

6. Tipos de células fotovoltaicas

Thomas Zimmer, Universidad de Burdeos, Francia

Resumen

Objetivos del curso	2
Introducción	2
Materiales sólidos cristalizados.....	3
Silicio monocristalino	3
Silicio multicristalino	4
De la oblea a la célula solar clásica.....	5
Materiales de la lámina amorfa y fina.....	6
Células de láminas finas de CdTe	6
Células de lámina fina CIGS	7
Células de Si amorfas.....	8
Análisis.....	9
Producción.....	9
Eficiencia de conversión de células solares y módulos	10
Outlook: Nuevas tecnologías de PV	10
Referencias	11

Objetivos del curso

- Obtener una representación de la evolución de la producción fotovoltaica mundial
- Entender el concepto de materiales sólidos cristalizados
- Averiguar la diferencia de la célula solar de silicio monocristalino y policristalino
- Comprender el concepto de materiales amorfos y láminas finas
- Reconocer la estructura de las células de láminas finas CdTe y CIM así como las SI-células amorfas
- Trabajar sobre las principales tecnologías fotovoltaicas
- Obtener la representación de tecnologías fotovoltaicas emergentes

Introducción

La capacidad fotovoltaica solar (PV) en todo el mundo alcanzará los 320 a 430GW a finales de 2018. La figura 1 muestra una imagen global del mercado acumulado PV [1]. El extremo inferior supone que nuevos mercados en países emergentes no prosperarán, mientras que el extremo superior asume un mercado sólido de PV en regiones emergentes [2].

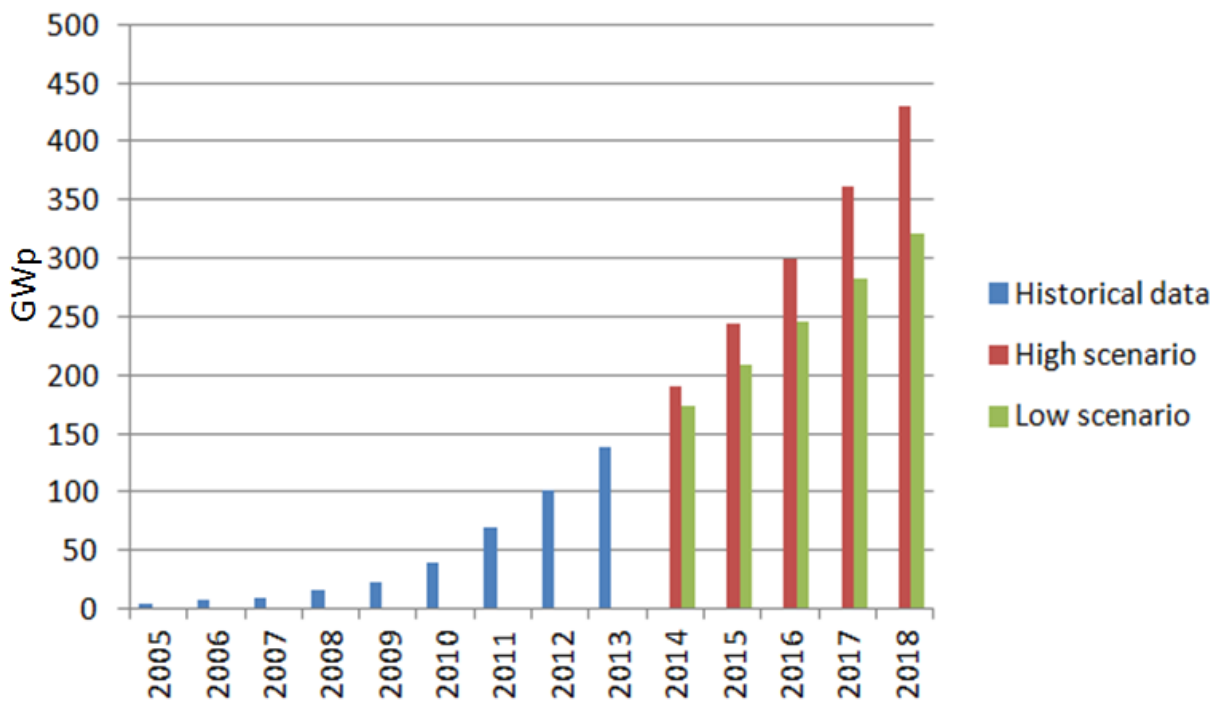


Fig. 1 PV Escenario Global acumulativo hasta 2018, datos de la fig [1]

