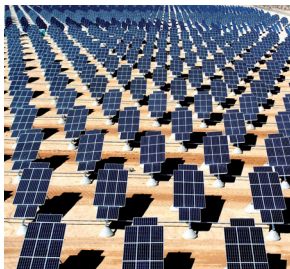


# Aplicaciones de la nanotecnología en fuentes alternas de energía

Domingo I. García-Gutiérrez, Marco A. Garza Navarro,  
René F. Cienfuegos Peláez, Leonardo Chávez Guerrero  
CIIDIT-FIME-UANL  
domingo.garciagt@uanl.edu.mx



## RESUMEN

*La nanotecnología ha recibido mucha atención en los últimos años, y en consecuencia ha generado expectativas que van más allá del ámbito académico. Su capacidad única de fabricar estructuras novedosas ha derivado en la creación de materiales y dispositivos con un gran potencial de aplicaciones en diferentes áreas del conocimiento. Entre éstas destaca el sector energético, en virtud de la necesidad de nuevas tecnologías que permitan sostener el creciente consumo de energía eléctrica a nivel mundial, y al mismo tiempo sean amigables con el medio ambiente. En este sentido, las celdas solares surgen como un dispositivo prometedor para la generación de energía limpia a través del uso de recursos alternos. El presente artículo tiene como finalidad el mostrar un panorama general de la aplicación de las nanoestructuras en el desarrollo de celdas solares.*

## PALABRAS CLAVES

Nanotecnología, nanoestructuras, celdas solares.

## ABSTRACT

*Nanotechnology has gained a lot of attention in the recent years, and therefore has built great expectations that go beyond the academic arena. Its unique capability to fabricate novel structures has already created new materials and devices with many possible applications in different areas of applied knowledge. Among these, the energy sector withstands due to its necessity for technologies that allows it to keep up with the ever growing world's energy demand, and also the requirement to be friendly with the environment during energy generation. Accordingly, solar cells arise as promising devices for the generation of clean energy that use alternative resources. The current article wants to present a general overview of the applications of nanostructures in the advancement of solar cells.*

## KEYWORDS

Nanotechnology, nanostructures, solar cells.

## INTRODUCCIÓN

Actualmente la mayor parte de la energía eléctrica a nivel mundial es producida mediante combustibles fósiles, lo cual presenta inconvenientes asociados a lo limitado de este recurso. Expertos en el tema de la energía están de acuerdo en

el hecho de que las reservas de combustibles fósiles solamente podrán satisfacer la demanda por algunas décadas más. Esta estimación se realizó integrando el consumo actual y su evolución en función de la demanda mundial. Otro gran inconveniente asociado al uso de combustibles fósiles es de carácter ecológico, y se ve directamente influenciado por las crecientes exigencias por parte de la sociedad de disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero, resultantes de la quema de estos combustibles. Bajo esta perspectiva, el ser humano se encuentra forzado a voltear su mirada a la producción de energía eléctrica utilizando tecnologías alternas que representen una solución sustentable, a fin de solventar la creciente demanda energética a nivel mundial. Las soluciones propuestas para una diversificación del suministro energético han contribuido a revitalizar la investigación en técnicas alternativas para la generación de energía.

La nanotecnología, por otro lado, ha sido un tema de gran interés científico y social durante las décadas más recientes. Muchos expertos a nivel mundial parecen coincidir en que la nanotecnología tiene el potencial para desarrollar técnicas de manufactura y materiales sin precedente. Es posible ver lo anterior, incluso, en el ámbito social y de las relaciones internacionales; es considerada una “megatendencia” y una tecnología disruptiva con potencial de influir en muchos ámbitos de la vida científica y social, que promete incrementar la eficiencia de muchas industrias tradicionales y desarrollar nuevas aplicaciones innovadoras mediante el uso de tecnologías emergentes.

El uso de la nanotecnología en técnicas alternas para la generación de energía es una de las tantas áreas con potencial para el desarrollo de nuevos dispositivos tecnológicos. Debido a ello, en los últimos años, diversos grupos de investigación alrededor del mundo han enfocado sus esfuerzos al desarrollo de nuevos materiales nanoestructurados, cuya finalidad es la obtención de tecnologías para el aprovechamiento de recursos alternos, tales como la energía solar. El presente artículo tiene como finalidad el presentar un panorama general sobre el uso de nanoestructuras en la fabricación de dispositivos con el potencial de convertirse en la principal fuente de aprovechamiento de la energía solar. Estos dispositivos son las celdas solares.

## IMPORTANCIA DE LAS CELDAS SOLARES EN EL CONTEXTO DEL APROVECHAMIENTO DE FUENTES ALTERNAS DE ENERGÍA

La energía solar es una de las que mayor atención ha recibido, no solo por parte de la comunidad científica, sino también por la sociedad en general. La luz del sol es, sin duda, la mayor fuente de energía libre de emisiones de carbón que existe; llega más energía a la tierra en los rayos del sol en una hora ( $4.3 \times 10^{20}$  J), que toda la energía consumida en el planeta en un año ( $4.1 \times 10^{20}$  J).<sup>1</sup> No obstante, en la actualidad, solo alrededor del 0.1%<sup>1</sup> de la electricidad producida en el mundo es captada de los rayos del sol por celdas solares y convertida en energía eléctrica.<sup>1</sup>

Las celdas solares convierten la energía solar en energía eléctrica, gracias a la excitación de electrones con radiación electromagnética en distintos intervalos de frecuencias, que van desde el ultravioleta hasta el cercano infrarrojo. Las celdas solares son fáciles de usar e instalar, lo cual, además de presentar la ventaja de poder emplazarse como sistemas modulares, expande sus usos, que van desde su aplicación en aparatos electrónicos como calculadoras y relojes, hasta su uso en plantas generadoras de energía de considerable envergadura. Sin embargo, uno de los principales obstáculos para el uso de los dispositivos fotovoltaicos en sistemas de generación de energía eléctrica a gran escala, es que, actualmente, el costo del dispositivo por potencia eléctrica generada no es competitivo con el costo de la energía eléctrica producida por medios convencionales, como la quema de combustibles fósiles.<sup>2</sup>



Paneles solares emplazados en un satélite de la misión. Observatorio de Relaciones solar-Terrestres (STEREO), por sus siglas en inglés) de la NASA.

