

Obtención de propiedades optoelectrónicas de celdas solares de Perovskitas por medio de simulación

ALMEIDA-DOMÍNGUEZ, Israel*†, ESPARSA, Diego y RIVAS-MARTÍNEZ, Jesús Manuel

Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica (UAIE, Universidad Autónoma de Zacatecas. Av. Ramón López Velarde #801, Zacatecas, México

Recibido 5 de Enero, 2017; Aceptado 7 de Marzo, 2017

Resumen

Las celdas solares de perovskitas se basan en la fórmula MAPbX_3 donde MA corresponde al metilamonio (CH_3NH_3) y X puede ser I, Cl o Br. Este compuesto es un material semiconductor que en los últimos años ha generado gran interés como material fotovoltaico debido a su alta eficiencia de fotoconversión energética (~20%) además de su bajo costo de fabricación. En este trabajo se realizó la simulación y modelado por computadora de perovskitas para obtener sus propiedades optoelectrónicas. Se simularon diferentes estructuras de perovskita (MAPbX_3 y CsPbX_3) y se obtuvieron propiedades ópticas como la brecha energética. Se compararon los resultados obtenidos con resultados experimentales. Para esta investigación, se utilizó el simulador Materials Studio para el diseño de las estructuras cristalinas de perovskita (MAPbX_3 y CsPbX_3). Adicionalmente, el módulo CASTEP, permitió estimar la brecha energética de las diferentes estructuras de perovskita mediante un algoritmo basado en la teoría funcional de la densidad (DFT). Con estos resultados se pretende optimizar los procesos de fabricación de celdas de perovskita de diferentes estructuras.

Perovskita, propiedades ópticas, brecha energética, Materials Studio

Abstract

Perovskite solar cells are based on the formula MAPbX_3 where MA corresponds to methyl-ammonium (CH_3NH_3) and X can be either I, Cl or Br. This compound is a semiconductor material that has recently received much interest as a photovoltaic material due to its high photo-conversion efficiency (~20%) in addition to its low fabrication cost. In this work, simulations and computer modeling were developed to obtain optoelectronic properties of perovskites. Several structures of perovskites were simulated (MAPbX_3 and CsPbX_3) to obtain optical properties such as the energy band gap. These results were compared to experimental values. For this research, the Materials Studio simulation package was used to design the crystal structures of perovskites (MAPbX_3 and CsPbX_3). Additionally, the CASTEP module allowed the estimation of the band gap of the different structures of perovskite using an algorithm based on density functional theory (DFT). These results would aid the optimization of the fabrication processes of perovskite solar cells with different structures.

Perovskite, optical properties, band gap, Materials Studio

Citación: ALMEIDA-DOMÍNGUEZ, Israel, ESPARSA, Diego y RIVAS-MARTÍNEZ, Jesús Manuel, Obtención de propiedades optoelectrónicas de celdas solares de Perovskitas por medio de simulación. Revista de Ingeniería Innovativa 2017. 1-1: 28-36

*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: 35162018@uaz.edu.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor

Introducción

En la actualidad, uno de los principales problemas es el calentamiento global, producido por el aumento de gases contaminantes que provocan el efecto invernadero. Debido a esto, la política global es impulsar una transición energética hacia fuentes de energía sustentables, renovables y menos dependiente de combustibles fósiles (Vargas, 2015). Debido a lo anterior, la energía solar es una atractiva opción para generar energía eléctrica por medio de radiación solar y la interacción con la materia (tecnología fotovoltaica). Esta tecnología permite aprovechar la radiación del sol mediante el uso de celdas fotovoltaicas convirtiendo la energía del sol en energía eléctrica. Por lo tanto la energía solar es una alternativa viable para solucionar problemas energéticos en nuestro país (Duran, 2016), como el incremento de los costos en los combustibles fósiles (Venegas-Trujillo, 2016); también el satisfacer la demanda energética según el aumento poblacional junto con su bienestar económico (Rangel, 2017).

