

## **Celdas solares de tercera generación a base de puntos cuánticos y perovskitas**

Diego Esparza, Jeevan Torres, Jesús Sánchez, J. M. Rivas

Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica, Universidad Autónoma de Zacatecas  
Av. Ramón López Velarde 801, Zacatecas, Zac. C. P. 98000, México

desparza@uaz.edu.mx

**Resumen:** Las celdas solares de tercera generación son dispositivos fotovoltaicos fabricados con materiales de bajo costo y son atractivas debido a que reducen significativamente la razón costo/eficiencia. Este tipo de dispositivos son fabricados utilizando materiales semiconductores con estructuras a escala nanométrica, los cuales presentan propiedades ópticas y eléctricas muy interesantes, como es la sintonización de absorción de luz con el tamaño de la partícula y el transporte de carga entre cada interface de los materiales. Las más estudiadas son: las celdas orgánicas, las sensibilizadas por puntos cuánticos y las celdas solares basadas en perovskitas. Cada tipo de tecnología presenta distintas formas de fabricación y distintas eficiencias. Las celdas solares sensibilizadas con puntos cuánticos actualmente presentan eficiencia de alrededor del 12%, mientras que las celdas de perovskita han llegado a tener hasta 24% de eficiencia.

**Palabras clave:** Celdas solares, puntos cuánticos, perovskitas.

**Abstract:** Third generation solar cells are photovoltaic devices fabricated with low cost materials and are attractive because the cost to efficiency ratio is significantly reduced. These devices are fabricated using semiconductor materials with a structure in the nanoscale. At these dimensions, these materials present interesting optical and electrical properties. Light absorption can be tuned by controlling particle size and there is also charge transport at the interfaces of the materials. Among the most studied solar cells in this generation are: the organic solar cells, the quantum dot sensitized solar cells and the perovskite solar cell. Different technologies require different manufacturing methods and distinct efficiencies. The quantum dot sensitized solar cells have a record of 12%, while the perovskite solar cells have a record of 24% in photoconversion efficiency.

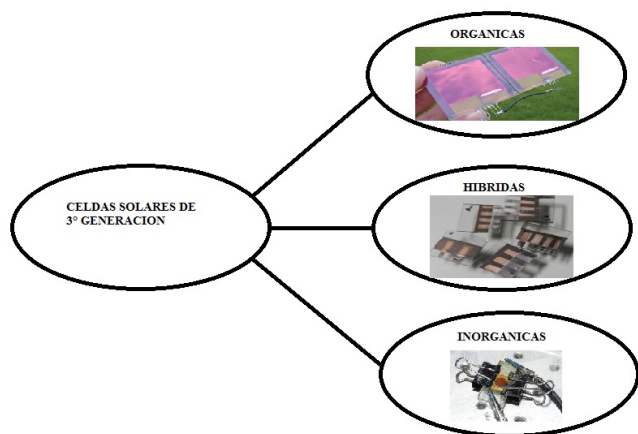
**Keywords:** Solar cell, quantum dots, perovskite.

### **1. Introducción**

Actualmente, existe un problema a nivel mundial debido al calentamiento global. Este problema es generado principalmente por la contaminación ambiental producida por el CO<sub>2</sub>. La solución a este problema puede ser, en parte, el uso de energías alternas o energías renovables. La energía solar es considerada como una de las tecnologías que mayor alcance tiene para aliviar el problema del calentamiento global y al mismo tiempo obtener energía, debido a la gran cantidad de radiación solar que recibe la Tierra [1]. Por medio de dispositivos fotovoltaicos es posible aprovechar la radiación electromagnética que recibimos y convertirla en energía eléctrica, de esta forma por medio de celdas solares se convierte energía solar a energía eléctrica. Para esto es necesario la fabricación de celdas solares, comúnmente conformadas por materiales semiconductores. Existen diferentes tecnologías de celdas solares catalogadas como celdas de primera, segunda y tercera generación. Las celdas de primera generación están hechas a base de silicio, ya sea monocristalino o policristalino. Este tipo de dispositivos actualmente cuentan con una alta eficiencia de conversión de radiación a energía eléctrica de alrededor del 25%, sin embargo, son muy costosos en sus procesos de fabricación [2]. Esto motivó la búsqueda de alternativas dando origen a lo que se