En razón a lo anterior, en años recientes ha ganado atención la investigación acerca del uso de nanopartículas de materiales semiconductores para la fabricación de celdas solares. Aunado a sus elevadas secciones transversales de absorción y al bajo costo relacionado con su fabricación y procesamiento, las nanopartículas semiconductoras son un material que ofrece una alta probabilidad de producir celdas solares de altas eficiencias de conversión y de bajos costos asociados a su producción; comparadas con las celdas solares convencionales base silicio, la producción de celdas a partir de nanopartículas no involucra procedimientos de fabricación tan costosos como lo son: tratamientos térmicos a altas temperaturas en alto vacío y litografía.<sup>3</sup>

### DISPOSITIVOS FOTOVOLTAICOS BASADOS EN HETERO-UNIONES HÍBRIDAS

Uno de los primeros trabajos que reporta el uso de nanoestructuras para la fabricación de dispositivos fotovoltaicos (celdas solares) es el trabajo de Huynh y colaboradores.<sup>3</sup> En dicho trabajo se reporta el uso de un material compuesto de nanobarras de selenuro de cadmio (CdSe) distribuidas en una matriz de poli(3-hexiltiofeno) (P3HT), como la capa absorbente de radiación electromagnética; a este tipo de dispositivos fotovoltaicos se les denomina "celdas solares de heterouniones híbridas".<sup>4</sup> En las celdas solares de heterouniones híbridas se mezclan componentes semiconductores, cuyos portadores de carga mayoritarios sean tipo-p (huecos) y tipo-n (electrones), a fin de lograr una eficiente separación de portadores de carga en la interfase entre ambos, y un subsecuente transporte de carga hacia los electrodos del dispositivo. En este contexto, los pares de portadores de carga, electrón-hueco, se generan cerca de la interfase heterogénea entre el polímero semiconductor (P3HT) y la nanoestructura semiconductor, mismos que son rápidamente separados por medio de la transferencia de uno de los dos portadores de carga a través de dicha interfase, a fin de participar en la conducción electrónica hacia los electrodos.<sup>4</sup>

Otro ejemplo de celdas solares de heterouniones híbridas es el reportado por Thompson y colaboradores. En este trabajo se documenta el uso de una combinación del P3HT (tipo-p) y el metil-éster-ácido, [6,6]-fenil-C61-burítico (PCBM,

tipo-n), siendo este último un derivado de los fullerenos.<sup>5</sup> En general, se han usado diferentes tipos de nanoestructuras, de composiciones químicas diversas, para la fabricación de prototipos de celdas solares, de entre las cuales se puede destacar el uso de nanoestructuras de silicio (Si),<sup>6</sup> CdSe,<sup>7</sup> selenuro de indio-cobre (CuInSe<sub>2</sub>),<sup>8</sup> óxido de zinc (ZnO),<sup>9</sup> sulfuro de cadmio (CdS), sulfuro de plomo (PbS)<sup>11</sup> y selenuro de plomo (PbSe).<sup>12</sup> Es importante hacer notar que, hasta el momento los prototipos de celdas solares de heterouniones híbridas han observado eficiencias máximas de tan solo el 2.2 % de conversión de energía.<sup>12</sup> Las bajas eficiencias de conversión se han relacionado con efectos tales como la falta de optimización de la superficie de la nanoestructura, debiéndose obtener una superficie que promueva, de manera efectiva, el intercambio de portadores de carga entre la nanoestructura y la matriz polimérica, a través de su interfase. Más aún, en algunos de estos trabajos de investigación se ha observado que la formación de fases segregadas de nanoestructuras dentro de la matriz polimérica, debida principalmente a su deficiente dispersión, afecta sustancialmente el desempeño de este tipo de dispositivos fotovoltaicos.

En virtud de lo anterior, y debido al excelente control de su tamaño y morfología, mediante métodos químicos, así como al alto valor del radio de excitón de Bohr, -distancia en la que se extiende el excitón, par de electrón, en banda de conducción, y hueco, en banda de valencia- que éstos presentan, los calcógenos de plomo, tales como el PbSe, PbS y telurio de plomo (PbTe), han recibido especial atención por parte de la comunidad científica.<sup>14,15</sup> Las características antes citadas permiten ajustar de manera precisa, mediante el confinamiento cuántico, -fenómeno que se presenta cuando el tamaño de la nanoestructura semiconductor es comparable con su radio de excitón de Bohr- el valor de la energía de banda prohibida dentro de un intervalo que permite la conversión de energía solar aun en el cercano infrarrojo ( $f > 120$  THz). Otro factor que hace a estos sistemas de nanopartículas tan atractivos para su aplicación en la fabricación de celdas solares, es la gama de morfologías que es posible obtener a través de procedimientos químicos; se ha reportado la preparación de nanoestructuras con morfologías tales como esferas, cubos, alambres, estrellas y anillos.<sup>16-18</sup> Asimismo, se ha observado que estos calcógenos de

Pb, particularmente el PbSe, son capaces de exhibir el fenómeno de “generación de múltiples excitones” (o GME, por sus siglas en inglés), -generación de más de un excitón, o par electrón-hueco, por parte de un solo fotón- lo cual incrementa la posibilidad de contar con altas eficiencias de conversión energéticas en celdas construidas a partir de este tipo de nanoestructura.<sup>19</sup> Es importante hacer notar que gracias a este fenómeno se abre la posibilidad de fabricar celdas solares capaces de superar el límite Shockley-Queisser,<sup>20</sup> en materiales semiconductores con una energía de intervalo prohibido única.