El estudio de celdas solares está clasificado según los materiales de las cuales están fabricadas:

- Celdas orgánicas (utilizan materiales orgánicos para su fabricación) (Brabec, 2001; Ma, 2005; Saunders, 2008; Scharber, 2006). Las celdas solares orgánicas tienen también su importancia debido a su flexibilidad, delgadez y fácil fabricación (Fung, 2013). Las celdas solares orgánicas pueden ser flexibles o ultraligeras para aplicaciones en recubrimientos de casas o edificios en donde se pueden amoldar a la estructura deseada.
 - Inorgánicas (fabricadas con materiales inorgánicos) (Kamat, 2008; Lopez, 2008; Robel, 2006). El material inorgánico más utilizado para fabricar celdas solares es el silicio, que por muchos años este tipo de celdas han dominado el mercado a nivel mundial (Noh, 2015), debido a que absorben gran cantidad de luz del espectro solar (400 nm hasta 1100 nm) (Sark, 2012) y su facilidad para dopar el material y facilitar el flujo de electrones (Nelson, 2003).
 - Híbridas (fabricadas por una parte orgánica y una inorgánica) (Goh, 2007; Van Hal, 2003). En este tipo de celdas se busca combinar las propiedades orgánicas con las inorgánicas y aumentar la absorción de luz y el transporte de electrones en el material activo. Actualmente, una celda solar híbrida de la forma $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ tiene el record mundial de eficiencia con un 21%, son llamadas celdas de perovskita debido a la estructura cristalina de perovskita que presentan (Giordano, 2016; Jacobsson, 2016; NREL, 2017; Saliba, 2016).
- Las celdas de perovskita se basan principalmente de la forma ABX_3 donde A es un material orgánico, comúnmente yoduro de metilamonio ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$), B es un material inorgánico comúnmente plomo (Pb) y X es un halogenuro comúnmente yodo (I). La investigación sobre estos materiales utilizados en aplicaciones fotovoltaicas es muy interesante debido a la gran cantidad de potenciales aplicaciones optoelectrónicas que presenta, por ejemplo: diodos emisores de luz, aplicaciones biomédicas y por supuesto en celdas solares (Sanchez, 2016, Huang, 2015; Song, 2015; Wei, 2016, Sidhik, 2017), etc.

Para ello, se estudiaron experimentalmente las propiedades optoelectrónicas de diferentes materiales, cambiando el material orgánico $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$ por cesio (Cs), así como el halogenuro yodo (I), por cloro (Cl) y bromo (Br).

En el presente trabajo se obtienen las propiedades optoelectrónicas de la estructura de perovskita de las configuración $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbX}_3$, donde $X = \text{Cl}, \text{I}, \text{Br}$ y CsPbX_3 por medio de la teoría funcional de la densidad (DFT por sus siglas en inglés). En esta técnica, por medio de una celda unitaria se simula por computadora, obteniendo como resultado la brecha energética para cada uno de los materiales estudiados.

Metodología

En este proyecto se utilizó como herramienta de trabajo el software de computadora Materials Studio 4.4, con el módulo CASTEP se simularon los materiales semiconductores para esta investigación. Esta herramienta trabaja con estructuras atómicas en 3D para obtener resultados como la estructura de bandas. Se calculó la densidad de estados mediante las energías en Monkhorst-pack (Accelerlys, 2014). Aquí se utiliza el método de la teoría funcional de la densidad (DFT).

Estructura cristalina de perovskita

La estructura cristalina de perovskita se basa principalmente de la forma ABX_3 donde A y B son átomos con carga positiva (cationes) y X son átomos con carga negativa (anión); comúnmente A es $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$, Cs o yoduro de formamidinium ($\text{CH}(\text{NH}_2)_2\text{I}$). B es un material inorgánico puede ser plomo (Pb), estaño (Sn) o bismuto (Bi) y X es un halogenuro yodo (I), bromo (Br) o cloro (Cl) (Swarnkar, 2017).

Este material puede ser un material híbrido, parte orgánica-inorgánica ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$) o inorgánico completamente (CsPbI_3). Las propiedades ópticas y electrónicas de este material dependen directamente de la combinación de los diferentes materiales utilizados. La figura 1 muestra el modelo atómico de la estructura cristalina cúbica en forma perovskita.