Para la producción de paneles solares, podemos distinguir dos tecnologías principales:

- Materiales sólidos cristalizados
- Materiales de la lámina fina y amorfa

La primera categoría (materiales sólidos cristalizados) representa aproximadamente el 90% de la cuota del mercado, mientras que la lámina amorfa y fina cubre el 10% de materiales restantes, pero con una tendencia ascendente.

También están las tecnologías emergentes tales como:

- Células solares fotoelectroquímicas de Grätzel
- Células solares orgánicas

Estas células fotovoltaicas emergentes aún no están maduras para la producción a gran escala y tampoco para la instalación; pero sus prometedoras propiedades las perfilan como serias candidatas al mercado fotovoltaico de los próximos años.

Materiales sólidos cristalizados

Silicio monocristalino

La célula solar de silicio de monocristalino está formada por un gran monocristal de silicio puro. Este cristal sólo se fabrica según el método de Czochralski. Consiste en una fusión de gran pureza, del silicio semiconductor grado con sólo unas pocas partes por millón de impurezas en un crisol a 1425 grados Celsius. Durante este proceso de fusión, átomos impuros dopantes como el boro (para el semiconductor de tipo p) o fósforo (para el semiconductor de tipo n) son añadidos al silicio fundido para doparlo; para las células fotovoltaicas el dopante preferido es el boro. El segundo paso consiste en sumergir en el silicio fundido un cristal montado en una varilla. El cristal tiene una orientación cristalina bien definida. La varilla de cristal se saca con cuidado girándola. Los gradientes de temperatura, la velocidad de tracción y la velocidad de rotación deben ser precisamente controlados. De ello resulta en la extracción de un gran lingote monocristalino cilíndrico obtenido del derretimiento. El proceso de fusión necesita tanto, atmósfera inerte (por ejemplo argón) como de una cámara inerte (tal como el cuarzo). Las desventajas del proceso clásico de fusión son la baja velocidad y los costes de producción intensiva de energía. Además, el lingote debe ser aserrado para obtener obleas finas de células solares. Este proceso cuesta mucho tiempo y además provoca la pérdida de material valioso. Un gran esfuerzo de i & D es realizado por la industria fotovoltaica para mejorar el proceso de fabricación. La apariencia de la mono-Si es sobre todo de color negro (ver figura 2).

