. *Energy* **35**, 2681-2687 (2010).
63. Brow,R.K. & Schmitt,M.L. A survey of energy and environmental applications of glass. *Journal of the European Ceramic Society* **29**, 1193-1201 (2009).
64. Chow,T.T., Pei,G., Chan,L.S., Lin,Z. & Fong,K.F. A Comparative Study of PV Glazing Performance in Warm Climate. *Indoor and Built Environment* **18**, 32-40 (2009).
65. Han,J., Lu,L. & Yang,H.X. Thermal behavior of a novel type see-through glazing system with integrated PV cells. *Building and Environment* **44**, 2129-2136 (2009).
66. Li,D.H.W., Lam,T.N.T. & Cheung,K.L. Energy and cost studies of semi-transparent photovoltaic skylight. *Energy Conversion and Management* **50**, 1981-1990 (2009).
67. Song,J.H. *et al.* Power output analysis of transparent thin-film module in building integrated photovoltaic system (BIPV). *Energy and Buildings* **40**, 2067-2075 (2008).
68. Photovoltaics in windows. International Energy Agency, (2011).
69. Chemisana,D. Building Integrated Concentrating Photovoltaics: A review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews* **15**, 603-611 (2011).
70. Van Sark,W.G. *et al.* Luminescent Solar Concentrators ? A review of recent results. *Opt. Express* **16**, 21773-21792 (2008).
71. Debije,M.G. Solar Energy Collectors with Tunable Transmission. *Advanced Functional Materials* **20**, 1496-1500 (2010).
72. Bechinger,C. & Gregg,B.A. Development of a new self-powered electrochromic device for light modulation without external power supply. *Solar Energy Materials and Solar Cells* **54**, 405-410 (1998).
73. Bechinger,C. *et al.* Low-voltage electrochromic device for photovoltaic-powered smart windows. *J. Appl. Phys.* **80**, 1226-1232 (1996).
74. Pagliaro,M., Ciriminna,R. & Palmisano,G. BIPV: merging the photovoltaic with the construction industry. *Progress in Photovoltaics* **18**, 61-72 (2010).
75. Yoon,J.H., Song,J. & Lee,S.J. Practical application of building integrated photovoltaic (BIPV) system using transparent amorphous silicon thin-film PV module. *Solar Energy* **85**, 723-733 (2011).
76. Prasad,D.K. & Snow,M. Examples of successful architectural integration of PV: Australia. *Prog. Photovolt: Res. Appl.* **12**, 477-483 (2004).

77. Chehab,O. The intelligent facade photovoltaic and architecture. *Renewable Energy* **5**, 188-204 (1994).
78. Krebs,F.C., Biancardo,M., Winther-Jensen,B., Spanggard,H. & Alstrup,J. Strategies for incorporation of polymer photovoltaics into garments and textiles. *Solar Energy Materials and Solar Cells* **90**, 1058-1067 (2006).
79. Fuschillo,N. Semi-Transparent Solar Collector Window Systems. *Solar Energy* **17**, 159-165 (1975).