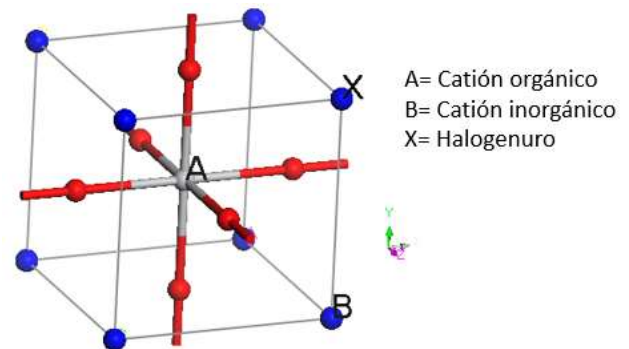


Figura 1 Estructura cristalina cúbica del tipo perovskita
Fuente: elaboración propia

La perovskita presenta tres diferentes tipos de estructuras: cúbica, tetragonal y ortorómbica, dependiendo de la temperatura de calcinado se obtienen estas estructuras (Oku, 2015). Diferentes resultados se han publicado los cuales presentan estructura cúbica obteniendo hasta 15% de eficiencia (Oku, 2015). Sin embargo la estructura con mejores resultados obtenidos es la estructura tetragonal.

Con esta estructura se han logrado eficiencia de hasta 18% (Sidhik et al., 2017) o una combinación de ambas con eficiencias mayores a 20% (Saliba et al., 2016) o bien con la combinación de cationes y aniones, obteniendo hasta 22% de eficiencia (Saliba et al., 2016).

Estructura cristalina cúbica de $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbX}_3$

La Figura 2 muestra el arreglo atómico de la celda unitaria de la forma $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbX}_3$, donde X es I, Br o Cl. Como se puede observar, es una estructura cúbica, en el centro se encuentra la parte orgánica CH_3NH_3 , en las aristas del cubo esta la parte inorgánica Pb y sobre de ella se encuentran los halogenuros (I, Br o Cl).

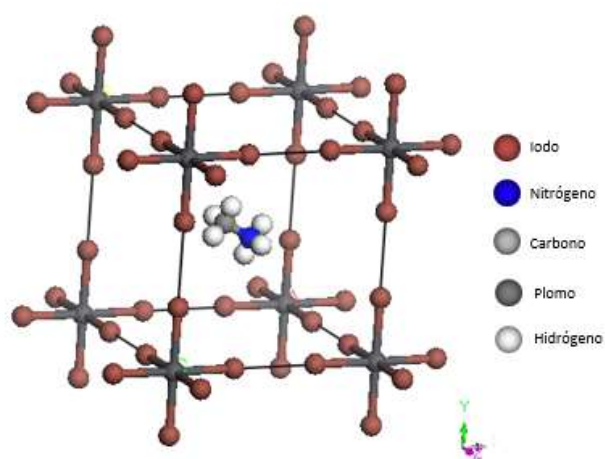


Figura 2 Estructura cristalina $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbX}_3$, donde X= Cl, Br o I

Fuente: elaboración propia

La Figura 3 muestra la estructura de bandas característica de la configuración $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$. Para obtener esta simulación se utilizaron los siguientes parámetros de red: $a = 8.839 \text{ \AA}$, $b = 8.839 \text{ \AA}$ y $c = 12.69 \text{ \AA}$.

La estructura de bandas nos da información acerca de la conductibilidad en los materiales; mediante las bandas de conducción (electrones que participan en las uniones atómicas) y la banda de valencia (electrones libres para la conducción), cuando se cruzan o se acercan, hay la posibilidad de que los electrones en la banda de valencia pasen a la de conducción, con un pequeño estímulo de temperatura o energía esto permitirá la conducción eléctrica.

Para determinar la brecha energética de un semiconductor depende de la resistividad que se tiene en el material y del dopaje que se encuentra de tipo N (electrones) o tipo P (huecos), generando una zona de polaridad positiva y otra negativa. Según la densidad de estados, como se muestran en las figuras, se obtiene donde hay la mayoría de portadores que pueden ser utilizados para generar la corriente eléctrica, pasando de la banda de valencia a la de conducción.