ha llamado celdas solares de segunda generación. Estos dispositivos son fabricados con películas delgadas, las cuales son menos costosas que las de primera generación. Una de las configuraciones más comunes en las de segunda generación son las celdas de sulfuro de cadmio (CdS) y telururo de cadmio (CdTe), las cuales tienen una eficiencia de alrededor del 17%. Esta tecnología redujo costos, pero aún se fabrican con equipos especializados, lo cual las vuelve relativamente costosas [3]. Posteriormente surgen las celdas solares de tercera generación, estos dispositivos son fabricados usando materiales con estructuras en escala nanométrica, son dispositivos de bajo costo y fáciles de fabricar. Sin embargo, presentan eficiencias relativamente bajas e inestables. La figura 1 muestra las tecnologías más importantes de celdas solares de tercera generación [4].

Las celdas solares orgánicas son dispositivos fabricados con materiales orgánicos, actualmente presentan eficiencias de fotoconversión del 12%, sin embargo, uno de sus principales problemas es la degradación que presentan al estar expuestas al sol [5]. Las celdas solares de tercera generación inorgánicas, son fabricadas con materiales semiconductores. En esta categoría



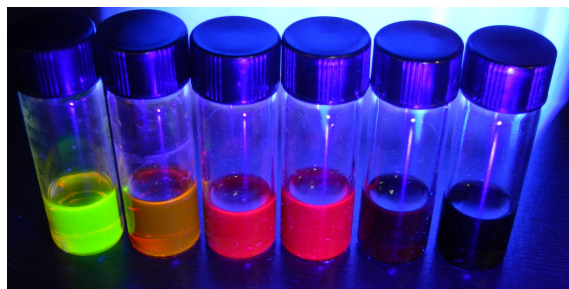
**Figura 1.** Clasificación de las celdas solares de tercera generación.

Existen una gran variedad de compuestos utilizados siendo uno de los más exitosos los puntos cuánticos. En este tipo de material se presenta el fenómeno de confinamiento cuántico en el cual, dependiendo del tamaño de la partícula de punto cuántico, se determina la absorción y emisión de luz. Esta peculiaridad hace a estos materiales muy atractivos para ser utilizados en celdas solares prometiendo una eficiencia de fotoconversión teórica de aproximadamente un 44%. Actualmente esta tecnología presenta un 12% de eficiencia [6]. Las celdas solares híbridas, son fabricadas con una combinación de materiales orgánicos e inorgánicos. En los últimos años, esta tecnología ha crecido mucho debido a los grandes avances obtenidos en celdas de perovskita. Esta tecnología de celda solar ha pasado de un 3% en 2009 a un 24% en 2017, en pocos años esta tecnología se posicionó con altas eficiencias, sin embargo, es un material inestable y presenta baja durabilidad [7-9].

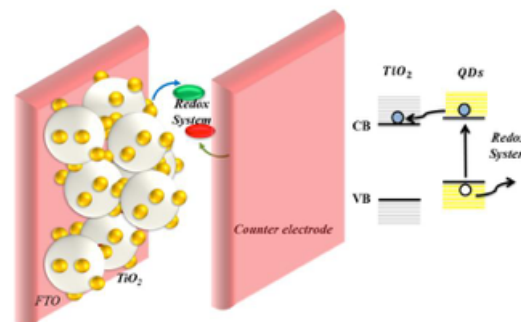
En este trabajo, se muestra las diferentes tecnologías en celdas solares de tercera generación, principalmente aportaciones en celdas solares sensibilizadas por puntos cuánticos y en celdas solares de perovskita y sus principales propiedades optoelectrónicas.

## 2. Celdas solares sensibilizadas con puntos cuánticos

Los puntos cuánticos son partículas semiconductoras que presentan confinamiento cuántico. Este fenómeno se presenta cuando el tamaño de la partícula es del orden del radio de Bohr del material. A partir de esto se puede sintonizar la absorción y emisión con respecto al tamaño de partícula del material. Actualmente se han estudiado varios puntos cuánticos con aplicaciones en celdas solares, sin embargo, los puntos cuánticos tienen un sinnúmero de aplicaciones, las más comunes son en dispositivos optoelectrónicos (celdas solares y diodos emisores de luz), así como en aplicaciones biomédicas y fotodetectores [10-18]. En la figura 2 se muestran puntos cuánticos sintetizados en el



**Figura 2.** Puntos cuánticos de selenuro de cadmio (CdSe) expuestos a luz ultravioleta.



**Figura 3.** Celda solar sensibilizada por puntos cuánticos.

laboratorio de nanofotónica del Centro de Investigaciones en Óptica en 2015. Cada recipiente contiene puntos cuánticos de selenuro de cadmio (CdSe) y se encuentran expuestos a luz ultravioleta. En la imagen se puede apreciar el cambio de emisión del punto cuántico, considerando que es el mismo material y sólo cambia el tiempo de reacción en la síntesis. El tiempo de reacción genera, a su vez, el crecimiento de las nanopartículas, relacionando así el tamaño de la partícula nanométrica con sus propiedades optoelectrónicas.

