

Mejora en la eficiencia de absorción de un sistema de películas delgadas de CdS-CdTe mediante el uso de nano rejillas de ITO para aplicaciones fotovoltaicas.

Improvement in the absorption efficiency of a CdS-CdTe thin film system by using ITO nano-grids for photovoltaic applications.

María Isidra Rodríguez González¹, José Manuel González Vargas¹, José Javier Sánchez Mondragón², Néstor Lozano Crisóstomo¹, Julio César García Melgarejo¹.

¹ Universidad Autónoma de Coahuila, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Carr. Torreón-Matamoros Km 7.5, Cd Universitaria, C.P. 27410, Torreón, Coahuila, México.

² Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, Carr. Luis Enrique Erro #1, Tonanzintla, C.P.72840, San Andrés Cholula, Puebla, México.

Autor de correspondencia: Maria Isidra Rodríguez González

Universidad Autónoma de Coahuila

Correo electrónico: rodriguez_isidra@uadec.edu.mx

Resumen

El telururo de cadmio (CdTe) es un semiconductor ampliamente utilizado en la fabricación de células solares de película delgada. Sin embargo, las células solares de capas planas presentan el inconveniente de altas pérdidas por reflexión de la luz solar incidente. Para abordar este problema, se ha implementado el uso de nanoestructuras dieléctricas que utilizan la dispersión frontal descrita por la teoría de Mie, con el objetivo de mejorar la absorción de la luz en las células solares de CdTe. En este artículo se describe numéricamente la mejora en la absorción de un sistema de cuatro capas delgadas, el cual está conformado por óxido de indio y estaño (ITO, por sus siglas en inglés Indium Tin Oxide), sulfuro de cadmio (CdS), telururo de cadmio (CdTe) y oro (Au). La propuesta consiste en la incorporación de dos tipos de nano rejillas de ITO, una rejilla simple y una rejilla doble. Los parámetros considerados en nuestro análisis fueron el periodo de las nano rejillas y la separación entre los nano alambres de la rejilla doble. Las soluciones numéricas fueron implementadas en el software COMSOL Multiphysics. Los resultados obtenidos indican que la incorporación de las nano rejillas contribuye a mejorar la absorción de la capa de CdTe hasta un 3.75%, lo cual ofrece una opción interesante a considerar en el desarrollo de celdas solares mejoradas basadas en CdS-CdTe.

Palabras clave: Celdas solares, CdS-CdTe, nano rejillas, eficiencia cuántica, densidad de potencia absorbida.

Abstract

Cadmium telluride (CdTe) is a widely used semiconductor in the fabrication of thin-film cells. However, flat-layer solar cells have the drawback of high losses due to the reflection of incident sunlight. To address this problem, the use of dielectric nanostructures using forward scattering described by Mie theory has been implemented, with the aim of improving light absorption in CdTe solar cells. In this article we describe numerically the absorption improvement of a four-layer thin-film system, which is composed of Indium Tin Oxide

(ITO), cadmium sulfide (CdS), cadmium telluride (CdTe), and gold (Au). The proposal involves the incorporation of two types of ITO nano-grids, a single and a double grid. The parameters considered in our analysis were the period of the nano-grids and the separation between the nanowires of the double grid. We implemented the numerical solutions by using COMSOL Multiphysics software. The results obtained indicate that the incorporation of the nano-grids contributes to improving the absorption of the CdTe layer up to 3.75%, which offers an interesting option to consider in the development of improved CdS-CdTe based solar cells.

Key words: solar cell, CdS-CdTe, nano-grids, quantum efficiency, absorbed power density.

Introducción

La energía solar fotovoltaica es la energía eléctrica obtenida mediante la conversión de la energía de la radiación solar. La investigación en este tipo de energía ha tenido un auge notable en los últimos años debido a que la energía solar fotovoltaica puede conducirnos hacia la sostenibilidad energética y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (International Energy Agency (IEA), 2022; Kabir y col., 2018)

La conversión de energía solar a energía eléctrica se lleva a cabo en celdas solares, y es posible gracias al fenómeno físico denominado efecto fotoeléctrico (Einstein, 1905). Las celdas solares poseen una estructura interna bastante compleja constituida de capas de diversos materiales. Se pueden identificar cuatro capas que desempeñan las siguientes funciones importantes en una celda solar (Lee & Ebong, 2017; Powalla y col., 2018):

- a) La *capa activa*, la cual está hecha de algún material semiconductor, desempeña una parte fundamental en la celda solar, ya que en ésta se lleva a cabo la conversión de radiación solar en energía eléctrica.
- b) Los *contactos eléctricos*, tanto en la parte frontal como en la posterior, actúan como terminales que permiten el flujo de electricidad generada por la celda.