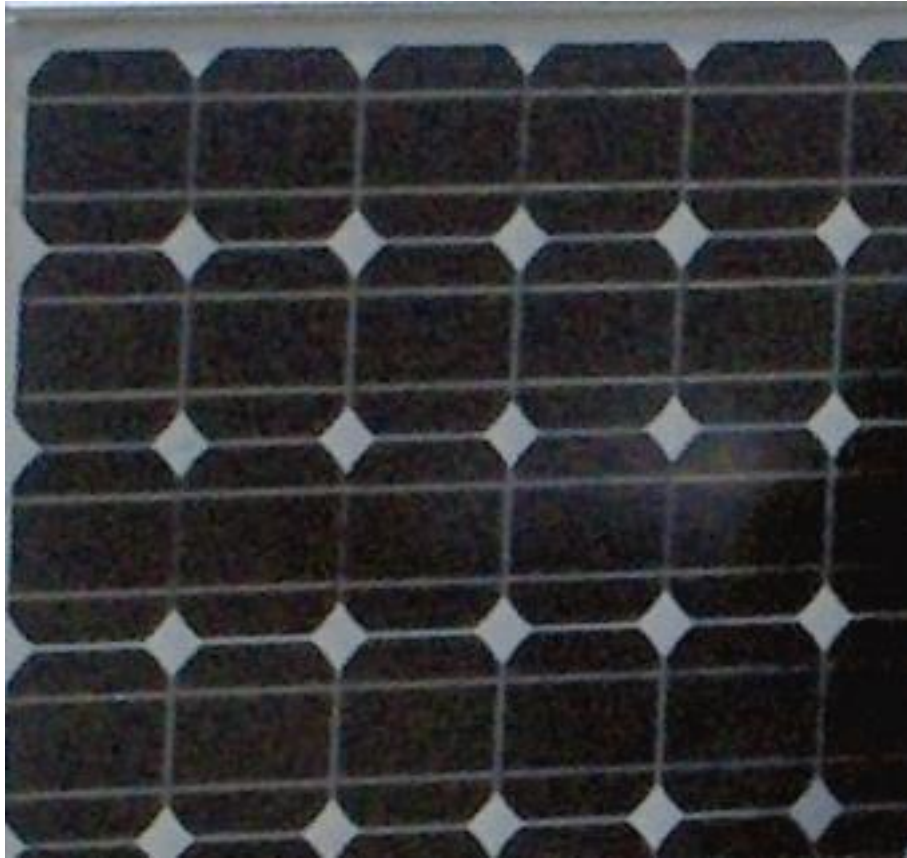


Fig 2: Módulo de silicio monocristalino

Silicio multicristalino

El silicio multicristalino también se conoce como silicio policristalino o más simplemente poly-Si. Las células solares basadas en poly-Si son muy similares a los módulos monocristalinos. Se aplica la misma teoría; la principal diferencia es el proceso de fabricación. Las células de poly-Si se fabrican de Si puro fundido en un tanque semejante a un cubo; el enfriamiento es un paso esencial porque determina el tamaño de grano y la distribución de las impurezas. Los lingotes obtenidos se cortan en barras con una sección transversal de 15,6 cm x 15.6 cm; finalmente son aserrados para obtener las obleas finas. Este proceso de fabricación da vida a una estructura de cristal Multi-grain. Comparada con la estructura Monocristalina Si, es menos ideal porque resulta una pérdida de eficiencia (alrededor de 1% en comparación con el mono-Si) [3], pero este inconveniente es solevado por los costos de oblea. Una segunda ventaja es la disposición de los módulos de la célula que son típicamente rectangulares, en lugar de "pseudo-cuadrados" en comparación con el mono-Si, por lo que pueden ser embalados en los módulos muy cerca los unos de los otros. La apariencia de la poly-Si es claramente azul (ver figura 3) debido a la falta de absorción de fotones de energía superiores. De hecho, estos fotones de alta energía desde la parte superior del espectro visible son reflejados posteriormente.



Fig 3: Módulo de silicio multicristalino

En conclusión, existe una pequeña diferencia al comparar el poly-Si versus mono-Si en términos de rendimiento, eficiencia y costos. Además, otras ventajas a menudo también son muy similares como la duración de vida y la garantía. Por último, características tales como la disponibilidad y la reputación del fabricante pueden ser importantes también.

De la oblea a la célula solar clásica

Después de la fabricación de la oblea de Si tipo p, los siguientes pasos son necesarios para obtener el módulo PV en funcionamiento [4]:

- Tratamiento de la superficie para limpiar las impurezas del proceso de aserrado
- La superficie de grabado con el objetivo de crear pequeñas pirámides sobre la superficie para una mayor recolección de fotones (la célula PV es sensible a una-orientación menor)
- Difusión de fósforo para crear la unión pn fotovoltaica
- Dopaje de la parte posterior con una capa de p+
- Añadir una capa de antirreflejos en la parte delantera
- Conectar el contacto metálico entre la parte superior y la capa n
- Adicionar un electrodo en la parte posterior y el contacto metálico posterior correspondiente

La figura 4 muestra una vista de sección transversal de una célula solar de mono-Si.