Como se mencionó anteriormente, los puntos cuánticos han sido utilizados en celdas solares sensibilizadas. Una celda solar es un dispositivo capaz de convertir energía solar en energía eléctrica, el funcionamiento de una celda solar sensibilizada por puntos cuánticos se muestra en la figura 3.

Las celdas solares sensibilizadas por puntos cuánticos son similares a las celdas de Grätzel [19], la diferencia es que en vez de utilizar un sensibilizante como medio activo, se utilizan los puntos cuánticos. La celda consta de un material transportador de electrones, en este caso, dióxido de titanio (TiO<sub>2</sub>), el cual funciona como soporte de los puntos cuánticos y es encargado de llevar los electrones hasta la película conductora. La película conductora, en este caso, es óxido de estaño dopado con flúor (FTO, por sus siglas en inglés). Por otra parte, la celda también tiene de un transportador de huecos, en este caso, el electrolito redox a base de polisulfuros, y se cierra el circuito utilizando un contra electrodo de sulfuro de cobre (Cu<sub>2</sub>S). El funcionamiento del

dispositivo es el siguiente: la energía solar llega por la parte del FTO, luego pasa por el TiO<sub>2</sub> y los puntos cuánticos absorben energía, creando el par electrón-hueco, el electrón en la banda de conducción y el hueco en la banda de valencia, entonces el electrón se inyecta al TiO<sub>2</sub> y el hueco al electrolito, generando de esta forma una corriente eléctrica.

Actualmente existen diferentes puntos cuánticos que pueden utilizarse como sensibilizador, los más comunes son a base de calcogenuros como: sulfuro de cadmio (CdS), selenuro de cadmio (CdSe), telurio de cadmio (CdTe), sulfuro de bismuto (Bi<sub>2</sub>S<sub>3</sub>), además de materiales ternarios como es el cadmio-selenio-telurio (CdSeTe) entre otros más. Los procesos físicos más importantes en una celda solar son: 1) La absorción de luz, proceso de absorción del material activo, la absorción depende directamente de la brecha energética del material. 2) La formación del par electrón-hueco, este fenómeno ocurre después de la absorción, donde el material excita un electrón de la banda de valencia a la banda de conducción. 3) Los procesos de recombinación y de transporte de carga, se presentan generalmente en las interfaces entre los materiales de un dispositivo fotovoltaico. La recombinación del par electrón-hueco es desfavorable ya que limita el número de portadores de carga, y por lo tanto, la densidad de corriente.

En la tabla 1 se muestran los principales parámetros de una celda solar, la densidad de corriente de cortocircuito, el voltaje de circuito abierto y la eficiencia. En esta tabla se muestran las principales configuraciones analizadas, cambiando tanto el material activo como la modificación de interfaces de cada dispositivo para mejorar el transporte de carga o disminuir los procesos de recombinación.

Como se puede observar en la tabla 1, conforme aumenta el número de puntos cuánticos aumenta la densidad de corriente de corto circuito, esto se debe a que se incrementa la absorción de luz. Para el caso del sulfuro de cadmio, ya que este material sólo absorbe luz en el rango visible (550 nm), la máxima densidad de corriente de cortocircuito es de 8.7 mA/cm<sup>2</sup>. Sin embargo, al buscar mejorar los procesos de transporte de carga con un polímero transportador de electrones (P3HT) se puede mejorar la densidad de corriente de cortocircuito hasta 10 mA/cm<sup>2</sup>, estos procesos mejoran significativamente el voltaje de circuito abierto (Voc) hasta 573 mV llegando a eficiencias de hasta 3.07%. Si bien la mejora en la corriente se puede dar por medio de incrementar el espectro de absorción como es el caso tanto del sulfuro de plomo (PbS) como del sulfuro de bismuto (Bi<sub>2</sub>S<sub>3</sub>), los procesos de recombinación del par electrón-hueco, generan que tanto el voltaje como la eficiencia se vean reducida hasta un 2.52%. Otro mecanismo para mejorar esos procesos es por medio del uso de nanopartículas metálicas. En este caso, la configuración TiO<sub>2</sub>/Au/CdS logra mejorar la eficiencia hasta un 2.93%. Existen otros materiales que pueden ser utilizados para aumentar la absorción, como son el CdSe y el CdSeTe, con estos materiales se pueden llegar a obtener eficiencias de hasta un 4.7% con la configuración CdS/CdSe y un 7.4% para la configuración CdS/CdSe/CdSeTe. La mejora de estos tipos de dispositivos aún continua, algunas perspectivas a futuro siguen siendo el aumento

