

Fuente alterna de energía renovable: Celdas solares orgánicas Alternative source of renewable energy: Organic solar cells

Recibido: 22 de marzo de 2013; aceptado: 3 de mayo de 2013

Enrique Pérez Gutiérrez¹ y José Luis Maldonado Rivera²

Centro de Investigaciones en Óptica, A.C.

Resumen

Las celdas solares como fuente de energía renovable basadas en materiales inorgánicos han mostrado un gran desarrollo en las últimas décadas, sin embargo el alto costo de su producción ha imposibilitado su amplio uso. Así, el empleo de materiales orgánicos en la fabricación de celdas solares es una alternativa actualmente considerada por diversos grupos como una tecnología paralela potencialmente útil. Los retos principales para las celdas orgánicas son el aumento de la eficiencia de conversión de energía solar en eléctrica, y el lograr un mayor tiempo de vida. En esta área, se trabaja de forma interdisciplinaria sintetizando nuevos materiales orgánicos así como nuevas configuraciones para el ensamblaje de las celdas. En este artículo se muestra una descripción global de este campo de investigación y se menciona el trabajo del Grupo de Propiedades Ópticas de la Materia (GPOM) del Centro de Investigaciones en Óptica (CIO) en estos desarrollos científico-tecnológicos.

Palabras clave: fotónica, electrónica orgánica, materiales orgánicos, celdas solares.

Abstract

Solar cells as an alternative and renewable energy source based on inorganic materials have shown an impressive development, however, the high cost of production reduces their widespread applications. On the other hand, the use of organic materials in solar cells is becoming a new alternative considered by several research groups as a potentially useful technology for the near future. Increase of conversion of the solar energy into electricity, and the enhancing of the lifetime are some of the factors that drive a fast and increased development of the organic solar cells. To overcome these factors, research groups do their work within a multidisciplinary frame obtaining new organic materials and new cells devices structures. In this article it is shown a general overview of this research field pointing out the contributions made by the Group of Optical Properties of Materials (GPOM) of the Optical Research Center (CIO).

Keywords: photonics, organic electronics, organic materials, solar cells.

INTRODUCCIÓN

La reducción, a nivel mundial, de las reservas de los combustibles fósiles (petróleo particularmente) muestra la necesidad urgente de contar con fuentes alternas de energía que sean renovables, limpias y económicas tales como la eólica, la hidroeléctrica y la solar (Vigil, 2008 y Mishurny y de Anda, 2007). La búsqueda de estas

fuentes alternas es uno de los más importantes retos que actualmente enfrenta la humanidad. En particular, la energía solar está siendo explotada de varias maneras, pero la tecnología más frecuentemente usada es la de celdas solares basadas en silicio, donde la transformación directa de la luz del sol en electricidad se realiza a

¹ Doctor en Ciencias Químicas, Ingeniero Asociado "B" en el Centro de Investigaciones en Óptica, A.C. y profesor de asignatura en la carrera de Fisioterapia, ENES León/ UNAM. Líneas de Investigación: Optoelectrónica orgánica: Síntesis de compuestos orgánicos conjugados y sus aplicados en OLEDs y OPVs. Candidato a Investigador Nacional. Correo electrónico: eperez@cio.mx.

² Doctor en Ciencias Físicas, Investigador Titular "B" en el Centro de Investigaciones en Óptica, A.C. y profesor de asignatura en la carrera de Fisioterapia, ENES León/ UNAM. Líneas de Investigación: Optoelectrónica orgánica: OLEDs y OPVs. Investigador Nacional Nivel 2. Correo electrónico: jlmr@cio.mx

través del *efecto fotovoltaico* (efecto PV por sus siglas en inglés). La industria de estas celdas solares se inició en 1953 cuando científicos de los laboratorios Bell desarrollaron con éxito una celda fotovoltaica de estado sólido que convertía 5 % de la energía del Sol produciendo sólo 5 mW de potencia eléctrica (Pagliaro, Palmisano y Ciriminna, 2008). Estas celdas solares inorgánicas han sido optimizadas y actualmente pueden operar con eficiencias de conversión (η) de potencia eléctrica mayores al 20 %. La aplicación de esta tecnología solar inorgánica la encontramos en muchos instrumentos como en una calculadora, en un reloj, para la alimentación de teléfonos de emergencia en las carreteras, en lámparas decorativas de jardín, etc. No obstante, la tecnología PV basada en semiconductores inorgánicos como el silicio y otros, requiere condiciones de fabricación muy especializadas que implican un alto costo por lo que resulta poco rentable para determinadas aplicaciones y que hasta ahora ha restringido su uso masivo, además de generar algunos residuos contaminantes durante su fabricación tal como el CO₂ (Barbosa-García, *et al.* 2012).

Una alternativa para disminuir los costos de fabricación y poder generar producción masiva con una mínima generación de residuos es mediante el uso de *semiconductores orgánicos* que sustituyan al silicio (Barbosa-García, *et al.* 2012; Rodríguez, *et al.* 2009; Maldonado y Ramos-Ortiz, 2008, y Maldonado, *et al.* 2008). Desde el descubrimiento de los semiconductores orgánicos, ha existido un notable esfuerzo para que estos materiales puedan emular el comportamiento de dispositivos basados en sustancias inorgánicas. Ejemplos de estos dispositivos son las celdas solares (Pagliaro, Palmisano y Ciriminna, 2008; Maldonado y Ramos-Ortiz, 2008, y Maldonado, *et al.*, 2008), los transistores de efecto de campo (FETs) (Bao y Locklin, 2007) y los diodos emisores de luz (LEDs) (Maldonado y Ramos-Ortiz, 2008; Maldonado, *et al.* 2008, y Müllen y Scherf, 2006). La amplia investigación, básica y aplicada, realizada en los últimos años acerca de los materiales semiconductores orgánicos les ha permitido ser considerados como una alternativa real y viable en tales aplicaciones, las cuales se denominan de forma genérica *opto-electrónica orgánica*.