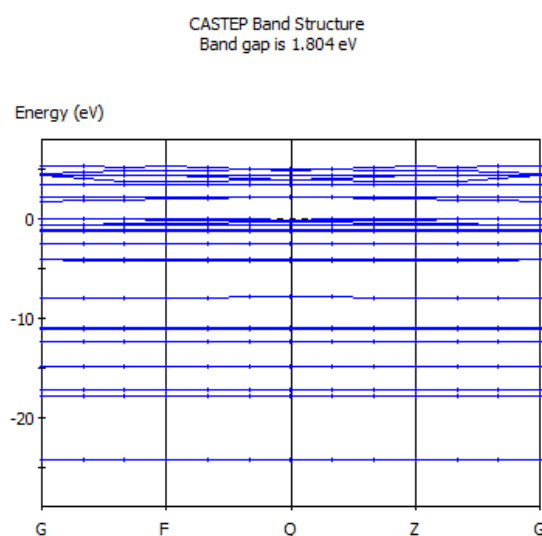


Figura 3 Estructura de bandas de $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$

Fuente: elaboración propia

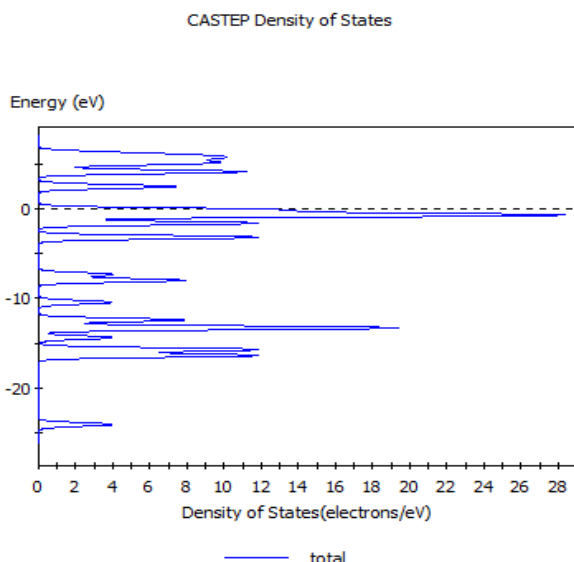


Figura 4 Densidad de estados de $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$
Fuente: elaboración propia

Utilizando este método, obtuvimos la brecha energética de la estructura cúbica de $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbX}_3$, donde $\text{X} = \text{Cl}, \text{Br}$ o I . En la tabla 1 se muestran los resultados.

Estructura	Brecha energética
$\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$	1.58 eV
$\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$	1.804 eV
$\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbCl}_3$	2.2 eV

Tabla 1 Brecha energética de estructuras $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbX}_3$
Fuente: elaboración propia

Como se puede observar, al cambiar el halógeno, la brecha energética cambia, obteniendo menor brecha energética para el caso de $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ (1.58 eV). Esta brecha energética aumenta para el caso de $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ (1.804 eV) y es aún mayor para $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbCl}_3$ (2.2 eV).

Utilizando la hipótesis de Planck, $E = hf$ donde E es la energía de la brecha energética, h es la constante de Planck ($h = 4.136 \times 10^{-15}$ eV/s) y f es la frecuencia de radiación, se puede calcular la longitud de onda a la cual absorben luz este tipo de semiconductores, la estructura $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ absorbe luz hasta ~ 790 nm, $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ hasta ~ 690 nm y la estructura $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbCl}_3$ hasta ~ 563 nm.

Estructura cristalina de CsPbX_3

Uno de los principales problemas de estos materiales es que no son estables, algunos autores atribuyen este problema a la parte orgánica del material. Una posible solución es reemplazar el yoduro de metilamonio ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$) por cesio (Cs), este material es completamente inorgánico, por lo que la estructura final es completamente inorgánica. La figura 5 muestra el arreglo atómico de la celda unitaria de la forma CsPbX_3 , donde X es I, Br o Cl , utilizando la estructura cúbica. Como se puede observar se sustituye la parte central formada anteriormente por $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$ por Cs.

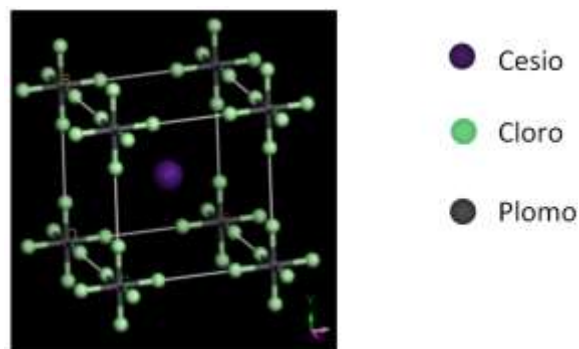


Figura 5 Estructura cristalina de CsPbI_3
Fuente: elaboración propia

La estructura de bandas (figura 6) nos da información sobre la brecha energética.