- c) En algunos tipos de celdas, se introduce una *capa de amortiguamiento*, misma que se encuentra entre la capa activa y la capa de contacto, cuya función principal es la de mejorar las propiedades electrónicas y la eficiencia de la celda solar.

Dependiendo del tipo de tecnología empleada, el grosor típico de la capa activa de una celda convencional es de 200 a 300 micras (Efaz1 y col., 2021).

En la actualidad, la industria de la energía solar fotovoltaica se encuentra en su mayoría compuesta por células solares de silicio basadas en obleas (c-Si), las cuales pueden lograr una eficiencia de hasta el 26% (Green y col., 2023; Wang & Su, 2014). No obstante, el costo elevado de los módulos fotovoltaicos disponibles en el mercado es un obstáculo importante para la adopción masiva de la tecnología fotovoltaica. Uno de los retos actuales que tiene la investigación en paneles solares es la reducción del material necesario para su fabricación, lo que podría traducirse en un menor impacto ambiental, una reducción de costos de fabricación y un menor costo por watt de energía producida. Por estas razones, se ha incrementado la investigación en celdas solares de película delgada, en donde el grosor de la capa activa es considerablemente más fino de 2 a 5 micras en comparación con las celdas solares típicas de 200 micras (International Energy Agency (IEA), 2022). Sin embargo, estas celdas solares de película delgada presentan inconvenientes, quizás el más importante es una disminución de la eficiencia respecto a una celda convencional precisamente por la reducción del material activo.

Con la finalidad de subsanar la disminución en la eficiencia de las celdas solares de película delgada, se ha explorado el uso de estructuras, como las esferas, los alambres o los pilares; todas estas, en escala nanométrica. El uso de estas nano estructuras ha demostrado una absorción mejorada de la radiación solar debido a fenómenos físicos como la reducción de la luz reflejada por la celda, efectos de concentración de la luz, efectos de guiado de ondas y también la aparición de resonancias plasmónicas descritas por la teoría de Mie (Duque y col., 2017; Wrigglesworth & Johnston, 2021).

Las celdas solares basadas en el CdTe como capa activa se han convertido en una de las opciones más atractivas para el estudio de los sistemas solares fotovoltaicos. Las principales características que destacan a este material entre otros utilizados en esta tecnología son sus propiedades ópticas, debido a que presenta un valor de banda prohibida aproximado a 1.5 eV, muy cercano al valor teórico óptimo del espectro solar y un alto coeficiente de absorción, lo cual lo hacen ideal para el uso en las celdas solares de película delgada (Bayod-Rújula, 2019). Una configuración común de capas de película delgada se muestra en la Figura 1.

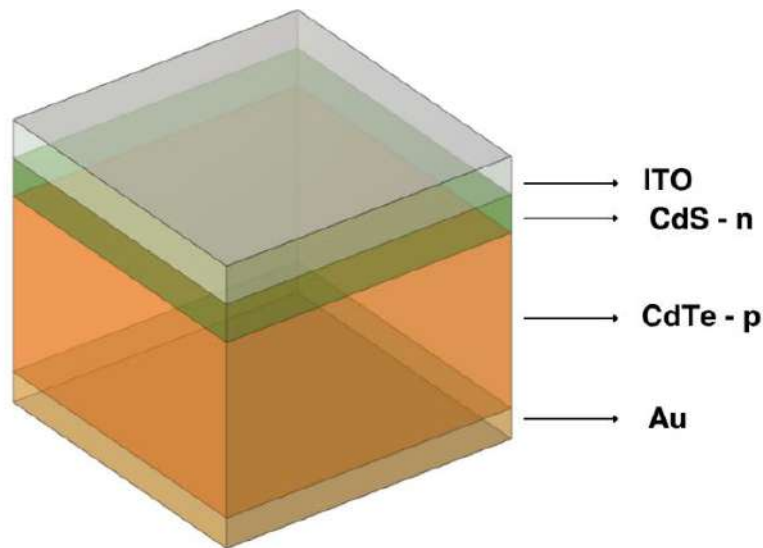


Figura 1. Estructura elemental de capas de una celda solar de película delgada. El contacto frontal está hecho de óxido de indio y estaño (ITO), el cual cuenta con un espesor de 150 nm. La capa de amortiguamiento está hecha de sulfuro de cadmio (CdS) con un espesor de 150 nm, mientras que la capa absorbente es de telururo de cadmio (CdTe) con un espesor de 1000 nm. Finalmente, el contacto posterior está hecho de oro (Au) con un espesor de 100 nm.