Como caso particular, en los últimos 20 años se han dedicado grandes esfuerzos para desarrollar diodos emisores de luz orgánicos (OLEDs) los cuales tienen aplicaciones en pantallas señalizadoras (*displays*) e incluso

en iluminación. Como resultado de estos esfuerzos, se cuenta actualmente con una tecnología ya madura que está entrando al mercado comercial para competir en varios nichos de aplicación, sobre todo en aquellos en donde se requieren pantallas delgadas y flexibles como las observadas en las fotografías de la imagen 1. La maduración de la tecnología de los OLEDs impulsó a otras tecnologías basadas en materiales orgánicos. Dos ejemplos son las celdas solares conocidas como *celdas OPVs* (Organic Photovoltaics) y las de estructura semi-líquida e híbrida (orgánica-inorgánica) que contienen un electrolito líquido y colorantes sensibilizadores, conocidas como *DSSC* (Dye Sensitized Solar Cells) (Barbosa-García, *et al.*, 2012). Es de interés mencionar que en los OLEDs se aplica electricidad y se genera luz, mientras que en las celdas OPVs y DSSC, se absorbe luz y se genera electricidad (Maldonado, *et al.*, 2008, y Herrmann y Würfel, 2006).

Imagen 1. Paneles de iluminación y pantallas (displays) delgadas, flexibles, de bajo consumo energético y nitidez de imagen basadas en la tecnología de OLEDs



Fuente: imágenes obtenidas de <http://www.ipms.fraunhofer.de/en.html> y <http://www.tecnologia123.com/tag/pantallas-flexibles>, consultadas el 21 de marzo de 2013.

Las celdas OPVs presentan actualmente una eficiencia de alrededor de 9 % mientras que las celdas DSSC tienen una eficiencia típica de 11 %; como se mencionó antes, la eficiencia de dispositivos inorgánicos cristalinos (a base de silicio) es arriba del 20 %. Las estructuras de celdas orgánicas están siendo ampliamente estudiadas y de las dos, la más prometedora es la basada en películas delgadas amorfas de estado sólido (celdas OPVs) ya

que las DSSC conocidas como “celdas húmedas” tienen importantes limitaciones tecnológicas inherentes a su arquitectura y proceso de fabricación. Es por ello que este artículo se referirá preferentemente a las celdas OPVs. La evolución de la eficiencia de conversión lograda desde la década de los setenta en las celdas OPVs ha sido impactante: en 1975 fue del 0.001 %; en 1986 del 1 %; en 2006 fue del 5.5 %; en 2009 fue del 6.1 % y actualmente (2012-2013) se han reportado eficiencias superiores al 9 % (Barbosa-García, *et al.*, 2012) (recientemente la compañía Samsung ha reportado eficiencias de conversión del 10 %). Sin embargo, es de importancia señalar que en los grupos de investigación y en la literatura la mayoría de las investigaciones reportan eficiencias típicas entre 3 y 5 %.

Tanto el incremento de la eficiencia y de la vida útil de las celdas OPVs, así como del almacenamiento de la energía eléctrica obtenida permitirán a mediano plazo competir con la tecnología inorgánica convencional. Actualmente el tiempo de vida de las celdas solares orgánicas producidas en los laboratorios es de semanas o meses mientras que, por su parte, las celdas a base de materiales inorgánicos tienen tiempos de vida de 15-20 años. Es importante hacer notar que las celdas solares únicamente transforman la energía solar en eléctrica por lo que es necesario contar con *acumuladores eléctricos* para el almacenaje de esta energía foto-generada. Lo anterior es necesario ya que, aun y cuando se llegara a tener una alta eficiencia de conversión, usualmente no será posible alimentar directamente a algún dispositivo con la energía obtenida. Por ejemplo, las pequeñas lamparillas de decoración en jardines no se encienden directamente con la conversión fotovoltaica sino que durante el día esta energía eléctrica está siendo almacenada en una pequeña batería recargable. Bastaría tener una celda solar orgánica con baja eficiencia de conversión, i.e. 5 %, y un buen sistema de almacenaje para que esta conversión fotovoltaica de energía eléctrica pudiera ser de utilidad para ciertos usos comerciales.

Por otro lado, en cuestión del costo para la generación de energía a partir de celdas OPVs debemos de tener en cuenta que en Estados Unidos la generación de energía eléctrica actual por medio de celdas solares de silicio se estima en unos 30 centavos de dólar por kilowatt-hora (Barbosa-García, *et al.*, 2012). Mientras que el precio en una zona residencial la energía eléctrica producida por medios tradicionales (una planta hidro-eléctrica o

termo-eléctrica) es de unos 8 centavos de dólar (Barbosa-García, *et al.*, 2012), en México el costo residencial es de alrededor de un peso el kilowatt-hora. El mayor costo en la producción de electricidad con celdas solares inorgánicas comparado con los métodos tradicionales se debe a los costos de fabricación de estos dispositivos. Obsérvese que para la fabricación de las celdas basadas en silicio normalmente se requiere de cuartos limpios. Esto es, para producir estas celdas inorgánicas se requiere un control en la cantidad de partículas del aire, temperatura, humedad, flujo de aire, presión interior del aire, iluminación, etc. Estos cuartos limpios pertenecen a una tecnología muy costosa que pocas instituciones pueden tener, sobre todo cuando se trata de una fabricación a gran escala. Por el contrario, para producir las celdas OPVs no se requiere tener un control estricto de los parámetros antes mencionados y pueden fabricarse en laboratorios con equipos mucho más económicos sin necesidad de cuartos limpios. Un cuarto limpio en su costo inicial es de decenas de miles de dólares, y también el precio de mantenimiento es muy alto. Por todo lo anterior, es difícil decir cuántas veces más económica será la producción de celdas OPVs en comparación con el costo de producción de celdas inorgánicas. Sin embargo es claro que, por el simple hecho de no requerir cuartos limpios para la fabricación de celdas orgánicas, se puede señalar un menor costo en la energía obtenida.