### DISPOSITIVOS FOTOVOLTAICOS BASADOS EN NANOCRISTALES EN MEDIO CONTINUO

Otro prototipo de celdas solares, también basada en nanoestructuras y ampliamente citado en la literatura, son las denominadas “celdas solares de nanocristales inorgánicos en medio continuo”.<sup>4</sup> Con este tipo de celdas se superan los problemas relacionados con la baja eficiencia de conversión de las “celdas solares de hetero-uniones híbridas”, y que se encuentran asociados a la deficiente dispersión de nanoestructuras en matrices de naturaleza disimilar, así como la foto-degradación y oxidación de polímeros semiconductores; lo anterior sin sacrificar las ventajas que ofrece el uso de nanoestructuras en la fabricación de celdas solares. En este contexto, recientemente se han publicado trabajos que describen la fabricación y funcionamiento de dispositivos fotovoltaicos de tipo Schottky, que usan una capa absorbente de luz basada en cristales sintetizados a partir del depósito de nanopartículas de PbS<sup>21,22</sup> y PbSe<sup>23,24</sup> sobre sustratos.



Módulos de paneles solares en el techo de residencias para alimentarlas con energía eléctrica foto-generada a partir de la radiación solar.

Usualmente estos dispositivos son fabricados a partir del depósito de las nanopartículas sobre sustratos de vidrio, previamente recubiertos con óxido de indio y estaño (ITO, por sus siglas en inglés), los cuales posteriormente son recubiertos, por técnicas de evaporación térmica, con una capa metálica (Mg, Al, Ca/Al, entre otros) la cual funge como el electrodo de la celda. Actualmente, la mayoría de este tipo de celdas solares presentan una eficiencia máxima de aproximadamente 4.2%.<sup>22</sup>

### DISPOSITIVOS FOTOVOLTAICOS BASADOS EN PELÍCULAS DELGADAS

Por otro lado, las calcopirritas de selenuro de cobre e indio (CuInSe<sub>2</sub> o CIS, por sus siglas en inglés) son también un grupo de compuestos con potenciales aplicaciones en la fabricación de celdas solares basadas en nanoestructuras. El atractivo de estos compuestos es que, según se ha reportado en la literatura, sus propiedades pueden manipularse a través de la adición de galio (Ga), el cual reemplaza parcialmente a los átomos de indio (In), y de azufre (S), que reemplaza una porción de los átomos de selenio (Se), siendo posible la obtención de compuestos no estequiométricos con fórmula CuIn<sub>1-x</sub>Ga<sub>x</sub>S<sub>y</sub>Se<sub>2-y</sub> (CIGS, por sus siglas en inglés).<sup>25</sup> La utilización de películas delgadas de estos compuestos permite eficiencias de conversión tan altas como del 19 %, gracias a que presentan características ópticas tales como alto coeficiente de absorción, y estructura de bandas con intervalo prohibido directo.<sup>25</sup>

Debido a su alta eficiencia de conversión, diversos grupos de investigación han dirigido su atención al desarrollo de coloides de compuestos CIGS,<sup>8</sup> explorando, además, rutas sintéticas para la preparación de nanoestructuras de compuestos como CuInS<sub>2</sub><sup>26</sup> y CuInSe<sub>2</sub>,<sup>27</sup> en la mayoría de estos reportes, las nanoestructuras fueron probadas en prototipos de celdas solares que típicamente presentaban una configuración de capas tipo vidrio/Mo/(CIGS tipo-p)/CdS/ZnO/ITO. Las eficiencias reportadas para este tipo de celdas solares están cerca del 3%.<sup>27</sup>

### CELDAS DE GRÄETZEL

Las celdas de Grätzel, también conocidas como celdas solares “sensibilizadas”, son construidas comúnmente a partir de óxido de titanio (TiO<sub>2</sub>), utilizado

para la fabricación de electrodos para dispositivos fotovoltaicos, moléculas “sensibilizadoras”, generalmente de complejos de bipyridina de rutenio (II), electrolitos redox, típicamente  $I^-/I_3^-$  o  $Co^{2+}/Co^{3+}$  en disolución orgánica, y un electrodo metálico, usualmente de platino.<sup>4</sup> En este tipo de celdas, la función del “sensibilizante” es la de absorber luz visible e inyectar electrones foto-generados hacia la banda de conducción del  $TiO_2$ . No obstante, este proceso carga positivamente a las moléculas del “sensibilizante”, provocando la subsecuente oxidación de los iones del electrolito ( $I^-$  a  $I_3^-$ , o  $Co^{2+}$  a  $Co^{3+}$ ). Debido a la diferencia de potencial entre los electrodos de la celda, estos iones difunden hacia el electrodo metálico, en donde se reducen electroquímicamente ( $I_3^-$  a  $I^-$  o  $Co^{3+}$  a  $Co^{2+}$ ), cerrando así el ciclo de la celda. Es importante resaltar que el uso de electrodos fabricados de  $TiO_2$  mesoporoso, sintetizado a partir de la sinterización de nanopartículas de anatasa, ha permitido incrementar el área superficial de su interfase con el electrolito, lo cual se traduce en un incremento en la eficiencia de este tipo de celda, alcanzando magnitudes de hasta el 11%.<sup>28</sup>