Para este caso se obtuvo la brecha energética utilizando la estructura CsPbI₃, además ampliamos el estudio utilizando también cloro y bromo. La figura 7 muestra la densidad de estados característico para la estructura CsPbI₃.

CASTEP Band Structure
Band gap is 1.804 eV

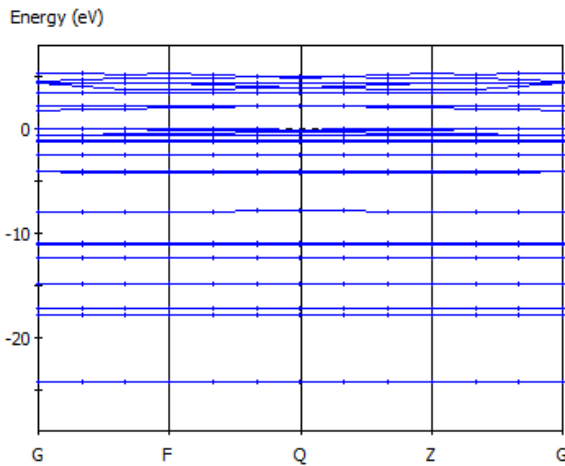


Figura 6 Estructura de bandas de CsPbI₃

Fuente: elaboración propia

CASTEP Density of States

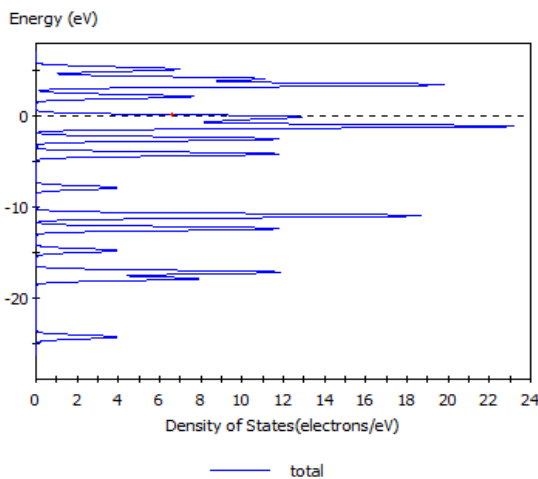


Figura 7 Densidad de estados CsPbI₃

Fuente: elaboración propia

La tabla 2 muestra los resultados obtenidos utilizando la estructura CsPbX₃, ampliando el estudio utilizando las siguientes estructuras: cúbica, tetragonal y ortorómbica.

Estructura	Cúbica	Tetragonal	Ortorómbica
CsPbI ₃	1.83	1.84	1.99
CsPbBr ₃	2.39	2.54	2.38
CsPbCl ₃	3.51	2.80	2.52

Tabla 2 Comparación de la brecha energética entre estructura cúbica, tetragonal y ortorómbica de la estructura CsPbX₃ en eV

Fuente: elaboración propia

Estructura	Brecha energética en la literatura
CsPbI ₃	1.73 eV
CsPbBr ₃	2.36 eV
CsPbCl ₃	2.98 eV

Tabla 3 Brecha energética de las estructuras cristalinas de CsPbX₃ encontradas en la literatura

Fuente: elaboración propia

Como se puede observar en la tabla 2, sigue existiendo la misma tendencia al cambiar el halogenuro en la estructura, para el caso de CsPbI₃ obtenemos una brecha energética de 1.829 eV, mientras que CsPbBr₃ presenta 2.39eV y CsPbCl₃ tiene una brecha energética de 3.51 eV, esta tendencia es similar que en el caso de CH₃NH₃PbX₃. La tabla 3 muestra valores de la brecha energética de CsPbX₃ reportados en la literatura.

Cuando se cambia de estructura, existen cambios en la brecha energética, estos cambios pueden estar asociados a las estructuras geométricas de cada una de las estructuras, esto debido a que al realizar el cambio de estructura cambian los parámetros de la red. Cambiando la distancia entre cada uno de los átomos de la estructura cristalina, mas aun entre la interacción del Pb-X (X=I, Br o Cl) el cual se observa en un cambio en la brecha energética. (Mosconi, 2013).