de absorción de luz, reducir los procesos de recombinación en las interfaces del dispositivo y el aumento del transporte de carga. A nivel mundial las celdas solares sensibilizadas con puntos cuánticos han logrado obtener hasta 12% de eficiencia [15].

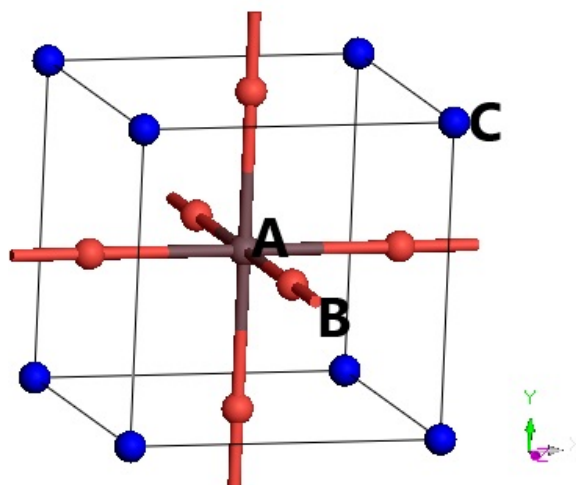
### 3. Celdas solares de perovskita

Las celdas solares de perovskita son dispositivos fotovoltaicos que en los últimos años han aumentado significativamente su desarrollo. La perovskita es una estructura cristalina característica que presentan algunos materiales. La estructura perovskita se basa principalmente de la fórmula ABX<sub>3</sub>, donde A es un material orgánico, comúnmente en aplicaciones en celdas solares se usa el metilamonio de yodo (CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>I), B es un material inorgánico, comúnmente plomo (Pb) y X es un halógeno comúnmente yodo (I). Al final, la estructura utilizada en celdas solares de este tipo es CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub>. En la figura 4 se muestra la celda unitaria característica de la estructura cristalina.

La primera celda solar fabricada a base de perovskita apareció en 2009, su eficiencia de conversión de energía apenas alcanzaba un 3.81%, su aparición fue sustituyendo el colorante utilizado en las celdas solares tipo Grätzel [7]. Tiempo después, la eficiencia

**Tabla 1.** Principales parámetros de caracterización de una celda solar.

Configuración	J <sub>sc</sub> (mA cm <sup>-2</sup> )	V <sub>oc</sub> (V)	η(%)	Ref
TiO <sub>2</sub> /CdS	8.7	0.542	2.5	[20]
TiO <sub>2</sub> /CdS/ZrO <sub>2</sub>	7.1	0.504	2.35	[21]
TiO <sub>2</sub> /CdS/P3HT	10	0.573	3.07	[22]
TiO <sub>2</sub> /CdS/Bi <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	9.3	0.502	2.52	[20]
TiO <sub>2</sub> /PbS/CdS	13.3	0.432	2.6	[23]
TiO <sub>2</sub> /Au/CdS	9.48	0.612	2.96	[24]
TiO <sub>2</sub> /CdS/CdSe	13.1	0.575	4.7	[25]
TiO <sub>2</sub> /CdS/CdSeTe	20.3	0.608	6.4	[26]
TiO <sub>2</sub> /CdS/CdSe/CdSeTe	20.5	0.643	7.4	[27]



**Figura 4.** Celda unitaria característica de la estructura cristalina perovskita.

aumentó hasta un 6.5% [8]. Fue en 2012, tres años más tarde, cuando se obtuvo una eficiencia de 11% [9], y en ese mismo año se logró obtener eficiencias de 15%. Más aun, su rápido crecimiento en términos de eficiencia se logró cuando se fabricaron celdas de perovskita por medio de películas obtenidas por evaporación y por métodos químicos convencionales. Actualmente, las celdas de perovskita presentan eficiencias cercanas a las de celdas de silicio policristalino (alrededor de 25% en dispositivos de laboratorio) pero las celdas de perovskita son fabricadas con procesos más baratos y sencillos. Sin embargo, el problema principal de las celdas de perovskita es que presentan problemas de estabilidad.