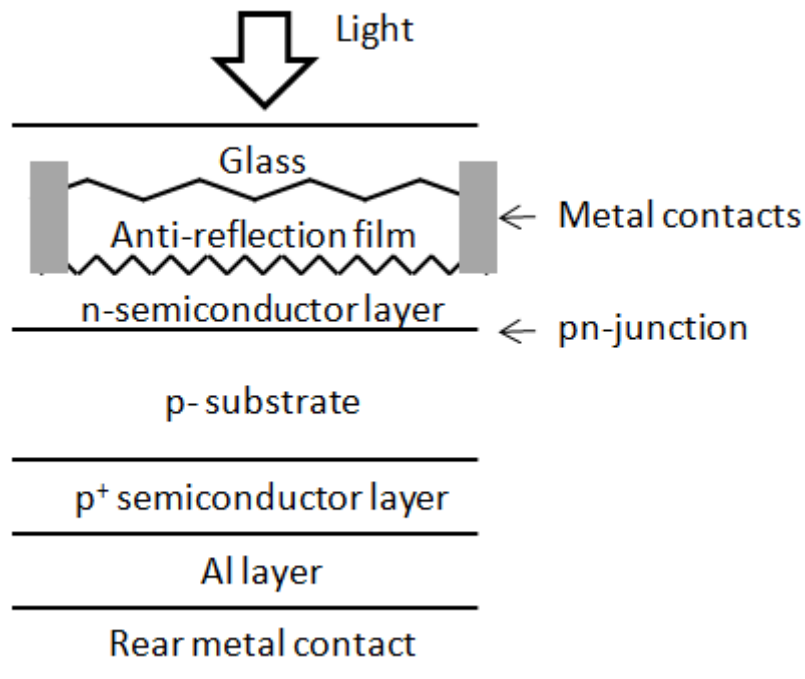


Figura 4: Vista de corte transversal esquemático de una célula solar de mono-Si

Materiales de la lámina amorfa y fina

Las células solares de lámina fina también a menudo se denominan células solares de segunda generación [5]. En esta categoría entran las amorfas de células Si, las células de CdTe y células CIGS. CIGS reposan: cobre indio seleniuro de galio. La gran ventaja de estas células reside en el hecho de que sólo se necesita muy poco material para su fabricación. Los procesos de producción son compatibles con superficies grandes que se pueden utilizar con sustratos rígidos o flexibles. Estas propiedades dan por resultado una solución rentable para la producción de células PV. De hecho, los materiales de lámina fina son capaces de absorber eficientemente los fotones (con un coeficiente de absorción mayor en 100 veces en comparación con las células mono o poly-Si). Por lo tanto, sólo necesitan un espesor micras comparado con los 200µm de espesor requerido para el mono - o poli-Si para absorber todos los fotones con energía superior a la brecha.

Células de láminas finas de CdTe

Las células de láminas finas de CdTe han pasado por un rápido desarrollo en los últimos años, debido a su competitividad en términos de costo, alta eficacia de conversión y los procesos de fabricación disponibles. Por el momento, las células de lámina fina de CdTe están liderando la industria fotovoltaica de lámina fina. Los módulos comerciales alcanzan eficiencia de conversión de hasta un 12.6% [5]. El CdTe tiene una banda brecha de 1,45 eV y reacciona bien al espectro de emisión solar.

Técnicas de bajo costo han sido desarrolladas con el fin de fabricar estos módulos. Aquí se resumen los pasos principales de la fabricación (véase también la figura 5): una superficie de vidrio está cubierta con una lámina de SnO₂ dopada por F; el papel de la lámina de SnO₂ es doble: el lado negativo de la lámina permite optimizar el contacto con el vidrio sin absorber demasiados fotones y en la parte superior de la lámina, permite recoger los electrones (actúa como un electrodo). A esto le sigue la capa del almacenador intermediario de CdS (100nm). A continuación se agrega la capa activa de CdTe (3 a 7µm gruesa) que actúa como un amortiguador del fotón. En la parte posterior, un electrodo de contacto se agrega con el fin de recoger las perforaciones creadas. La figura 5 siguiente muestra una sección transversal esquemática de la célula de lámina fina de CdTe.

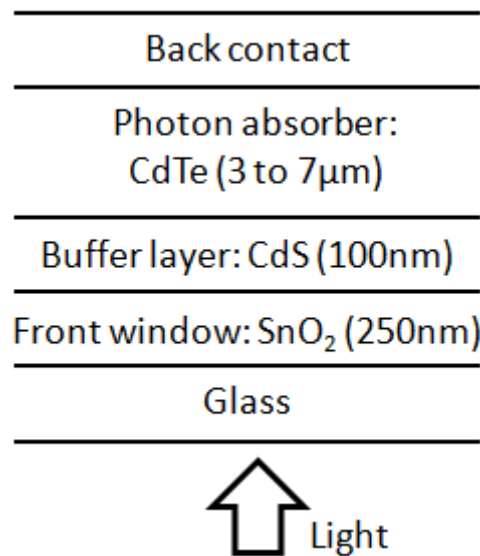


Figura 5: Vista de corte transversal esquemático de una célula de lámina fina de CdTe