En la actualidad, además, se explora el uso de nanopartículas semiconductoras como agente “sensibilizante” para la fabricación de este tipo de celdas. Lo anterior debido principalmente a dos factores. Por un lado, el rutenio es un metal precioso y su abastecimiento es limitado, lo cual hace la síntesis de este tipo de nanoestructuras, en comparación, un medio más rentable para la fabricación de celdas de Grätzel. Más aún, la síntesis de nanopartículas semiconductoras ofrece la posibilidad de controlar las propiedades fotoeléctricas del agente “sensibilizante”, a través del control de su tamaño y morfología. En este sentido, algunos trabajos de investigación han arrojado resultados prometedores, reportando que, por ejemplo, la transferencia de electrones en interfaces de  $TiO_2/CdSe$  es sumamente eficiente.<sup>29</sup> No obstante, la utilización de nanopartículas semiconductoras para este fin se encuentra en una etapa muy temprana, ya que en la actualidad los mecanismos que rigen dicha transferencia son, aun, sujetos de estudio. Prueba de ello es el trabajo de W. A. Tisdale y colaboradores, recientemente publicado en la prestigiosa revista *Science*, en donde se presenta un estudio detallado de los mecanismos de transferencia de electrones en la interfase de

nanopartículas de  $PbSe$  y una película de  $TiO_2$ .<sup>30</sup> El resultado más destacable de esta investigación es la demostración experimental de que en este tipo de sistemas es posible transferir “electrones-calientes” (hot-electrons) -electrones que no están en equilibrio térmico con la red cristalina en la cual se encuentran- desde las nanopartículas de  $PbSe$  hacia la película de  $TiO_2$ , y aprovecharlos para la generación de electricidad; en los dispositivos fotovoltaicos tradicionales, este tipo de electrones disipan su energía en forma de calor, induciendo vibraciones en la red cristalina del semiconductor.<sup>30</sup>

### APUNTES IMPORTANTES ACERCA DEL DESARROLLO DE CELDAS SOLARES BASADAS EN NANOESTRUCTURAS

Ahora bien, a fin de aprovechar las posibles ventajas que ofrecen los sistemas antes mencionados, se deben reunir tres condiciones básicas.<sup>14</sup> En primer lugar, los niveles de energía de las nanoestructuras y de las matrices que las contengan tienen que alinearse de manera complementaria, de tal forma que faciliten la separación de los excitones foto-generados a portadores de cargas libres. Por otro lado, la cinética de la separación de los excitones a portadores de cargas libres, y el subsecuente transporte de dichos portadores de cargas, tiene que suceder más rápido que su recombinación. Finalmente, la morfología de los materiales compuestos (nanoestructura/polímero-semiconductor) tiene que maximizar el área interfacial entre ambos materiales para facilitar la separación de los excitones a portadores de cargas libres, y al mismo tiempo proveer un camino continuo para el transporte de dichos portadores de cargas a los electrodos de la celda.

### DESARROLLO DE MATERIALES ABSORBENTES DE LUZ PARA CELDAS SOLARES

Como se puede inferir del panorama hasta ahora presentado, el componente medular de una celda solar es en el que tiene lugar la foto-generación de excitones o pares electrón-hueco. Dicho dispositivo es comúnmente denominado capa absorbente de luz. Existen muchas y muy diversas técnicas para la preparación de estos materiales, y dependiendo de ellas es que uno u otro prototipo de celda, de los hasta ahora presentados, es fabricada.

Por ejemplo, el desarrollo de celdas solares basadas en películas delgadas, se logra generalmente a partir de técnicas de depositación térmica del material de la capa absorbente de luz sobre sustratos que fungen como electrodo del dispositivo fotovoltaico.<sup>25</sup> De entre las técnicas reportadas en la literatura para este fin destacan la co-evaporación de los reactivos y tratamiento térmico (recocido) de películas precursoras (elementales o de compuestos) en atmósferas controladas.<sup>31</sup> Se ha reportado que la deposición por co-evaporación de reactivos, por ejemplo de películas delgadas de CIGS, se logra a partir de una metodología de tres etapas, las cuales se llevan a cabo en atmósferas ricas en Se y bajo condiciones de ultra-alto vacío.<sup>32,33</sup> Esta metodología involucra la depositación de una capa de CIGS rica en Cu en un sustrato, a 450 °C, seguida de una capa rica en In a una temperatura de 550 °C.<sup>34</sup> La secuencia de depositación de capas asegura la formación de una película homogénea de CIGS con una conveniente deficiencia de Cu.<sup>2</sup> Es de resaltar que, a través de esta metodología, se ha logrado la preparación de materiales absorbentes de luz con una eficiencia de conversión de energía de hasta un 20 %.<sup>25,35-38</sup>

No obstante, como es de imaginarse, este método de preparación es costoso, y presenta como mayor problema una falta de control sobre la composición final de la película delgada de CIGS; la composición que se obtiene no es homogénea en toda la película depositada, principalmente cuando se intentan recubrir áreas de varios centímetros, lo cual afecta directamente a la eficiencia final de la celda solar, ya que la composición de la película tiene un efecto directo en la habilidad del material de convertir fotones a excitones. Por esta razón, actualmente se exploran metodologías de síntesis de nanocristales de CIGS, CuInS<sub>2</sub> y CuInSe<sub>2</sub> por medios químicos suaves. Se ha reportado el uso de acetil acetatos de In y Cu como precursores de dichos elementos, o en su defecto cloruros de In y Cu, además de cloruro de galio, mientras que para el caso del azufre y el selenio se usan sus polvos elementales como precursor;<sup>8</sup> la reacción se lleva a cabo en diclorobenceno a temperaturas que van desde los 180 °C hasta los 240 °C. Estas reacciones dan como resultado nanocristales que varían en tamaño desde los 5 nm hasta los 25 nm.