Fuente: Elaboración propia.

La investigación actual sobre el mejoramiento de la absorción de la energía solar por medio de nanoestructuras se analiza desde un enfoque óptico. En este artículo se describen

las estrategias numéricas que permiten analizar la absorción de radiación en una celda solar de película delgada. En particular, se analizará la propagación del campo eléctrico a través de un sistema simple CdS-CdTe al cual se incorporarán nanoestructuras basadas en nano rejillas dieléctricas las cuales tienen como objetivo incrementar la absorción de la capa activa. El modelado se efectuará en el software de análisis COMSOL Multiphysics.

Modelo simplificado de la celda solar con un nano alambre

En esta sección, se describe numéricamente la propagación de la luz a través de las tres configuraciones indicadas en la Figura 2a-c. Para reducir el tiempo de cómputo requerido para efectuar las soluciones numéricas, el análisis se limitará al caso de geometrías en dos dimensiones. La primera configuración consiste en un sistema de cuatro capas de película

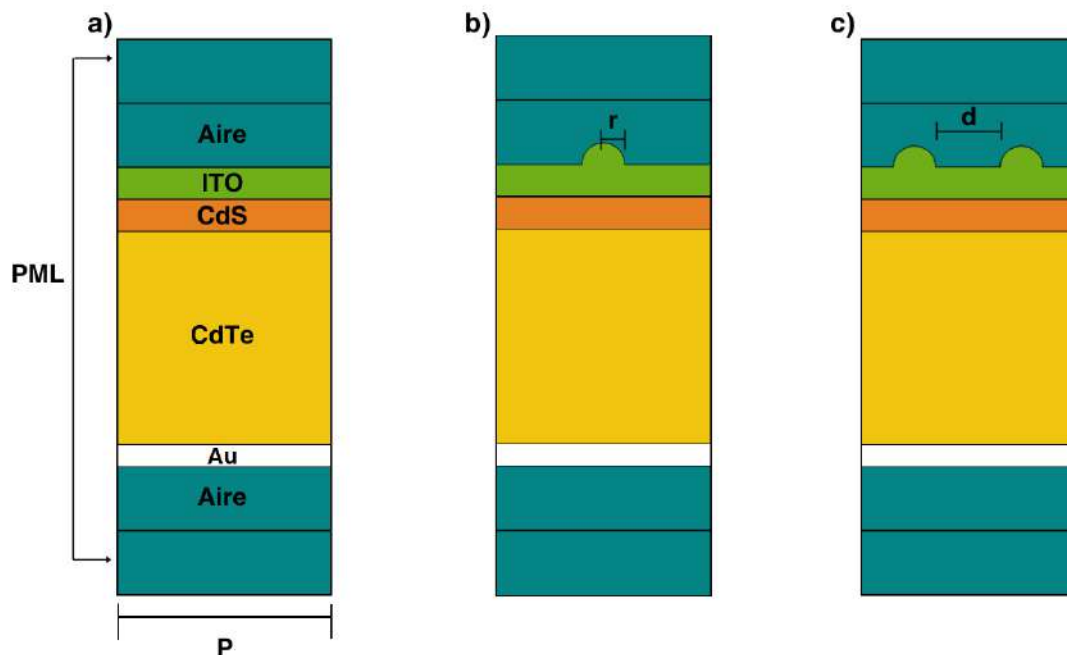


Figura 2. Esquema de los tres sistemas de capas. a) Configuración de sistema de capas en celda plana, b) Configuración con un alambre de ITO y c) Configuración con dos alambres de ITO. Las capas de aire en el sistema al igual que las capas perfectamente combinadas de aire (PML) son dominios numéricos artificiales necesarios para un adecuado modelado numérico.

Fuente: Elaboración propia.

delgada que representan las componentes elementales de una celda solar. Posteriormente, se analizará el efecto que tiene en la absorción la colocación de un nano alambre de ITO, y finalmente se estudiará el efecto que tiene la colocación de un doble nano alambre. Los alambres de la rejilla y la doble rejilla tienen forma semicircular, y en todos los casos aquí estudiados tienen un radio r de 100 nm.

Los resultados se presentarán para tres valores de periodo P de la configuración (600 nm, 800 nm y 1000 nm). En el caso de la doble nano rejilla, también se analizarán los efectos de variar la distancia de separación d entre los nano alambres. Es importante mencionar que se añadieron un par de dominios artificiales absorbentes PML (Perfectly Matched Layer, por sus siglas en inglés), que tienen la función de evitar soluciones espurias que no correspondan a una situación física. Finalmente, en los bordes izquierdo y derecho se ha aplicado una condición periódica tipo Floquet; al imponer esta condición en los bordes, la geometría indicada puede considerarse la celda básica que constituye nuestra nano rejilla (ver Figura 3a).