Por otra parte, las celdas OPVs podrían, en su producción, tener menores impactos al medio ambiente que otro tipo de celdas, incluso al tratarse de materiales orgánicos se puede lograr una descomposición natural de los mismos. Además, los materiales empleados en celdas orgánicas tienen propiedades superiores ya que son muy ligeros, pueden ser transparentes y flexibles, características inherentes de su naturaleza orgánica. De hecho las aplicaciones (en forma de prototipos) que se tienen actualmente en el mercado se enfocan en artefactos o utensilios de uso común y cotidiano tales como mochilas, portafolios, carpas para fiestas, para circos, para reuniones, en estaciones de autobuses, en ventanas de edificios, entre otras. Todo lo anterior para alimentar eléctricamente pequeños dispositivos como celulares y pequeñas lámparas de iluminación mientras se usan los utensilios mencionados, ver imagen 2. Todas estas aplicaciones pueden hacerse realidad dada la flexibilidad y transparencia de esta nueva tecnología polimérica.

Estas propiedades se deben a que las celdas OPVs pueden fabricarse totalmente a partir de *polímeros plásticos* con grosores del orden de 100 nanómetros (un nanómetro = nm = 10^{-9} m). En este sentido, se prevé que ambas tecnologías de celdas solares (inorgánica y orgánica) serán complementarias en un futuro encontrando cada una de ellas sus aplicaciones particulares.

Imagen 2. Diferentes prototipos de celdas OPVs



Las celdas OPVs pueden estar presentes en techos, cubiertas, ventanas y mochilas. Éstas pueden suministrar energía a productos personales (celular, cargadores varios, pequeñas lámparas, entre otras).

Fuente: imágenes obtenidas de <http://www.konarka.com>, consultada el 21 de marzo de 2013.

En este mundo globalizado algunos países han logrado conjuntar esfuerzos para desarrollar fuentes renovables de energía como es el caso de Alemania. Este país es líder mundial en este tipo de energías y se ha propuesto generar 20 % de sus requerimientos energéticos a través de tecnologías renovables. En particular, Alemania es el principal productor de energía fotovoltaica superando a

Japón y es líder mundial en energía eólica. En un futuro estas tecnologías renovables en su conjunto (eólica, biocombustibles, fotovoltaica inorgánica y orgánica, entre otras) pudieran ser una fuente energética sumamente importante para cuando el petróleo se termine.

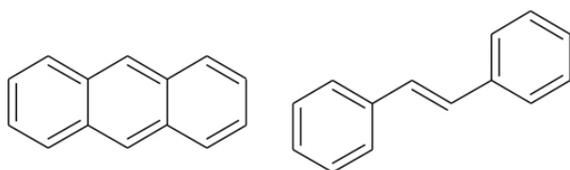
Por todo lo anterior, para que las celdas OPVs tengan realmente un impacto comercial profundo, es necesario que las eficiencias de conversión de luz solar a eléctrica sean mayores al 10 %, con un tiempo de vida de años y contar con sistemas de almacenamiento de energía adecuados. Para lograr este impacto se hace notar que el número de publicaciones científicas y de grupos de investigación en este campo se han incrementado considerablemente en los últimos años (Advanced Materials, 2013, y Zhou, Yang y You, 2012). La característica que guardan estos grupos de investigación es la de estar conformados de manera multidisciplinaria y dedicados a la búsqueda de novedosos materiales orgánicos y de nano-tecnologías para ser usados en aplicaciones fotovoltaicas. También, el número de patentes relacionadas con nuevos materiales (polímeros, óxidos metálicos transparentes, etc.) que se están usando en celdas OPVs se ha incrementado desde el año 2000. En ese año el número de patentes era de alrededor de 100, y para el año 2009 el número se incrementó en un orden de magnitud, es decir el número de patentes fue de alrededor de 1000 (Barbosa-García, *et al.*, 2012).

1. Compuestos orgánicos

Un compuesto orgánico es aquel que está formado principalmente por átomos de carbono (C) e hidrógeno (H). Estos compuestos pueden también contener átomos de nitrógeno (N), oxígeno (O), azufre (S) entre otros; los átomos de carbono se unen por enlaces covalentes que pueden ser de dos diferentes tipos, sigma (σ) y pi (π). Los primeros son enlaces sencillos, es decir sólo intervienen un par de electrones, mientras que en los enlaces pi pueden existir un enlace doble o uno triple (intervienen 2 o 3 pares de electrones); ambos enlaces (σ y π) presentan diferentes propiedades tanto estructurales como electrónicas, un ejemplo es en la deslocalización de los electrones que ocurre cuando en el enlace participan 2 o 3 pares de electrones. En tal caso se dice que se tiene una estructura conjugada (alternancia de enlace simple y doble) y que confiere al compuesto propiedades opto-

electrónicas muy interesantes (Figura 1) (Rodríguez, *et al.*, 2009). Los compuestos que poseen únicamente enlaces sigma son por lo general incoloros, mientras los que tienen enlaces *pi* son usualmente coloridos. Cuando además los dobles enlaces se encuentran conjugados (Rodríguez, *et al.*, 2009), los compuestos son muy coloridos, como es el caso de muchos productos naturales. Un ejemplo es el licopeno responsable del color rojo del jitomate que presenta 11 dobles enlaces π conjugados. Los compuestos que contienen enlaces *pi* conjugados pueden ser de bajo peso molecular o *polímeros*: cadena muy grande de moléculas, y muestran propiedades de gran interés en el área de los materiales fotónicos.