La alta eficacia de conversión combinada con la estructura robusta y el rendimiento de alta producción aceleró el desarrollo de células de láminas fina de CdTe. Sin embargo, el uso de un material tóxico (Cd) requiere alguna atención especial durante la producción de las células, así como durante la fase de reciclaje al final de su vida útil. Para descartar este material tóxico, se investigan otros materiales de lámina fina: son células de capa fina CIGS y células de Si amorfas.

Células de lámina fina CIGS

Las células solares CIGS entran en la categoría de las células de película delgada. En comparación con otras células de láminas finas, las células solares CIGS son consideradas como las más prometedoras. De hecho, su eficiencia de conversión se acerca a la eficiencia de conversión de las células de la poly-Si.

La figura 6 muestra la vista de sección transversal de una célula CIGS. A partir de la parte posterior, una capa de molibdeno se apila sobre un substrato de cristal. La siguiente capa se compone del amortiguador del fotón que es una aleación de Cu (In, Ga) Se₂ (di-seleniuro de

cobre, indio y galio). El espesor de esta capa es de $2\mu\text{m}$ y es producido por la evaporación en ultra alto vacío a una temperatura de sustrato de aproximadamente 550°C . La sustitución de en por Ga permite el ajuste de la brecha de energía (entre 1 eV a 1.7 eV). Luego, se añade una capa del almacenador intermediario de tipo n de CdS o ZnS con un grueso de cerca de 50nm. Ayuda a optimizar la interfaz entre el amortiguador de CIGS, la capa i-ZnO dopado no y la capa de contacto superior de tipo n (ZnO). Las capas superiores son transparentes con el fin de que todos los fotones pasen a la capa del amortiguador.

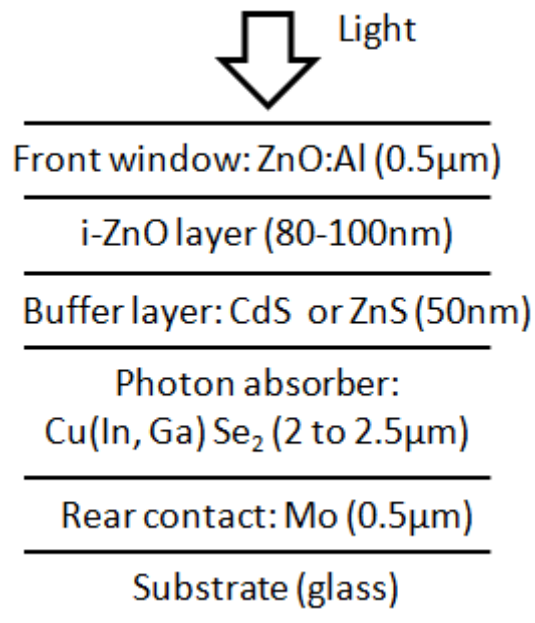


Figura 6: Vista de corte transversal esquemático de una delgada película de células CIGS

Células de Si amorfas

Silicio amorfo (A-si) es la forma no cristalina del silicio. Los paneles de silicio amorfo son fabricados mediante el proceso de deposición de vapor para crear una fina capa de material de silicio de aproximadamente $1\mu\text{m}$ de grosor en un material del sustrato tales como vidrio o metal. La principal ventaja es la posibilidad de depositar silicio amorfo a muy bajas temperaturas. La forma básica consiste en una secuencia única de capas de p-i-n (ver figura 7). Las capas de p-i-n se utilizan para crear un campo eléctrico que ayuda a mover los portadores; por el hecho de que el silicio amorfo tiene una movilidad muy baja de aproximadamente $1\text{ cm}^2/\text{Vs}$ [6] en comparación con la movilidad de más de $1000\text{ cm}^2/\text{Vs}$ en Si-cells monocristalinas. Un inconveniente conocido de las láminas finas amorfas de Si es una degradación significativa de su potencia cuando se exponen al sol (en el rango 15-35%). Se puede mejorar la estabilidad al utilizar capas más finas. Sin embargo, al hacerlo, la absorción de la luz se reducirá, así como eficiencia de conversión de la célula. Una solución consiste en el uso del tándem y dispositivos incluso una triple capa que contenga las células p-i-n apiladas una encima de la otra, separadas por una junción de túneles finos (no se muestra en la sección esquemática, figura 7). Cada capa de la célula de p-i-n tiene átomos adicionales específicos para ajustar la brecha de energía.