Solución numérica.

La simulación inicia con la incidencia sobre el puerto de entrada de una onda plana linealmente polarizada en la dirección z de manera perfectamente perpendicular a la estructura de capas, como se indica en la Figura 3b. Esta onda plana interactuará con los materiales en cada una de las capas obedeciendo la ecuación de onda en el dominio de las frecuencias (Maier, 2007):

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) - k_0^2 \varepsilon_r \mathbf{E} = \mathbf{0} \quad (1)$$

En la ecuación anterior, el campo eléctrico a través de la estructura es denotado por \mathbf{E} , la magnitud del vector de onda en el vacío se denota mediante k_0 , mientras que la permitividad relativa es denotada por ε_r . La permitividad relativa es una función compleja de la frecuencia del campo $\varepsilon_r = \varepsilon_1 + i\varepsilon_2$, y proporciona todas las propiedades ópticas de los materiales al estar

conectada al índice de refracción complejo de la siguiente manera $n^2 = \varepsilon_1 / 2 + |\varepsilon_r| / 2$ y $\kappa = \varepsilon_2 / 2n$. La parte real del índice de refracción n cuantifica la disminución de la velocidad de fase de propagación de las ondas debido a la polarización del material. Por otra parte, la parte imaginaria del índice de refracción κ también se denomina coeficiente de extinción, y determina la absorción óptica de las ondas electromagnéticas al propagarse a través del medio. Este coeficiente de extinción está vinculado con el coeficiente de absorción propio de la ley de Beer (Swinehart, 1962).

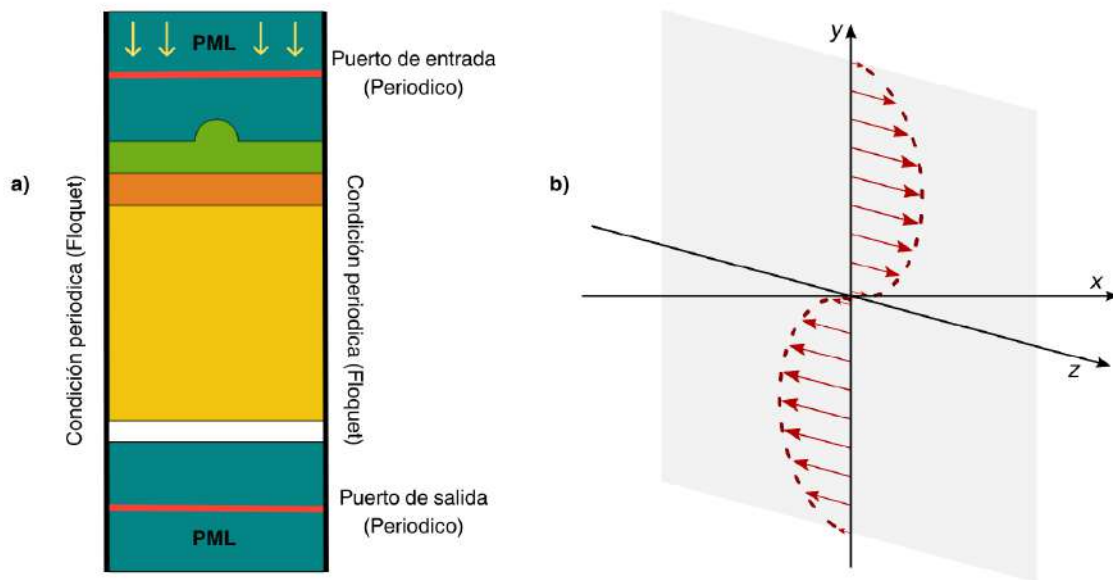


Figura 3. a) Esquema indicando un sistema de capas al cual se le ha añadido un nano alambre. Debido a la periodicidad impuesta por las condiciones de borde tipo Floquet, las soluciones que obtengamos corresponderán a una rejilla. b) Onda plana linealmente polarizada en la dirección z propagándose en la dirección $-y$.

Fuente: Elaboración propia.