De manera análoga, se ha reportado la síntesis de nanopartículas de PbSe, PbS y PbTe utilizando

suspensiones de óxido de Pb en ácido oléico; esta suspensión se calienta a altas temperaturas (aproximadamente 150 °C) para que se forme un oleato de Pb. En su caso, la fuente de Se o Te proviene generalmente de disoluciones de estos elementos en trioctilfosfina (TOPO), misma que es posteriormente agregada al precursor de Pb durante la formación del oleato.<sup>14-18,39,40</sup> Las nanopartículas semiconductoras de calcógenos de Pb se forman inmediatamente después de agregar la disolución de Se o Te, y su tamaño final es controlado mediante un control de la temperatura y el tiempo de reacción. Este método de síntesis ha demostrado ser muy flexible y versátil, ya que cambiando algunos de los parámetros de la reacción se ha logrado observar un buen control en la morfología de las nanopartículas sintetizadas (véase figura 1). Algunos de los parámetros de la reacción que, de acuerdo a reportes, tienen un impacto directo en la morfología de las nanopartículas son la velocidad de enfriamiento de la reacción, la temperatura a la que se prepara el precursor de plomo y la adición de hexano al final de la reacción.<sup>17,40</sup>

Por otro lado, la preparación de absorbentes de luz a partir de materiales híbridos, entre nanopartículas y matrices poliméricas semiconductoras, es lograda a través de metodologías denominadas *ex situ*. En estas metodologías, las nanopartículas son sintetizadas, posteriormente su superficie es funcionalizada con algún ligando, y finalmente dispersas en disoluciones poliméricas. Una vez lograda la dispersión de las nanopartículas funcionalizadas en la disolución polimérica, la película de material híbrido puede prepararse por métodos de depositación como el “spin-coating” (SC).<sup>22,24,41</sup> Este método consiste en colocar una gota de la disolución de material híbrido

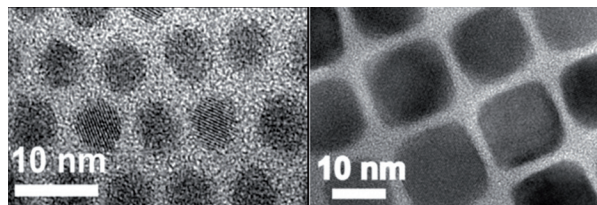


Fig. 1. Imágenes de TEM mostrando dos de las diferentes morfologías obtenidas en la síntesis de nanopartículas de los calcógenos de plomo. En la imagen de la izquierda se pueden apreciar nanopartículas con una forma esférica, mientras que en la imagen de la derecha, se pueden observar con una forma cúbica.<sup>40</sup>

sobre un sustrato, para posteriormente hacerlo rotar a una velocidad controlada, de manera que el fluido es dispersado sobre él, gracias a la fuerza centrífuga asociada a la rotación y al tiempo en que el disolvente es evaporado.

Asimismo, el desarrollo de películas absorbentes de luz, en dispositivos fotovoltaicos basados en nanocrisales en medio continuo, se logra a partir de métodos de deposición como el “dip-coating” (DC). En este caso, el sustrato es inmerso en una disolución coloidal de nanoestructuras, dejado ahí por un periodo determinado de tiempo, posteriormente retirado a una velocidad controlada y finalmente lavado para eliminar las moléculas de ligante con que se funcionaliza a las nanopartículas y se mejora el transporte de carga entre ellas.<sup>23,24</sup> Una de las grandes ventajas que ofrece este método es la facilidad con la que se puede controlar el espesor final de la película, ya que al repetir el paso de inmersión del sustrato en la disolución coloidal se puede aumentar el espesor final de la película. Un ejemplo de este tipo de películas es mostrado en la figura 2.

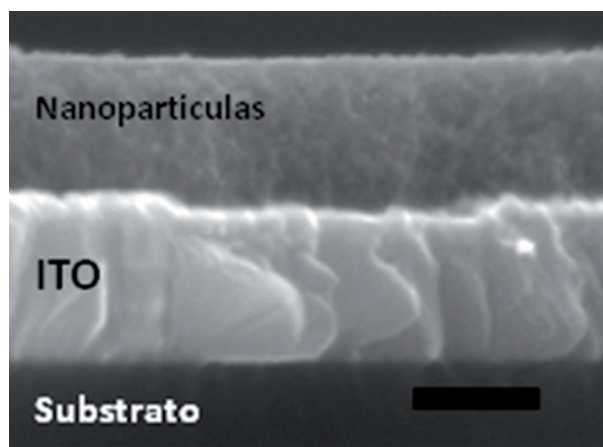


Fig. 2. Imagen de SEM de la sección transversal de una película de nanopartículas de PbSe, preparada por el método de recubrimiento por inmersión capa-por-capa depositada en una capa de ITO. La barra de magnificación en la imagen equivale a 50 nm.<sup>24</sup>

## FABRICACIÓN DE CELDAS SOLARES

La figura 3 muestra una representación esquemática de una celda solar, en la cual se usa como material absorbente de luz una película delgada de CIGS. La fabricación de la celda comienza con la deposición de Mo sobre un sustrato de vidrio,

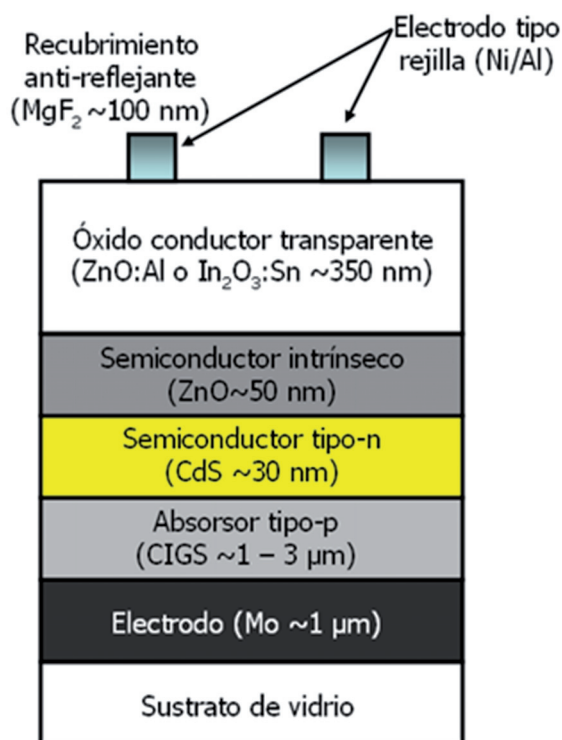


Fig. 3. Diagrama mostrando el esquema de una configuración típica de una celda solar con base en películas delgadas de CIGS.