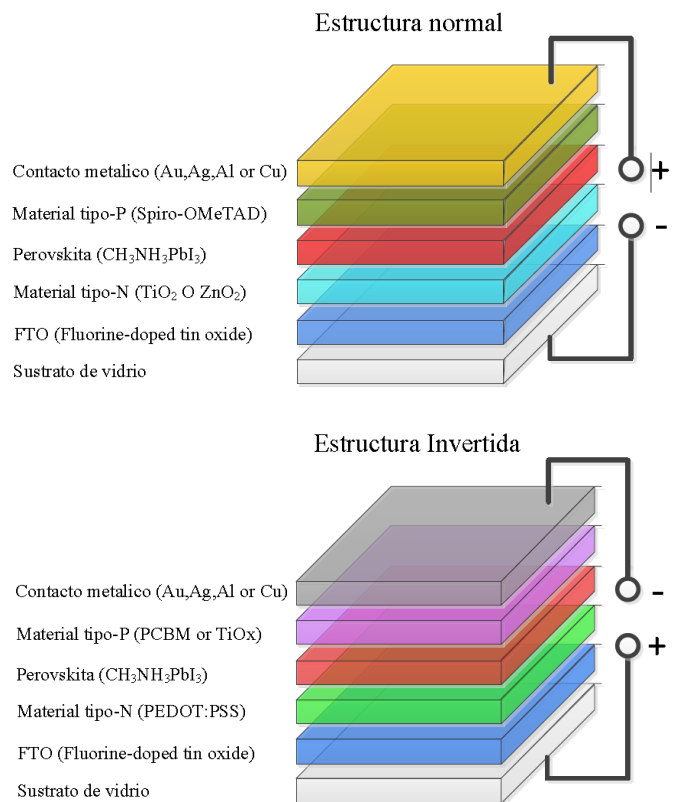
Los dispositivos basados en perovskitas presentan dos configuraciones distintas. En la figura 5 se muestran estas dos configuraciones. En la configuración normal, la perovskita ( $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ ) trabaja como material activo, luego los electrones se inyectan a un material transportador de electrones como el dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) u óxido de zinc ( $\text{ZnO}$ ) para llegar finalmente al contacto eléctrico (FTO); los huecos, por su parte, se inyectan a un material transportador de huecos (Spiro-OMeTAD) para después llegar al contacto metálico (Au, Ag, Cu). En este tipo de dispositivos los principales fenómenos físicos se presentan en las interfaces entre cada material.

La configuración invertida, trabaja de una manera similar, la perovskita es el material activo, luego los huecos se inyectan a un material conductor de huecos (PEDOT:PSS) y finalmente llegan al contacto eléctrico (FTO) y los electrones pasan al transportador de electrones (P3HT) y después al contacto metálico. La diferencia primordial entre la configuración invertida y norma es hacia donde se inyectan los electrones y los materiales utilizados en cada configuración.

En este tipo de celdas solares el material más estudiado es la perovskita. Para obtener un buen dispositivo con una alta eficiencia se requieren considerar varios aspectos: la estructura de perovskita, la fase adecuada, el crecimiento del cristal, de tal forma que entre más grande sea el cristal, menor cantidad de defectos superficiales presente [28], la uniformidad del crecimiento y su interacción con los demás materiales.

En la tabla 2 se muestran los diferentes materiales transportadores de huecos (TDH) y de electrones (TDE) utilizados en celdas solares de perovskita tanto en la forma normal (N) como la invertida (I) y sus eficiencias máximas.

Las celdas solares de perovskita tienen muchas perspectivas, el primer reto para este tipo de dispositivos es lograr que sean estables y duraderas. Actualmente se realiza investigación en ese sentido, además de controlar el crecimiento del cristal para aumentar el área de trabajo del dispositivo. Otra línea de investigación en esta índole es utilizar materiales que sustituyan al plomo, debido a su alta toxicidad [45].