Figura 1. Estructura química general de moléculas orgánicas conjugadas



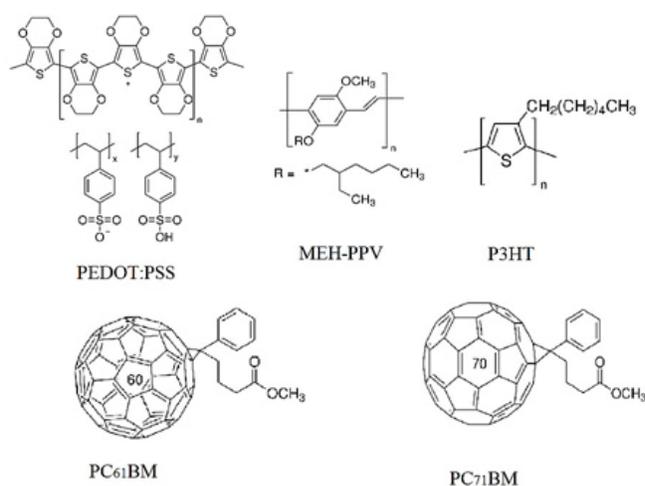
Fuente: elaboración propia.

1.1 Compuestos orgánicos depositados en películas delgadas

Una de las ventajas que tienen los compuestos orgánicos es la versatilidad con la que se pueden realizar modificaciones en su estructura química que permitan modular sus propiedades mecánicas, ópticas y electrónicas. En cuanto a sus propiedades mecánicas, un claro ejemplo es la posibilidad de fabricar de manera relativamente fácil y rápida películas de estado sólido con grosores comparables al de un cabello humano (películas gruesas) o bien cerca de mil veces más delgadas (películas delgadas). Las películas se pueden depositar a temperatura ambiente sobre una gran variedad de sustratos, lo cual es fundamental para la fabricación de los dispositivos fotónicos y opto-electrónicos plásticos como los OLEDs y las celdas OPVs. Una de las técnicas más simples, fáciles y económicas de fabricar películas a base de polímeros es la de centrifugación (Maldonado, *et al.*, 2008). Esta técnica consiste en depositar pequeñas cantidades de la solución

líquida sobre un sustrato como vidrio o cuarzo. Esta solución se hace girar a altas velocidades, por ejemplo 2000 revoluciones por minuto, evaporándose rápidamente el disolvente y obteniéndose una película homogénea de gran transparencia y calidad óptica. La figura 2 muestra ejemplos de estas estructuras químicas conjuntamente con el compuesto conductor poli (3,4-ethilenodioxitiofeno) -poli (stirenosulfonato) (PEDOT:PSS) que también juega un papel determinante en la fabricación de las celdas solares orgánicas (para la homogeneidad y colección de cargas eléctricas en conjunto con el ánodo) y los derivados de fullereno PC₆₁BM y PC₇₁BM usados como electro-aceptores (sensibilizadores).

Figura 2. Estructuras químicas de polímeros semiconductores típicos así como de los fullerenos PC₆₁BM y PC₇₁BM usados comúnmente para la fabricación de celdas OPVs



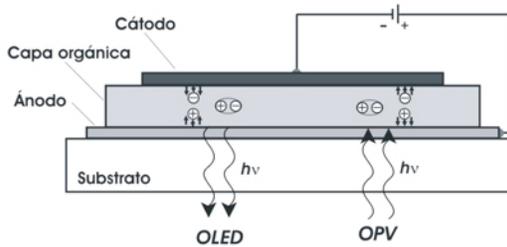
Fuente: elaboración propia.

2. Operación básica de los OLEDs y celdas OPVs

La electroluminiscencia es el proceso eléctrico-óptico mediante el cual un material puede producir luz a partir de la aplicación de una corriente eléctrica (electricidad); para el caso de materiales orgánicos los dispositivos emisores de luz se conocen como OLEDs (*Organic Light Emitting Diodes*). El proceso inverso a la electroluminiscencia, esto es, el proceso para producir electricidad a partir de la absorción de luz es el efecto fotovoltaico y el disposi-

tivo que ilustra este proceso con materiales orgánicos es la celda OPV. En los OLEDs la electroluminiscencia se basa en la inyección de *huecos* libres (cargas eléctricas positivas o tipo p) y *electrones* (cargas negativas o tipo n) desde los electrodos hacia la película orgánica. Estos huecos y electrones se unen en dicha película para formar un excitón que al recombinarse permite la generación de luz. Un excitón es una pareja *electrón-hueco* fuertemente unida por la atracción Coulombiana. Por otro lado, cuando una celda OPV se ilumina, la luz es absorbida por el material orgánico produciéndose de igual manera un excitón. El excitón se desplaza entre las moléculas orgánicas ocurriendo una *disociación* de éste (esto es, la separación de los huecos y electrones) y son los huecos y electrones “libres” quienes migran a sus respectivos electrodos produciendo una corriente y una diferencia de potencial o voltaje. En la figura 3 se representan ambos fenómenos, tanto para un OLED como para una celda OPV, en su configuración más simple de una sola película orgánica entre dos electrodos: ánodo y cátodo.

Figura 3. Esquema más simple para dos dispositivos opto-electrónicos: un OLED y una celda OPV y los procesos de emisión y absorción de luz inherentes a cada dispositivo



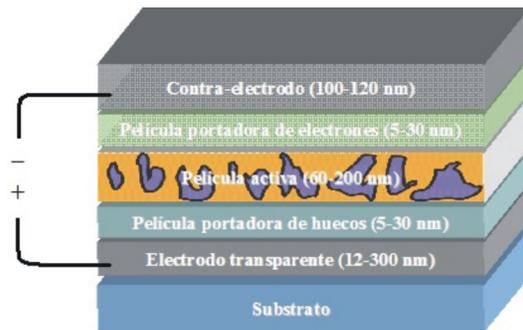
Fuente: Maldonado, *et al.*, 2008, y Hermann y Würfel, 2006.