seguida del depósito de una capa absorbente de luz de CIGS tipo-p, una capa de CdS tipo-n u otro semiconductor tipo-n ligeramente dopado, una capa de ZnO intrínseco, una capa de semiconductor transparente tipo-n, usualmente ZnO dopado o InO<sub>3</sub>, una rejilla de conductor metálico (Ni o Al) y una pantalla anti-reflejante, que puede ser de MgF<sub>2</sub>.<sup>2</sup> Como se observa, la estructura de esta celda base CIGS es sumamente complicada e implica el apilamiento de un gran número de capas que deben de reaccionar entre sí para fomentar la interconexión y favorecer el transporte de carga, lo cual es logrado a través de tratamientos térmicos en atmósfera controlada, al que es sujeto la celda durante los pasos de deposición. Se han reportado eficiencias de conversión de hasta un 19.2 % para celdas con este tipo de configuración.<sup>42</sup>

Por su parte, una técnica ampliamente reportada para la fabricación de dispositivos fotovoltaicos a partir de materiales híbridos, entre nanopartículas semiconductoras y matrices poliméricas, consiste en depositar disoluciones de estos materiales sobre sustratos de un óxido conductor transparente, como el

ITO.<sup>4</sup> El depósito de la película de material compuesto se logra por metodologías tales como el SC. Una vez que se cuenta con el electrodo transparente recubierto con una capa del material absorbente de luz, el siguiente paso es depositar un segundo electrodo, que en la mayoría de los casos es una capa de aluminio (Al) (véase figura 4). Esta capa de material conductor se deposita por métodos de evaporación, generalmente en áreas previamente delimitadas por máscaras litográficas.<sup>21</sup> No obstante, otra alternativa es la fabricación de celdas fotovoltaicas a través de métodos como el DC, utilizando sustratos de vidrio recubiertos con ITO; el recubrimiento de ITO se realiza con un patrón de interés con base en el área definida como región activa de la celda fotovoltaica. Posteriormente se deposita un segundo electrodo sobre la película de material absorbente de luz.<sup>41</sup> Como se puede ver, en ambos casos, los métodos de fabricación son relativamente sencillos y accesibles, ya que no requieren de equipo muy especializado para su fabricación.<sup>4</sup>

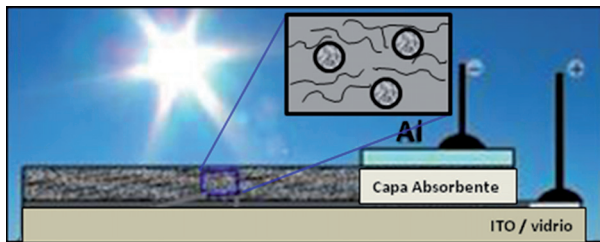


Fig. 4. Ilustración mostrando un modelo básico de los dispositivos fotovoltaicos previamente descritos. En este modelo se observa un electrodo superior, aluminio, la capa absorbente de luz en base a nanopartículas, y finalmente el sustrato de ITO/vidrio, que es el electrodo inferior.

Aunado a lo anterior, recientemente se han publicado reportes de configuraciones alternativas para la fabricación de celdas solares.<sup>43,44</sup> Estas configuraciones intentan aprovechar algunas de las características particulares de las nanoestructuras, dando lugar a un tipo de dispositivo fotovoltaico denominado celda solar exitónica (exitonic solar cell). La principal característica de este tipo de celda solar es que los portadores de carga se generan y se separan de manera simultánea en las interfaces entre sus componentes; en las celdas solares convencionales, la generación de los pares electrón-hueco ocurre a lo largo de toda la celda, y la separación de las cargas tiene lugar hasta la

unión n-p. Las celdas de Grätzel son un ejemplo de celdas solares exitónicas. No obstante, dentro de las configuraciones alternativas, propuestas en la literatura, destacan en las que se sugieren localizar la capa absorbente de luz (la que contendría las nanopartículas semiconductoras) en medio de dos capas disimilares, una de naturaleza n, en la que los electrones foto-generados sean conducidos, y la otra de naturaleza p, para el acarreo de los huecos (véase figura 5). En este sentido, Choi y colaboradores han reportado la fabricación de celdas solares exitónicas, usando como capa absorbente de luz una película a base de nanopartículas de PbSe, una capa tipo n de ZnO foto-dopado con radiación UV y una capa tipo p de poli(3,4-etilenodioxitiofeno): poli-(estirenosulfonato) (PEDOT:PSS); de acuerdo a sus resultados, este tipo de configuración muestra una eficiencia de conversión de alrededor de 3.4%, la cual es una de las más altas reportadas para este tipo de sistemas.<sup>43</sup>

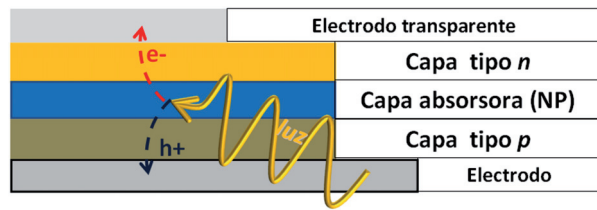


Fig. 5. Diagrama mostrando las partes y la configuración propuesta para una celda solar exitónica.<sup>43</sup>

## APUNTES FINALES

En este artículo se presentaron algunos ejemplos que muestran las posibles aplicaciones de las nanoestructuras en el desarrollo de celdas solares. Como se puede inferir de lo expuesto, la aplicación de las nanoestructuras para la mejora en la eficiencia de este tipo de dispositivos es prometedora. No es entonces de sorprendernos que este tema de investigación esté ganando un considerable número de adeptos dentro de la comunidad científica internacional, quienes han enfocado sus esfuerzos en el desarrollo de metodologías para la fabricación de celdas solares basadas en nanoestructuras. Lo anterior queda de manifiesto en la cantidad de trabajos de investigación reportados en diversas publicaciones de tiraje internacional, y que entre los años 2007 y 2009 ha tenido un incremento de 120 a 280 artículos publicados.