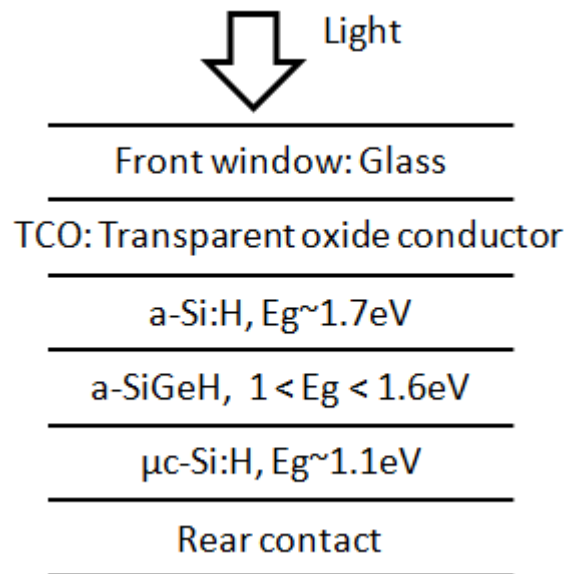


Figura 7: Vista de corte transversal esquemático de una célula de lámina fina de Si amorfa

Análisis

Hasta ahora hemos presentado las principales tecnologías de PV, que se refieren a materiales de lámina sólida cristalizada, amorfa y fina. En esta sección, analizaremos estas tecnologías en términos de producción global y por último dar un estado del avance de la principal figura de mérito: la eficiencia de conversión con respecto a las diferentes tecnologías.

Producción

En 2013, la producción anual global de PV fue de 38.7GWp. Nueve porcentajes de los módulos fotovoltaicos fabricados eran módulos de láminas finas, 36% eran módulos de Si monocristalino y la mayor parte (55%) se compone de módulos de PV Si cristalinos poli - (o múltiple). La figura 8 destaca esta distribución.

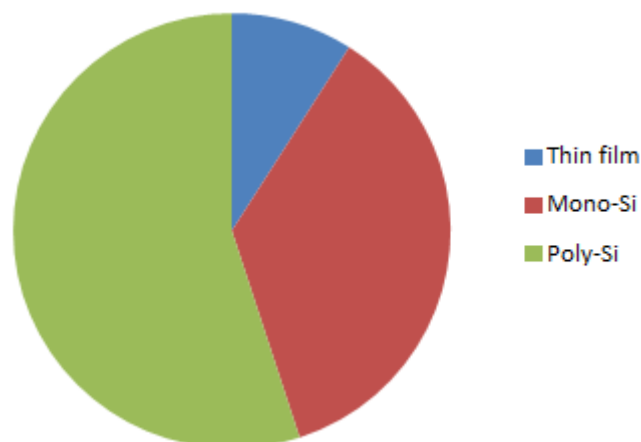


Figura 8: Desarrollo de la producción de PV por la tecnología en el 2013, datos de [7]

Eficiencia de conversión de células solares y módulos

A finales de 2014 la eficiencia de conversión de estado de la técnica de células solares se resume a continuación [7]:

- La eficiencia de conversión de células de laboratorio de registro es o
 - 25% de las células monocristalinas de Si,
 - 20.4% para las células de Si cristalinas,
 - 19.8% para CIGS células finas de lámina solares,
 - 19.6% para CdTe células finas de lámina solares.
- La eficiencia de conversión aumenta en los últimos 10 años de una oblea comercial promedio:
 - 12% a 16% para el silicio basado en módulos,
 - 9% y 13% para CdTe basado en módulos.

Outlook: Nuevas tecnologías de PV

La investigación se lleva a cabo con un esfuerzo enorme con el fin de trabajar con nuevos materiales y nuevos conceptos para módulos fotovoltaicos. Aquí sólo mencionamos las células Grätzel fotoelectroquímicas solares o células solares teñidas-sensibilizadas (DSSC) [8] y las células solares orgánicas.