Debido a que la inyección de carga eléctrica (o colección de carga para una celda OPV) es un factor crucial que determina la cantidad de luz emitida en los OLEDs (y la corriente y voltaje de operación en las celdas OPVs), se usan electrodos metálicos con baja y alta función de trabajo como cátodos y ánodos respectivamente. La *función de trabajo* es la energía necesaria para el desprendimiento de un electrón en un metal. Lo anterior reduce las barreras energéticas de inyección para OLEDs y mejora la colección de carga en celdas OPVs. La función de trabajo de los electrodos debe además correlacionarse con los niveles energéticos denominados LUMO (orbital molecular

no ocupado más bajo) y HOMO (orbital molecular ocupado más alto) de los compuestos orgánicos empleados. Estos niveles LUMO y HOMO son análogos a las *bandas de valencia* y *conducción* en un semiconductor inorgánico. También, la *movilidad* de electrones y huecos o, en otras palabras, la rapidez de carga eléctrica por unidad de campo eléctrico aplicado, es otro factor muy importante para el óptimo funcionamiento de los OLEDs y las celdas OPVs. En general, los materiales orgánicos transportan preferentemente huecos o electrones con movilidades típicas de entre 10^2 y 10^7 cm^2/Vs .

Dentro de los diversos diseños que se han empleado para incrementar la eficiencia de los OLEDs y OPVs, está el de utilizar capas múltiples de materiales orgánicos. Cada una de estas capas realiza una función específica dentro del dispositivo, por ejemplo, una capa es para inyectar (o extraer en celdas OPVs) cargas eléctricas positivas o negativas, otras que son portadora de cargas y otras más que son emisoras (o absorbentes) de luz. Las capas activas tanto en dispositivos OLEDs y OPVs típicamente son de menos de 100 nanómetros. En la figura 4, para una celda OPV tenemos un esquema multicapa más completo y complejo donde se indican además los espesores típicos. En dicha figura, la generación de carga eléctrica se asegura a través del volumen entero (heterounión de volumen: BHJ por sus siglas en inglés) de la película foto-activa reduciendo la recombinación de excitones e incrementado la eficiencia de conversión de luz solar.

Figura 4. Esquema de una celda solar orgánica (celda OPV) multicapa



Fuente: elaboración propia.

3. Preparación de las celdas OPVs

Usualmente las películas orgánicas son preparadas por

métodos tales como *centrifugación* o *Langmuir-Blodgett* usando distintos disolventes con diferentes concentraciones de moléculas y polímeros a mezclar. Se depositan sobre sustratos de vidrio o plástico conteniendo ITO (óxido de indio estaño) que usualmente es el ánodo. Estos electrodos de ITO deben de estar completamente limpios. Para ello son lavados usando ultrasonido y baños de etanol, agua y soluciones para limpieza de sustratos ya que cualquier partícula de polvo o humedad puede afectar considerablemente la calidad de las películas y, con ello, la funcionalidad de las celdas solares. Como cátodo se puede usar el metal de Wood (Pb 25%, Bi 50%, Cd 12.5%, Sn 12.5%) y el de Field (32.5 % Bi, 51 % In, 16.5 % Sn), para depositarlo se coloca un trozo del metal en un matraz de vidrio pyrex sobre una parrilla por encima de los 90 °C y una vez fundido se vierte sobre las películas orgánicas previamente depositadas. En la figura 5 se muestran imágenes secuenciales del método que ha desarrollado el GPOM-CIO para la fabricación y parte de la caracterización de las celdas OPVs. Empleando la técnica de centrifugación para el depósito de películas poliméricas, en el GPOM se han desarrollado celdas orgánicas con diversas eficiencias hasta lograr 2.7 %. En la figura 6 se muestra la evolución de eficiencias logradas por el GPOM-CIO haciendo uso de polímeros semiconductores orgánicos MEH:PPV y P3HT, de los fullerenos PC₆₁BM y PC₇₁BM (ver figura 2), así como películas nano-estructuradas de óxido de titanio (TiOx) y de un compuesto de bajo peso molecular basado en boro (M1), que fue sintetizado por el GPOM y colaboradores (Salinas, *et al.*, 2011, y Salto, *et al.*, 2011).

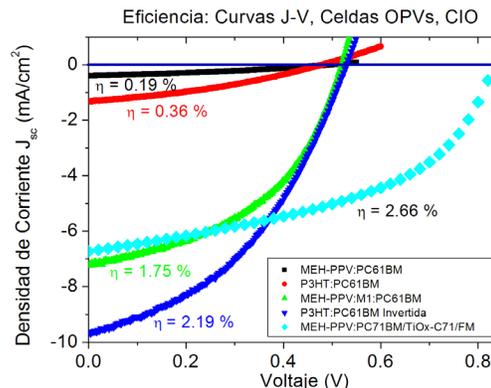
Figura 5. Proceso de manufactura



Depósito de películas orgánicas por centrifugación en un sustrato de vidrio con el ánodo (ITO), depósito del metal de Wood (o de Field) y observación de la función fotovoltaica de una celda solar orgánica. El metal de Wood y el de Field pudieran ser una alternativa a los electrodos tradicionales usados

Fuente: Salinas, *et al.*, 2011, y Salto, *et al.*, 2011

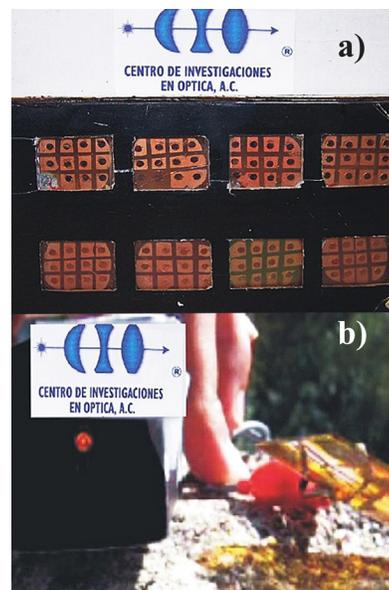
Figura 6. Evolución de eficiencias (η) logradas en el CIO en celdas solares orgánica



Fuente: elaboración propia.