Conclusiones

Se realizó el análisis por medio de la teoría funcional de la densidad de la estructura perovskita $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbX}_3$ y CsPbX_3 . Se mostró que con el cambio en el halógeno se obtienen diferentes propiedades ópticas, para el caso $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbX}_3$, donde X es Cl, Br o I. Se obtuvieron brechas energéticas de 1.58, 1.804 y 2.2 eV respectivamente, mostrando que la estructura $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ presenta mejores propiedades de absorción y es el material más ideal para aplicarse en celdas solares, mientras que las configuraciones $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ y $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbCl}_3$ pueden tener aplicaciones directas en la fabricación de diodos emisores de luz.

En el caso de la estructura CsPbX_3 , presenta resultados similares, la estructura CsPbI_3 es la que presenta mejores condiciones de absorción para ser aplicada en celdas solares, mientras que las otras estructuras CsPbBr_3 y CsPbCl_3 presentan absorción y emisión en la parte visible, con potenciales aplicaciones en LEDs. Por otra parte, se mostró que el cambio de estructura (de cúbica a tetragonal u ortorrómbica) cambia las propiedades ópticas de cada material cambiando directamente la brecha energética.

Agradecimientos

Este trabajo fue apoyado por una beca en el Programa Nacional de Posgrados de Calidad, CONACyT (I. A. D.) 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. S.)

Referencias

- Accelerys. (2014). *CASTEP GUIDE*.
- Brabec, C. J., Cravino, A., Meissner, D., Sariciftci, N. S., Fromherz, T., Rispen, M. T., . . . Hummelen, J. C. (2001). Origin of the open circuit voltage of plastic solar cells. *Advanced Functional Materials*, 11(5), 374-380.
- Duran Pino, Barbosa J. Gabriel, Quinto Gabriel. (2016). Concentrador Solar PDR Con Seguimiento Solar. Aplicaciones de la Ingeniería, 3, 98-108.
- Fung, D. D. S. (2013). Introduction to solar cells. *Green energy and technology*, 1 - 16.
- Giordano, F., Abate, A., Baena, J. P. C., Saliba, M., Matsui, T., Im, S. H., . . . Graetzel, M. (2016). Enhanced electronic properties in mesoporous TiO_2 via lithium doping for high-efficiency perovskite solar cells. *Nature communications*, 7.
- Goh, C., Scully, S. R., & McGehee, M. D. (2007). Effects of molecular interface modification in hybrid organic-inorganic photovoltaic cells. *Journal of Applied Physics*, 101(11), 114503-114503.
- Huang, H., Zhao, F., Liu, L., Zhang, F., Wu, X.-g., Shi, L., . . . Zhong, H. (2015). Emulsion Synthesis of Size-Tunable $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ Quantum Dots: An Alternative Route toward Efficient Light-Emitting Diodes. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 7(51), 28128-28133. doi:10.1021/acsami.5b10373
- Jacobsson, T. J., Correa-Baena, J.-P., Pazoki, M., Saliba, M., Schenk, K., Grätzel, M., & Hagfeldt, A. (2016). Exploration of the compositional space for mixed lead halogen perovskites for high efficiency solar cells. *Energy & Environmental Science*, 9(5), 1706-1724.

Kamat, P. V. (2008). Quantum dot solar cells. Semiconductor nanocrystals as light harvesters†. *The Journal of Physical Chemistry C*, 112(48), 18737-18753.

Lopez-Luke, T., Wolcott, A., Xu, L.-p., Chen, S., Wen, Z., Li, J., . . . Zhang, J. Z. (2008). Nitrogen-doped and CdSe quantum-dot-sensitized nanocrystalline TiO₂ films for solar energy conversion applications. *The Journal of Physical Chemistry C*, 112(4), 1282-1292.

Ma, W., Yang, C., Gong, X., Lee, K., & Heeger, A. J. (2005). Thermally stable, efficient polymer solar cells with nanoscale control of the interpenetrating network morphology. *Advanced Functional Materials*, 15(10), 1617-1622.

Mosconi, E., Amat, A., Nazeeruddin, M. K., Grätzel, M., & De Angelis, F. (2013). First-Principles Modeling of Mixed Halide Organometal Perovskites for Photovoltaic Applications. *The Journal of Physical Chemistry C*, 117(27), 13902-13913. doi:10.1021/jp4048659

Nelson, J. (2003). *The Physics of Solar Cells*. London: Imperial College Press.

Noh, J. H., & Seok, S. I. (2015). Steps toward efficient inorganic–organic hybrid perovskite solar cells. *MRS Bulletin*, 40(08), 648-653.