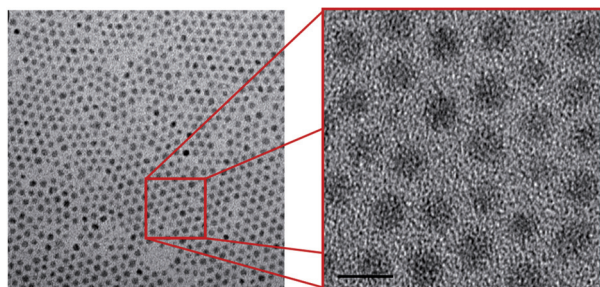


Fig. 6. Imagen de TEM mostrando nanopartículas de PbSe con morfología esférica y un diámetro aproximado de 4 nm. La barra de magnificación en la imagen equivale a 5 nm.

Los investigadores de la Universidad Autónoma de Nuevo León, y específicamente los adscritos a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, han reconocido el potencial de las nanoestructuras como materia prima para la fabricación de dispositivos fotovoltaicos. En este contexto, actualmente, se trabaja en diversas líneas enfocadas a la preparación y caracterización de nanoestructuras con potenciales aplicaciones en la fabricación de celdas solares. Entre estas líneas destaca la guiada a la preparación de celdas solares basadas en materiales híbridos nanoestructurados, entre nanopartículas de calcógenos de plomo (PbSe, PbTe, PbS) y polímeros semiconductores. Las líneas de investigación en las que se sustenta este trabajo han sido cultivadas por investigadores del cuerpo académico de Síntesis y Caracterización de Materiales, y están siendo aprovechadas en este caso, por el recientemente registrado cuerpo de Ciencia e Ingeniería en Nanoestructuras. Como un ejemplo, la figura 6 muestra imágenes obtenidas por microscopía electrónica de transmisión, de nanopartículas de PbSe, sintetizadas por métodos químicos suaves. Estas nanopartículas tienen un diámetro aproximado de 4 nm, y muestran una morfología esférica. El siguiente paso en este proyecto es el de lograr un mayor control en el tamaño y la morfología de estas nanopartículas, para su posterior incorporación en la capa de material absorbente de luz, y estudiar el efecto de estos parámetros (tamaño y morfología) en sus propiedades fotovoltaicas.

Finalmente, un punto importante a resaltar es que, aunque hasta el momento ninguno de los dispositivos fotovoltaicos basados en nanoestructuras es más eficiente que las celdas solares convencionales, la fabricación de celdas solares basadas en nanoestructuras representa una gran oportunidad para el desarrollo de nuevas tecnologías capaces de

sacar partido de recursos alternos poco explotados por el hombre, como la energía solar. Lo anterior justifica, en todos sentidos, el seguir invirtiendo y trabajando en proyectos de investigación científica básica y de innovación tecnológica, que busquen ampliar y aplicar conocimientos a la generación de energía por medios alternos.

## REFERENCIAS

1. Basic Research Needs for Solar Energy Utilization. Report of the Basic Science Workshop on Solar Energy Utilization, April 18-21 2005. Department of Energy, Office of Science. Este reporte se encuentra disponible [http://www.sc.doe.gov/bes/reports/files/SEU\\_rpt.pdf](http://www.sc.doe.gov/bes/reports/files/SEU_rpt.pdf).
2. M. Kemell, M. Ritala, M. Leaskelä, *Crit. Rev. Solid State Mater. Sci.* 30, 1 (2005).
3. Huynh, W. U.; Dittmer, J. J.; Alivisatos, A. P. *Science*, 295, 2425 (2002).
4. Talapin, D.V.; Lee, J.S.; Kovalenko, M. V. and Schevchenko, E.V. *Chem. Rev.* 110, p. 389 (2010).
5. Thompson, B.C.; Jean, M.J.F. *Angew. Chem. Int. Ed.* 47, p. 58 (2008).
6. Liu, C.-Y. ; Holman, Z.C. ; Kortshagen, U.R. ; *Nano Lett.* 9, p.449 (2009).
7. Sun, B.Q.; Marx, E.; Greenham, N.C. *Nano Lett.* 3, p. 961 (2003).
8. Panthani, M.G.; Akhavan, V.; Goodfellow, B.; Schmidtke, J.P.; Dunn, L.; Dodabalapur, A.; Barbara, P.F.; Korgel, B. A. J. *Am. Chem. Soc.* 130, p.16770 (2008).
9. Beek, W. J. E.; Wienk, M. M.; Jansen, R. A. J. *Adv. Func. Mat.* 16, p. 1112 (2006).
10. Greenham, N. C.; Peng, X.; Alivisatos, A. P. *Phys. Rev. B* 54, p.17628 (1996).
11. Fritz, K.P.; Guenes, S.; Luther, J.; Kumar, S.; Saricifitci, N. S.; Scholes, G. D. J. *Photochem. Photobiol.* 195, p. 39 (2008).
12. Kim, S. J.; Kim, W. J.; Cartwright, A. N.; Prasad, P.N. *Appl. Phys. Lett.* 92, p. 191107 (2008).
13. Gur, I.; Fromer, N.A.; Chen, C.-P.; Kanaras, A.G.; Alivisatos, A.P. *Nano Lett.* 7, p. 409 (2007).
14. Hanrath, T.; Veldman, D.; Choi, J. J.; Christova, C. G.; Wienk, M. M.; Janssen, R. A. J. *ACS Appl. Mat. Int.* 1, p. 244 (2009).