Con módulos de celdas ensambladas en serie (donde se logra aumento del voltaje generado) y en paralelo (aumento de la corriente), en el CIO, ya se están encendiendo LEDs y pequeños motores al irradiarlos con luz solar, imagen 3.

Imagen 3.



a) Conexiones en paralelo y en serie para formación de módulos fotovoltaicos de celdas OPVs desarrolladas en el CIO.
 b) Encendido de un dispositivo LED rojo con módulos de celdas fotovoltaicas orgánicas al ser irradiados con luz solar

Fuente: fotografías tomadas en el CIO.

4. Caracterización eléctrica-óptica de celdas OPVs

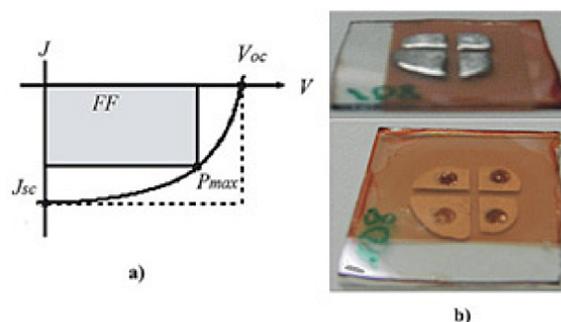
La caracterización optoelectrónica de una celda solar se realiza al medir la eficiencia de conversión (medida de los fotones de luz incidentes en la celda y que son convertidos en electricidad) bajo la condición de iluminación AM 1.5: estándar de intensidad de iluminación sobre la superficie de la Tierra cuando el ángulo cenit del Sol es de 48° y que corresponde entre 800 y 1000 W/m². Los parámetros útiles para lo anterior son: el voltaje de circuito abierto (V_{oc}), la densidad de corriente de corto circuito (J_{sc}), el voltaje de máxima potencia (V_m), la densidad de corriente de máxima potencia (J_m) y el factor de llenado (FF), estos parámetros se ilustran gráficamente en la figura 7. El FF así como están definidos por las ecuaciones (1) y (2) donde P_{in} es la intensidad de iluminación incidente. Para lograr altas eficiencias de conversión eléctrica se requiere tener los máximos valores de V_{oc} , J_{sc} , y FF.

$$\eta = FF \frac{V_{oc} J_{sc}}{P_{in}} \quad (1)$$

$$FF = \frac{V_m J_m}{V_{oc} J_{sc}} = \frac{P_{max}}{V_{oc} J_{sc}} \quad (2)$$

Las celdas son preliminarmente probadas bajo iluminación solar y posteriormente se obtienen las curvas J - V (ver también figura 6) mediante un medidor-fuente de corriente-voltaje y una lámpara de xenón o halógeno que simula el Sol y que es calibrada con una celda de referencia a 100 mW/cm². La lámpara emite luz con un espectro muy similar al del Sol en el visible y cercano infrarrojo. Las pruebas se realizan en condiciones atmosféricas naturales (pudiéndose también realizarse bajo atmósferas controladas, ver sección 6). Con algunos de los compuestos orgánicos sintetizados por nuestro grupo en combinación con polímeros comerciales y distintas arquitecturas, así como con el uso del metal de Wood o de Field en uno de los electrodos, el GPOM ha logrado $V_{oc} \sim 700$ mV, $J_{sc} \sim 7.5$ mA/cm² y $\eta \sim 1.8$ %, aunque recientemente ya se obtuvo $\eta \sim 2.7$ (ver figura 6).

Figura 7.



a) Gráfica J - V para una celda OPV típica. Geométricamente el factor de llenado (FF) puede visualizarse como la razón de áreas del rectángulo gris y el rectángulo punteado ($P_{max}/V_{oc}J_{sc}$).
b) Fotografías de celdas solares con el metal de Field como cátodo y fabricadas en el CIO

Fuente: elaboración propia.

5. GPOMy proyecto Conacyt-Sener

En el Grupo de Propiedades Ópticas de la Materia (GPOM): http://www.cio.mx/invest_13/gpom/lineas_inv.html, de la División de Fotónica del Centro de Investigaciones en Óptica (CIO) se ha consolidado en los últimos años una línea de investigación sobre *fotónica y opto-electrónica* basada en *materiales orgánicos y sus aplicaciones*. Esta línea de investigación ha sido producto del trabajo multidisciplinario e interinstitucional por medio de una estrecha colaboración con investigadores de distintos departamentos de química y ciencias de materiales ya que, a través del diseño, síntesis y modificación (*ingeniería molecular*) de diversas estructuras químicas, así como su caracterización eléctrico-mecánica, óptica y aplicaciones foto-electrónicas, se han logrado resultados significativos que han generado experiencia para desarrollar celdas OPVs eficientes. Hasta donde sabemos, este grupo es a nivel nacional el que ha logrado mayores aportaciones científicas en el área de la *fotónica y opto-electrónica orgánicas*. Es en este sentido que en el GPOM-CIO, en conjunto con grupos de química y ciencias de materiales de distintas instituciones como la UNAM, el Cinvestav-DF, la Universidad Autónoma de Madrid (UAM), la Universidad Autónoma del Estado de México- UNAM (UAEMEX- UNAM), la Universidad Autónoma de la Ciudad