DSSCs se basan en un semiconductor formado entre un ánodo de fotosensible y un electrolito. Las ventajas de las de células solares fotoelectroquímicas de Grätzel pueden resumirse como sigue: (i) el costo de fabricación es bajo, (ii) rodar el procesamiento es posible permitiendo la producción de alto volumen, (iii) la recuperación de energía es en menos de un año debido a la baja energía incorporada en el proceso de fabricación; (iv) son materiales no tóxicos, abundantes en suelo terranio (excepto Pt, Ru), (v) se realiza bien en diversas condiciones de luz como ángulo de incidencia alta, de baja intensidad y sombreado parcial; (vi) por último, son (o pueden ser) ligeros, flexibles y semitransparentes. Sus principales retos son mejorar en la eficiencia de conversión, especialmente estabilidad y robustez.

Una célula solar orgánica se compone de polímeros. La célula orgánica intrínseca del solar consiste en dos capas: donante de un electrón y un electrón aceptador de la capa. Cuando se absorbe un fotón crea un par de electrones-huecos enlazados (también llamado excitón), sobre todo en el material donante. Pueden ser separados cuando se difunde la excitación a la interfaz de donante-receptor.

El material utilizado para la producción de células solares orgánicas se compone de polímeros o en otras palabras: plástico. El plástico utilizado tiene bajos costos de producción en grandes volúmenes, lo que representa la principal ventaja de las células solares orgánicas.

Además, el coeficiente de absorción óptica de las moléculas orgánicas es alto, por lo que una gran cantidad de luz puede ser absorbida con una pequeña cantidad de materiales. Las principales desventajas son el bajo rendimiento, la baja estabilidad y la baja resistencia en comparación con los inorgánicos de las células fotovoltaicas. Investigación y desarrollo de tecnologías fotovoltaicas orgánicas ha logrado una eficiencia récord del dispositivo del 12% [9] y una duración vida al aire libre de más de un año [10]. Sin embargo, se requieren aún algunos años antes de que los módulos fotovoltaicos orgánicos puedan ser lanzados efectivamente al mercado.

Referencias

- [1] “Global Market Outlook for Photovoltaic 2014-2018”, Editor: Tom Rowe, Principal authors and analysts: Gaëtan Masson (iCARES Consulting), Sinead Orlandi, Manoël Rekinger, EPIA European Photovoltaic Industry Association, http://www.epia.org/fileadmin/user_upload/Publications/44_epia_gmo_report_ver_17_mr.pdf
- [2] Peter Fairley, “Topaz Turns On 9 Million Solar Panels”, IEEE Spectrum, 01.15
- [3] Electricity from Sunlight: “An Introduction to Photovoltaics” (Hardcover), Paul A. Lynn, John Wiley & Sons, 2010
- [4] Anne Labouret, Michel Viloz, “Energie solaire photovoltaïque”, Dunod, Paris, 2009
- [5] Rémy Mosseri, Catherine Jeandel, “L'énergie à découvert”, CNRS Editions, Paris, 2013
- [6] N Wyrsh, M Goerlitzer, N Beck, J Meier, A Shah, “Transport Properties of Compensated $\mu\text{-Si: H}$ ”, MRS Symp., 1996 - infoscience.epfl.ch
- [7] Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, “Photovoltaics Report”, 24 October 2014, <http://www.ise.fraunhofer.de/de/downloads/pdf-files/aktuelles/photovoltaics-report-in-englischer-sprache.pdf>
- [8] Michael Grätzel, “Photoelectrochemical cells”, review article, p338, Nature, Vol. 414, 15 Nov 2001, www.nature.com
- [9] http://www.heliatek.com/newscenter/latest_news/neuer-weltrekord-fur-organische-solarzellen-heliatek-behauptet-sich-mit-12-zelleffizienz-als-technologiefuhrer/?lang=en
- [10] Suren A. Gevorgyan et al. “Interlaboratory outdoor stability studies of flexible roll-to-roll coated organic photovoltaic modules: Stability over 10,000 h”, Solar Energy Materials and Solar Cells, Volume 116, September 2013, Pages 187–196