NREL. (2017). *Efficiency chart*. Retrieved from Oku, T. (2015). Crystal structures of CH₃NH₃PbI₃ and related perovskite compounds used for solar cells *Solar Cells-New Approaches and Reviews*: InTech.

Rangel-Hernández Víctor Hugo, Niño-Avendaño Andrés Mauricio, Ornelas-Jacobo Ruben. Panorama general de las celdas SOFC en la generación de energía eléctrica. *Aplicación científica y técnica*, 3, 61-73.

Robel, I., Subramanian, V., Kuno, M., & Kamat, P. V. (2006). Quantum Dot Solar Cells. Harvesting Light Energy with CdSe Nanocrystals Molecularly Linked to Mesoscopic TiO₂ Films. *Journal of the American Chemical Society*, 128(7), 2385-2393. doi:10.1021/ja056494n

Saliba, M., Matsui, T., Seo, J.-Y., Domanski, K., Correa-Baena, J.-P., Nazeeruddin, M. K., . . . Hagfeldt, A. (2016). Cesium-containing triple cation perovskite solar cells: improved stability, reproducibility and high efficiency. *Energy & Environmental Science*, 9(6), 1989-1997.

Sanchez, R. S., de la Fuente, M. S., Suarez, I., Muñoz-Matutano, G., Martinez-Pastor, J. P., & Mora-Sero, I. (2016). Tunable light emission by exciplex state formation between hybrid halide perovskite and core/shell quantum dots: Implications in advanced LEDs and photovoltaics. *Science advances*, 2(1), e1501104.

Sark, W. v., Meijerink, A., & Schropp, R. (2012). Solar spectrum conversion for photovoltaics using nanoparticles. *CIER-E-2012-8*, 1-28.

Saunders, B. R., & Turner, M. L. (2008). Nanoparticle–polymer photovoltaic cells. *Advances in colloid and interface science*, 138(1), 1-23.

Scharber, M. C., Mühlbacher, D., Koppe, M., Denk, P., Waldauf, C., Heeger, A. J., & Brabec, C. J. (2006). Design rules for donors in bulk-heterojunction solar cells—Towards 10% energy-conversion efficiency. *Advanced Materials*, 18(6), 789-794.

Sidhik, S., Esparza, D., Martínez-Benítez, A., Lopez-Luke, T., Carriles, R., Mora-Sero, I., & de la Rosa, E. (2017). Enhanced Photovoltaic Performance of Mesoscopic Perovskite Solar Cells by Controlling the Interaction between CH₃NH₃PbI₃ Films and CsPbX₃ Perovskite Nanoparticles. *The Journal of Physical Chemistry C*, 121(8), 4239-4245. doi:10.1021/acs.jpcc.7b00861

Song, J., Li, J., Li, X., Xu, L., Dong, Y., & Zeng, H. (2015). Quantum Dot Light-Emitting Diodes Based on Inorganic Perovskite Cesium Lead Halides (CsPbX₃). *Advanced Materials*, 27(44), 7162-7167.

Swarnkar, A., Ravi, V. K., & Nag, A. (2017). Beyond Colloidal Cesium Lead Halide Perovskite Nanocrystals: Analogous Metal Halides and Doping. *ACS Energy Letters*, 2(5), 1089-1098.

Van Hal, P. A., Wienk, M. M., Kroon, J. M., & Janssen, R. A. (2003). TiO₂ sensitized with an oligo (p-phenylenevinylene) carboxylic acid: a new model compound for a hybrid solar cell. *Journal of Materials Chemistry*, 13(5), 1054-1057.

Vargas Suárez, R. (2015). Reforma energética: De servicio público a modelo de negocios. *Política y cultura*(43), 125-145.

Venegas-Trujillo Tiberio, Contreras-Aguilar Luis, Villagrán-Villegas Luz, Laguna-Camacho Juan. (2016). Universidad Sustentable: hacia la transición energética mediante generación de energía eléctrica fotovoltaica y eficiencia energética. *Aplicaciones de la Ingeniería*, 3, 131-139.

Wei, M., Sun, W., Liu, Y., Liu, Z., Xiao, L., Bian, Z., & Chen, Z. (2016). Highly luminescent and stable layered perovskite as the emitter for light emitting diodes. *physica status solidi (a)*.