de México (UACM), la Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEMOR), la Universidad de Guanajuato, entre otros, se realiza el diseño-síntesis de diversos compuestos así como estudios químicos, eléctricos, estructurales y ópticos sobre una variedad de nuevos materiales orgánicos fotónicos donde un uso en concreto es en la fabricación de celdas solares. El GPOM-CIO, conjuntamente con colaboradores de la UNAM, Cinvestav-DF y UAM (España), tiene aprobado el proyecto Conacyt-Sener (Secretaría de Energía) 153094 (2011): “*Diseño y desarrollo de celdas solares orgánicas (OPVs) eficientes para la generación de energía eléctrica limpia*”. El objetivo principal de este proyecto es que en México se logren eficiencias arriba del 6 %; actualmente en el CIO se han logrado eficiencias del 2.7 % resaltando que su fabricación ha sido de manera “artesanal” pero, recientemente, se adquirió un sistema de depósito de películas delgadas dentro de Cajas de Guantes con atmósfera controlada para la fabricación y prueba de nuestras celdas OPVs.

6. Sistema de Depósito al Vacío y Cajas de Guantes para la fabricación de Celdas Solares Orgánicas (OPVs) y otros dispositivos opto-electrónicos plásticos

En el GPOM-CIO se acaba de adquirir e instalar un *Sistema de Depósito de Películas Delgadas por Evaporación a Alto Vacío dentro de Cajas de Guantes con atmósfera de gas inerte* (ver imagen 4) con el apoyo del proyecto Conacyt-SENER mencionado y del mismo CIO. Este sistema es único en México y contiene 8 fuentes de depósito para 8 distintos materiales, tanto orgánicos (con 4 de las 8 fuentes se tiene un control preciso de la temperatura, hecho muy útil para materiales orgánicos) como inorgánicos (particularmente metales) por lo que en un solo sustrato y en una sola sesión de trabajo se pueden fabricar dispositivos multicapa con hasta 8 películas de diferentes materiales o bien con un número mayor de capas repitiendo algunos materiales depositados. Asimismo, pueden co-evaporarse simultáneamente dos o más materiales de las diferentes fuentes para formar películas compuestas. Con este sistema se pueden fabricar películas tan delgadas como 1 nm (10^{-9} m) hasta de varios cientos de nm usando velocidades de deposición desde 0.01 nm/s y con áreas máximas de 5×5 cm²; este proceso se realiza dentro de una cámara de alto vacío que usa un régimen criogénico basado en helio líquido

para congelar y extraer las moléculas de aire permitiendo alcanzar presiones tan bajas como 10^{-8} - 10^{-9} torrs o mmHg. El sistema permite un control preciso en el depósito de las películas nano-métricas como son su espesor, homogeneidad, morfología, topografía y rugosidad. Además, todo este sistema se encuentra dentro de una Caja de Guantes de dos compartimientos, con atmósfera controlada, es decir, se puede tener una atmósfera inerte a base de nitrógeno o argón de alta pureza. Adicionalmente se cuenta con otra Caja de Guantes acopladas donde se pueden depositar películas orgánicas por otras técnicas, tales como centrifugación a revoluciones de entre 1000 y 6000 rpm y, en la restante sección de la primera Caja de Guantes, se estudia el funcionamiento fotovoltaico de los dispositivos fabricados, recalando que todo está bajo atmósfera inerte para evitar degradación de las películas depositadas por exposición al oxígeno y la humedad y, por lo tanto, de los dispositivos ensamblados. Es importante aclarar que todo este sistema descrito puede usarse no sólo para la fabricación y caracterización de celdas OPVs sino también para la fabricación de diodos orgánicos electroluminiscentes (OLEDs) que son ampliamente usados en pantallas, transistores orgánicos de efecto de campo (OFETs) entre otros módulos multicapas, es decir, puede ser usado para la elaboración de diversos dispositivos pertenecientes al campo de la *electrónica orgánica* (Advanced Materials, 2013) que es un área multidisciplinaria del conocimiento humano. Con estas investigaciones se impulsará en México la capacidad científica y tecnológica para la fabricación de celdas orgánicas fotovoltaicas como una potencial fuente de energía renovable, económica y limpia mediante una orientación multidisciplinaria e interinstitucional.

Imagen 4. Sistema de Depósito de Películas Delgadas + Cajas de Guantes con atmósfera controlada.



Fuente: fotografía tomada en el CIO.

7. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado una visión actual y general del desarrollo de las celdas solares basadas en materiales orgánicos. Este tipo de celdas generan energía eléctrica y conjuntamente con otras fuentes de energía renovables podrán jugar un papel importante para cubrir las necesidades energéticas en un futuro. Para sustituir las fuentes de energía no renovables se tendrá, entre otras alternativas, que recurrir a diversas tecnologías que satisfagan nuestras necesidades actuales de consumo energético. Las celdas OPVs pertenecen a una de esas tecnologías y actualmente buscan complementar y/o sustituir en lo posible el uso de la tecnología basada en materiales inorgánicos. Entre las ventajas de las celdas OPVs se tiene el poder tener un costo menor en la producción de energía ya que no se requiere de laboratorios sofisticados, de alto costo y de mantenimiento elevado; asimismo, generar menor cantidad de contaminantes durante su producción. Para un mayor éxito de las celdas OPVs es necesario, aparte de la búsqueda de una mayor eficiencia de conversión, el de incrementar su tiempo de vida y el de tener una tecnología adecuada para el almacenamiento de la energía eléctrica producida.