**Figura 5.** Configuración normal e invertida en celdas de perovskita.

#### 4. Conclusiones

Las celdas solares de tercera generación son fabricadas con materiales de bajo costo y son atractivas debido a que reducen significativamente la razón costo/eficiencia. Las más estudiadas son: las celdas orgánicas, las sensibilizadas por puntos cuánticos y las celdas solares basadas en perovskitas. Las celdas solares sensibilizadas por puntos cuánticos presentan eficiencias de alrededor del 12%, actualmente se realizan estudios para aumentar la eficiencia y llegar a lograr la eficiencia teórica del 44%. Las celdas de perovskita tienen un record de eficiencia del 24%, esta tecnología enfrenta retos de estabilidad y durabilidad del dispositivo, así como estudio de materiales no tóxicos como posibles candidatos de remplazo del plomo.

#### Agradecimientos

Este trabajo fue apoyado por una beca en el programa CONACyT-SENER (J. S.) y por el programa para el desarrollo profesional docente del nivel superior (Prodep) número de proyecto F- PROMEP-38/Rev-04 SEP-23-005 (D. E.).



**Tabla 2.** Materiales utilizados como transportadores de huecos (TH) y de electrones (TE) en celdas solares de perovskita en configuración normal(N) o invertida(I) y principales parámetros de caracterización.

Configuración/TH/TE	$J_{sc}$ (mA $cm^{-2}$ )	$V_{oc}$ (V)	$\eta$ (%)	Ref
N/ Spiro-ometad/ TiO <sub>2</sub>	22.9	1.02	17.3	[29]
N/ Spiro-ometad:Cu/ TiO <sub>2</sub>	20.3	0.99	13.3	[30]
N/ Spiro-ometad/ TiO <sub>2</sub> :QDs	22.5	1.01	15.3	[31]
I/ PEDOT:PSS/ PC <sub>61</sub> BM:BCP	10.3	0.60	3.9	[32]
I/ PEDOT:PSS/ PC <sub>61</sub> BM	18.5	0.87	11.5	[33]
I/ PEDOT:PSS/ PC <sub>61</sub> BM:TiO <sub>x</sub>	15.8	0.94	9.8	[34]
I/ PEDOT:PSS/ PC <sub>61</sub> BM:LiF	20.7	0.87	14.1	[35]
I/ PEDOT:PSS/ PC <sub>61</sub> BM:PFN	20.3	1.05	17.1	[36]
I/ PEDOT:PSS/ PCBM	22.4	0.94	17.4	[37]
I/ PEDOT:PSS/ PC <sub>61</sub> BM	20.9	1.1	18.2	[38]
I/ PEDOT:PSS:Poly TPD/ PC <sub>61</sub> BM	16.1	1.05	12.0	[39]
I/ PEDOT:PSS: PCDTBT/ PC <sub>61</sub> BM:LiF	21.9	1.05	16.5	[40]
I/ PTAA/ PC <sub>61</sub> BM: C60:BCP	22.0	1.07	18.1	[41]
I/ PEDOT:PSS/ C60	21.0	0.92	15.4	[42]
I/ PC <sub>61</sub> BM/ ZnO	20.5	0.97	15.9	[43]
I/ PC <sub>61</sub> BM/ ZnO	22.0	1.02	16.8	[44]