15. Ma, W.; Luther, J. M.; Zheng, H.; Wu, Y.; Alivisatos, A. P. *Nano Lett.* 9, p. 1699 (2009).
16. Cho, K.-S.; Talapin, D. V.; Gaschler, W.; Murray, C. B. *J. Am. Chem. Soc.* 127, p. 7140 (2005).
17. Houtepen, A. J.; Koole, R.; Vanmaekelbergh, D. L.; Meeldijk, J.; Hickey, S. G. *J. Am. Chem. Soc.* 128, p. 6792 (2006).
18. Lu, W.; Fang, J.; Ding, Y.; Wang, Z. L. *J. Phys. Chem. B* 109, p. 19219 (2005).
19. Trinh, M. T.; Houtepen, A. J.; Schins, J. M.; Hanrath, T.; Piris, J.; Knulst, W.; Goossens, A. P. L. M.; Siebbeles, L. D. A. *Nano Lett.* 8, p. 1713 (2008).
20. Schockley, W.; Queisser, H. J. *J. Appl. Phys.* 32, p. 510 (1961).
21. Clifford, J. P.; Johnston, K. W.; Levina, L.; Sargent, E. H. *Appl. Phys. Lett.* 91, p. 253117 (2007).
22. Johnston, K. W.; Pattantyus-Abraham, A. G.; Clifford, J. P.; Myrskog, S. H.; Hoogland, S.; Shukla, H.; Klem, E. J. D.; Levina, L.; Sargent, E. H. *Appl. Phys. Lett.* 92, p. 122111 (2008).
23. Luther, J. M.; Law, M.; Song, Q.; Perkins, C. L.; Beard, M. C.; Nozik, A. J. *ACS Nano* 2, p. 271 (2008).
24. Luther, J. M.; Law, M.; Beard, M. C.; Song, Q.; Reese, M. O.; Ellingson, M. J.; Nozik, A. J. *Nano Lett.* 8, p. 3488 (2008).
25. Ramanathan, K.; Contreras, M. A.; Perkins, C. L.; Asher, S.; Hasson, F. S.; Keane, J.; Young, D.; Romero, M.; Metzger, W.; Noufi, R.; Ward, J.; Duda, A. *Prog. Photovolt: Res. Appl.* 11, p. 225 (2003).
26. Tang, J.; Hinds, S.; Kelley, S. O.; Sargent, E. H. *Chem. Mater.* 20, p. 6906 (2008).
27. Guo, Q.; Kim, S. J.; Kar, M.; Shafarman, W. N.; Birkmire, R. W.; Stach, E. A.; Agrawal, R.; Hillhouse, H. W. *Nano Lett.* 8, p. 2982 (2008).
28. Gratzel, M. J. *Photochem. Photobiol.*, A: *Chem.* 2004, 164, 3.
29. Kamat, P. V. *J. Phys. Chem. C* 2008, 112, 18737.
30. Tisdale, W. A.; Williams, K. J.; Timp, B. A.; Norris, D. J.; Aydil, E. S.; Zhu, X.-Y. *Science* 328, p. 1543 (2010).
31. Birkmire, R. W.; Eser, E. *Annu. Rev. Mater. Sci.* 27, p. 625 (1997).
32. Contreras, M. A.; Tuttle, J.; Gabor, A.; Tennant, A.; Ramanathan, K.; Asher, S.; Franz, A.; Keane, J.; Wang, L.; Scofield, J.; Noufi, R. *Proc. 1st World Conf. Photovolt. Energy Conv. IEEE*, 68 (1994).
33. Gabor, A. M.; Tuttle, J. R.; Albin, D. S.; Contreras, M. A.; Noufi, R. *Appl. Phys. Lett.* 65, p. 198 (1994).
34. Devaney, W. E.; Chen, W. S.; Stewart, J. M.; Mickelsen, R. A. *IEEE Trans. Electron Dev.* 37, p. 428 (1990).
35. Contreras, M. A.; Egaas, B.; Ramanathan, K.; Hiltner, J.; Swartzlander, A.; Hasoon, F.; Noufi, R. *Prog. Photovolt: Res. Appl.* 7, p. 311 (1999).
36. Hagira, Y.; Nakada, T.; Kunioka, A. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 67, p. 267 (2001).
37. Chaisitsak, S.; Yamada, A.; Konagai, M. *Jpn. J. Appl. Phys.* 41, p. 507 (2002).
38. Nakada, T.; Mizutani, M. *Jpn. J. Appl. Phys.* 41, L165 (2002).
39. Yu, W. W.; Falkner, J. C.; Shih, B. S.; Colvin, V. L. *Chem. Matter.* 16, p. 3310 (2004).
40. Murphy, J. E.; Beard, M. C.; Norman, A. G.; Ahrenkiel, S. P.; Johnson, J. C.; Yu, P.; Micic, O. I.; Ellingson, R. J.; Nozik, A. J. *J. Am. Chem. Soc.* 128, p. 3241 (2006).
41. Koleilat, G. I.; Levina, L.; Shukla, H.; Myrskog, S. H.; Hinds, S.; Pattantyus-Abraham, A. G.; Sargent, E. H. *ACS Nano* 2, p. 833 (2008).
42. Haug, F.-J.; Rudmann, D.; Bilger, G.; Zogg, H.; Tiwari, A. N. *Thin Solid Films* 431-432, p. 431 (2003).
43. Choi, J. J.; Lim, Y.-F.; Santiago-Berrios, M. E. B.; Oh, M.; Hyun, B. R.; Sun, L.; Bartnik, A. C.; Goedhart, A.; Malliaras, G. G.; Abruña, H. D.; Wise, F. W.; Hanrath, T. *Nano Lett.* 9 (11), p. 3749 (2009).
44. McDaniel, H.; Zuo, J.-M.; Shim, M. J. *Am. Chem. Soc.* 132 (10), p. 3286 (2010).