Para lograr el incremento en eficiencias de conversión es necesario enfocar esfuerzos globales en tres direcciones: 1) *Síntesis de nuevos materiales orgánicos capaces de absorber la mayor cantidad de luz solar, principalmente en la región visible y cercano infrarrojo (calor), foto-generando cargas eléctricas y posibilitando el transporte*

interno de las mismas, 2) Aumento de la eficiencia combinando diferentes materiales con novedosas arquitecturas e ingenierías de las celdas y métodos de fabricación y, 3) Comprensión fundamental de los fenómenos físico-químicos involucrados (estudios espectroscópicos) y el funcionamiento global de las celdas OPVs. Por lo que respecta a nuestro país, el GPOM-CIO y colaboradores han reportado eficiencias de 2.7 % y tienen la meta de aumentarla a un 6 % en los próximos dos años.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecemos a todos los integrantes y colaboradores del GPOM-CIO, a la colaboración de los colegas Drs. Rosa Santillan, Giovana Granados y Eusebio Juaristi del Cinvestav-DF; Drs. Norberto Farfán y Héctor García Ortega de la UNAM Dr. Tomás Torres de la Univ. Autónoma de Madrid (UAM), España; Dr. Bernardo Frontana-Urbe del CCIQS UAMEX-UNAM; todos ellos colegas investigadores químicos que han y están desarrollando ideas para lograr la síntesis de muchos de los compuestos orgánicos que han sido trabajados en nuestros laboratorios. Nuestro agradecimiento al M. en C. José Alfredo Del Oso de la Univ. Autónoma de la Ciudad de México y CCIQS UAEMEX-UNAM, que realizó una estancia sabática dentro del grupo y que participó activamente en nuestro trabajo cotidiano. Agradecemos también las contribuciones en aspectos teóricos de celdas OPVs del Dr. Jairo Nolasco quien recientemente se adhirió al GPOM a través de una Repatriación Conacyt. También agradecemos la invaluable labor de los estudiantes del grupo que constantemente han realizado diversas tareas de apoyo para este y otros trabajos, en particular, mencionamos el gran trabajo desarrollado por el M. en C. José Francisco Salinas, Estudiante de Doctorado del CIO en este campo de celdas solares orgánicas. Agradecemos a Martín Olmos, técnico de nuestros laboratorios por su invaluable asistencia técnica. También nuestro agradecimiento al Proyecto Conacyt-SENER 153094.

REFERENCIAS

- Advanced Materials (2013). *Special Issue: Organic electronics*. Recuperado de <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/adma.v25.13/issuetoc>, consultado el 2 de mayo de 2013.
- Bao, Z. & Locklin, J. (2007). *Organic Field-Effect Tran-*

- sistors (Optical Science and Engineering). Boca Raton: CRC Press.
- Barbosa-García, O., Maldonado, J. L., Ramos-Ortiz, G., Pérez Gutiérrez, E., *et al.*, (2012). *Celdas solares orgánicas como fuente de energía sustentable*. Acta Universitaria, Universidad de Guanajuato. 22(5), 36-48.
- Herrmann, F. & Würfel, P. (2006). *The semiconductor diode as a rectifier, a light source, and a solar cell: a simple explanation*. American Journal of Physics. 74(7), 591- 594.
- Maldonado, J. L. & Ramos-Ortiz, G. (2008). *Opto-electrónica orgánica (plástica); nueva tecnología*. Boletín de la Sociedad Mexicana de Física. 22(3), 131-136.
- Maldonado, J. L., Ramos-Ortiz, G., Miranda, M.L. Vázquez-Córdova, S., *et al.*, (2008). *Two examples of organic opto-electronic devices: Light emitting diodes and solar cells*. American Journal of Physics. 76(12), 1130-1136.
- Mishurny, V.A. & de Anda, F. (2007). *Celdas solares, aspectos técnicos y económicos*. Ciencia y Desarrollo. 33(212), 36-54.
- Müllen, K. & Scherf, U. (2006) (Eds.), *Organic Light Emitting Devices: Synthesis, Properties and Applications*. Weinheim: Wiley-VCH.
- Pagliaro, M., Palmisano, G. & Ciriminna, R. (2008). *Flexible Solar Cells*. Weinheim: Wiley-VCH.
- Rodríguez; M., Maldonado, J. L., Ramos-Ortiz, G., Meneeses Nava, M. A., *et al.* (2009). *Moléculas orgánicas: nuevos componentes para dispositivos fotónicos y opto-electrónicos*. Acta Universitaria, Universidad de Guanajuato. 19(2), 105-110.
- Salinas, J. F., Maldonado, J. L., Ramos Ortiz, G., Rodríguez, M., *et al.* (2011). *On the use of Woods metal for fabricating and testing polymeric organic solar cells: An easy and fast method*. Solar Energy Materials and Solar Cells. 95, 595-601.
- Salto, C., Salinas, J. F., Maldonado, J. L., Ramos-Ortiz, G., *et al.* (2011). *Performance of OPVs cells with the eutectic alloy Wood's metal used as cathode and P3HT:PC₆₁BM blend as active layer*. Synthetic Metals. 161(21-22), 2412-2416.
- Vigil Galán, O. (2008). *Conversión fotovoltaica: una contribución en la solución de la crisis energética global*. Boletín de la Sociedad Mexicana de Física. 22(1), 25-32.
- Zhou, H., Yang, L. & You, W. (2012). *Rational design of high performance conjugated polymers for organic solar cells*. Macromolecules. 45 (2), 607-632.

PÁGINAS ELECTRÓNICAS:

<http://www.ipms.fraunhofer.de/en.html>, consultada el 21 de marzo de 2013.

<http://www.tecnologia123.com/tag/pantallas-flexibles>, consultada el 21 de marzo de 2013.

<http://www.konarka.com>, consultada el 21 de marzo de 2013.