## Referencias

- [1] Liu, B.Y. and R.C. Jordan, The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. *Sol. Energy*, 1960. 4, 1-19.
- [2] Lewis, N.S., Toward cost-effective solar energy use. *Science*, 2007. 315, 798-801.
- [3] Palm, J., V. Probst, and F.H. Karg, Second generation CIS solar modules. *Sol. Energy*, 2004. 77(6): p. 757-765.
- [4] Green, M.A., Third generation photovoltaics: solar cells for 2020 and beyond. *Physica E*, 2002. 14, 65-70.
- [5] Li, S., et al., Energy-Level Modulation of Small-Molecule Electron Acceptors to Achieve over 12% Efficiency in Polymer Solar Cells. *Adv. Mater.*, 2016. 28, 9423-9429.
- [6] Wang, W., Feng, W., Du, J., Xue, W., Zhang, L., Zhao, L., Zhong, X. Cosensitized quantum dot solar cells with conversion efficiency over 12%. *Adv. Mater.*, 2018 30, 1705746.
- [7] Kojima, A., et al., Organometal halide perovskites as visible-light sensitizers for photovoltaic cells. *J. Am. Chem. Soc.*, 2009. 131, 6050-6051.
- [8] Im, J.-H., et al., 6.5% efficient perovskite quantum-dot-sensitized solar cell. *Nanoscale*, 2011. 3, 4088-4093.
- [9] Lee, M. M., Teuscher, J., Miyasaka, T., Murakami, T. N., & Snaith, H. J. Efficient hybrid solar cells based on meso-superstructured organometal halide perovskites. *Science*, 2012, 338, 643-647.
- [10] Jiang, Y., et al., Photoresponse Properties of CdSe Single-Nanoribbon Photodetectors. *Adv. Funct. Mater.*, 2007. 17, 1795-1800.
- [11] Konstantatos, G., et al., Sensitive solution-processed Bi<sub>2</sub>S<sub>3</sub> nanocrystalline photodetectors. *Nano Lett.*, 2008. 8, 4002-4006.
- [12] Pan, Z., et al., Near Infrared Absorption of CdSexTe1-x Alloyed Quantum Dot Sensitized Solar Cells with More than 6% Efficiency and High Stability. *ACS Nano*, 2013. 7, 5215-5222.
- [13] Lee, Y.L. and Y.S. Lo, Highly Efficient Quantum-Dot-Sensitized Solar Cell Based on Co-Sensitization of CdS/CdSe. *Adv. Funct. Mater.*, 2009. 19, 604-609.
- [14] Jiao, S., et al., Band Engineering in Core/Shell ZnTe/CdSe for Photovoltage and Efficiency Enhancement in Exciplex Quantum Dot Sensitized Solar Cells. *ACS Nano*, 2015. 9, 908-915.
- [15] Yu, J., Wang, W., Pan, Z., Du, J., Ren, Z., Xue, W., & Zhong, X. Quantum dot sensitized solar cells with efficiency over 12% based on tetraethyl orthosilicate additive in polysulfide electrolyte. *J. Mater. Chem A*, 2017. 5, 14124-14133.
- [16] Song, J., et al., Quantum Dot Light-Emitting Diodes Based on Inorganic Perovskite Cesium Lead Halides (CsPbX<sub>3</sub>). *Adv. Mater.*, 2015, 27, 7162-7167.
- [17] Sun, Q., et al., Bright, multicoloured light-emitting diodes based on quantum dots. *Nat. Photonics*, 2007, 1, 717-722.
- [18] Swarnkar, A., et al., Quantum dot-induced phase stabilization of  $\alpha$ -CsPbI<sub>3</sub> perovskite for high-efficiency photovoltaics. *Science*, 2016. 354, 92-95.
- [19] Yella, A., et al., Porphyrin-sensitized solar cells with cobalt (II/III)-based redox electrolyte exceed 12 percent efficiency. *Science*, 2011. 334, 629-634.
- [20] Esparza, D., et al., Photovoltaic Properties of Bi<sub>2</sub>S<sub>3</sub> and CdS Quantum Dot Sensitized TiO<sub>2</sub> Solar Cells. *Electrochim Acta*, 2015, 180, 486-492.
- [21] Ramachari, D., et al., Synthesis of co-doped Yb<sup>3+</sup>-Er<sup>3+</sup>: ZrO<sub>2</sub> upconversion nanoparticles and their applications in enhanced photovoltaic properties of quantum dot sensitized solar cells. *J Alloy Comp*, 2017. 698, 433-441.
- [22] Cerdán-Pasarán, A., et al., Photovoltaic study of quantum dot-sensitized TiO<sub>2</sub>/CdS/ZnS solar cell with P3HT or P3OT added. *J. Appl. Electrochem*, 2016. 46, 975-985.
- [23] Esparza, D., et al., Current improvement in hybrid quantum dot sensitized solar cells by increased light-scattering with a polymer layer. *RSC Adv*, 2015. 5, 36140-36148.
- [24] Zarazúa, I., et al., Effect of the electrophoretic deposition of Au NPs in the performance CdS QDs sensitized solar Cells. *Electrochim. Acta*, 2016. 188, 710-717.
- [25] Esparza, D., et al., Effect of Different Sensitization Technique on the Photoconversion Efficiency of CdS Quantum Dot and CdSe Quantum Rod Sensitized TiO<sub>2</sub> Solar Cells. *J. Phys. Chem. C*, 2015. 119, 13394-13403.
- [26] Esparza, D., et al., Studying the role of CdS on the TiO<sub>2</sub> surface passivation to improve CdSeTe quantum dots sensitized solar cell. *J Alloy Comp*, 2017, 728, 1058-1064.
- [27] Esparza, D., et al., Enhancement of Efficiency in Quantum Dot Sensitized Solar Cells Based on CdS/CdSe/CdSeTe Heterostructure

- by Improving the Light Absorption in the VIS-NIR Region. *Electrochim. Acta*, 2017, 247, 899-909.
- [28] Zarazúa, I., et al., Operating Mechanisms of Mesoscopic Perovskite Solar Cells through Impedance Spectroscopy and J–V Modeling. *J. Phys. Chem. Lett.*, 2017. 8, 6073-6079.
- [29] Sidhik, S., et al., Improving the Optoelectronic Properties of Mesoporous TiO<sub>2</sub> by Cobalt Doping for High-Performance Hysteresis-free Perovskite Solar Cells. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2018. 10, 3571-3580.
- [30] Sidhik, S., et al., Study of ethoxyethane deposition time and Co (III) complex doping on the performance of mesoscopic perovskite based solar cells. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 2017. 163, 224-230.
- [31] Sidhik, S., Esparza, D., Martínez-Benítez, A., Lopez-Luke, T., Carriles, R., Mora-Sero, I., & De la Rosa, E. Enhanced photovoltaic performance of mesoscopic perovskite solar cells by controlling the interaction between CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub> films and CsPbX<sub>3</sub> perovskite nanoparticles. *J. Phys. Chem. C*, 2017, 121, 4239-4245.
- [32] Jeng, J.Y., et al., CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub> perovskite/fullerene planar-heterojunction hybrid solar cells. *Adv. Mater.*, 2013. 25,3727-3732.
- [33] You, J., Hong, Z., Yang, Y., Chen, Q., Cai, M., Song, T. B., ... & Yang, Y. Low-temperature solution-processed perovskite solar cells with high efficiency and flexibility. *ACS nano*, 2014, 8, 1674-1680.
- [34] Docampo, P., et al., Efficient organometal trihalide perovskite planar-heterojunction solar cells on flexible polymer substrates. *Nature comm*, 2013, 4, 2761.
- [35] Seo, J., et al., Benefits of very thin PCBM and LiF layers for solution-processed p–i–n perovskite solar cells. *Energy Environ. Sci.*, 2014, 7, 2642-2646.
- [36] You, J., et al., Moisture assisted perovskite film growth for high performance solar cells. *Appl. Phys. Lett.*, 2014. 105, 183902.
- [37] Nie, W., et al., High-efficiency solution-processed perovskite solar cells with millimeter-scale grains. *Science*, 2015. 347, 522-525.
- [38] Heo, J.H., et al., Hysteresis-less inverted CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub> planar perovskite hybrid solar cells with 18.1% power conversion efficiency. *Energy Environ. Sci.*, 2015. 8, 1602-1608.
- [39] Malinkiewicz, O., et al., Perovskite solar cells employing organic charge-transport layers. *Nat. Photonics*, 2014. 8, 128.
- [40] Lin, Q., et al., Electro-optics of perovskite solar cells. *Nat. Photonics*, 2015. 9, 106.
- [41] Bi, C., et al., Non-wetting surface-driven high-aspect-ratio crystalline grain growth for efficient hybrid perovskite solar cells. *Nat. Commun*, 2015. 6, 7747.
- [42] Liang, P. W., Chueh, C. C., Williams, S. T., & Jen, A. K. Y. Roles of fullerene-based interlayers in enhancing the performance of organometal perovskite thin-film solar cells. *Adv. Energy Mater.*, 2015, 5, 1402321.
- [43] Bai, S., et al., High-performance planar heterojunction perovskite solar cells: Preserving long charge carrier diffusion lengths and interfacial engineering. *Nano Res.*, 2014. 7, 1749-1758.
- [44] Zhang, L.Q., et al., Highly efficient and stable planar heterojunction perovskite solar cells via a low temperature solution process. *J. Mater. Chem A*, 2015, 3, 12133-12138.
- [45] Kapil, G., Ripolles, T. S., Hamada, K., Ogomi, Y., Bessho, T., Kinoshita, T., Minemoto, T. Highly efficient 17.6% tin–lead mixed perovskite solar cells realized through spike structure. *Nano lett.*, 2018, 18, 3600-3607.