A partir de la solución numérica de la ecuación (1), es posible determinar la densidad de potencia absorbida en cada capa de la estructura por medio de la expresión.

$$Q_e = \frac{1}{2} \omega \text{Im}\{\varepsilon\} |\mathbf{E}|^2. \quad (2)$$

Obsérvese que la densidad de potencia absorbida depende de la parte imaginaria de la permitividad del material $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$, y también de la frecuencia del campo eléctrico ω . Otra cantidad interesante de analizar es la eficiencia cuántica de un material, esta cantidad se define como la relación entre la potencia absorbida y la potencia incidente.

$$QE(\lambda) = \frac{P_{abs}(\lambda)}{P_{in}(\lambda)}. \quad (3)$$

La potencia de entrada en la configuración es un parámetro controlado de la simulación, mientras que la potencia absorbida por un material se determina por integración de la densidad de potencia sobre el volumen del material $P_{abs}(\lambda) = \iiint_V Q_e(\lambda, \mathbf{r}) dV$.

A pesar de que la densidad de potencia absorbida y la eficiencia cuántica son cantidades importantes, se debe tener en cuenta que el objetivo es simular la radiación solar, la cual está compuesta por un amplio rango de longitudes de onda, desde los rayos gamma hasta las ondas de radio (K.N. Liou, 2002). Para proporcionar una versión más realista de la propagación de la luz, se tendrá en cuenta que la onda incidente posee las características del estándar de radiación solar AM1.5G (The German Energy Society, 2013), dicho estándar es altamente utilizado en el área de energía fotovoltaica. Existen cantidades físicas importantes que consideran las aportaciones de la radiación solar; entre estas destaca la eficiencia cuántica integrada, la cual está dada por la siguiente expresión:

$$IQE = \frac{\int \frac{\lambda}{hc} QE(\lambda) I_{AM1.5}(\lambda) d\lambda}{\int \frac{\lambda}{hc} I_{AM1.5}(\lambda) d\lambda}. \quad (4)$$

La eficiencia cuántica integrada tiene una suposición importante: cada fotón absorbido contribuye con la generación de un electrón-hueco y además todos estos contribuyen a la corriente de corto circuito (Bayod-Rújula, 2019). En la práctica ocurren fenómenos más complejos que no pueden ser descritos mediante la solución únicamente de la ecuación de onda, sin embargo, el presente análisis es un buen punto de partida para cuantificar el mejoramiento de la absorción en una situación idealizada.

En el contexto de mejora del rendimiento de la absorción mediante la introducción de nuevas geometrías, es esencial realizar una cuantificación de la mejora lograda. Con este propósito se emplea un indicador clave, el *porcentaje de mejora*, que permite evaluar de manera cuantitativa el impacto de las geometrías propuestas. El cálculo de este porcentaje se lleva a cabo mediante la siguiente expresión:

$$\text{Porcentaje de mejora} = \left(\frac{IQE_{\text{nuevo}} - IQE_{\text{referencia}}}{IQE_{\text{referencia}}} \right) \times 100 \quad (5)$$

En la ecuación (5), IQE_{nuevo} denota la eficiencia cuántica integrada obtenida cuando un alambre o doble alambre es introducido, y $IQE_{\text{referencia}}$ indica la eficiencia cuántica integrada del sistema simple de nano capas, el cual denominamos sistema de referencia.

Resultados y Discusión

Para analizar el comportamiento del campo eléctrico \mathbf{E} a través de las tres estructuras estudiadas (el sistema de referencia, la nano rejilla y la nano rejilla doble), se resolvió la ecuación de onda en el dominio de la frecuencia. Mediante este enfoque, se logró obtener una descripción detallada de cómo varía el campo eléctrico en función de las características de cada estructura. Además, se consideraron campos eléctricos incidentes en un rango de longitudes de onda desde 300 nm hasta 840 nm. Asimismo, se investigó la influencia de la distancia de separación entre los nano alambres en la nano rejilla doble, para cada uno de los tres valores de periodo P analizados.

En la Figura 4a-c se presenta la densidad de potencia absorbida de las tres estructuras consideradas para un caso particular, en el que el periodo, la distancia de separación en los alambres de la doble nano rejilla y la longitud de onda del campo incidente son de 1000 nm, 60 nm, y 800 nm, respectivamente. Los resultados están normalizados con respecto al valor máximo de la densidad de potencia del sistema de referencia $Q_e / \max(Q_{e-ref})$. Se observa que, para esta longitud de onda, la mayor parte de la potencia absorbida se concentra precisamente en la capa de CdTe. Además, el sistema de referencia presenta una densidad de potencia absorbida de $2.0478 \times 10^{12} \text{ W/m}^3$ y con la introducción de una nano rejilla y de una doble nano rejilla se obtuvieron mejoras del 38.55% y 50.27%, respectivamente.

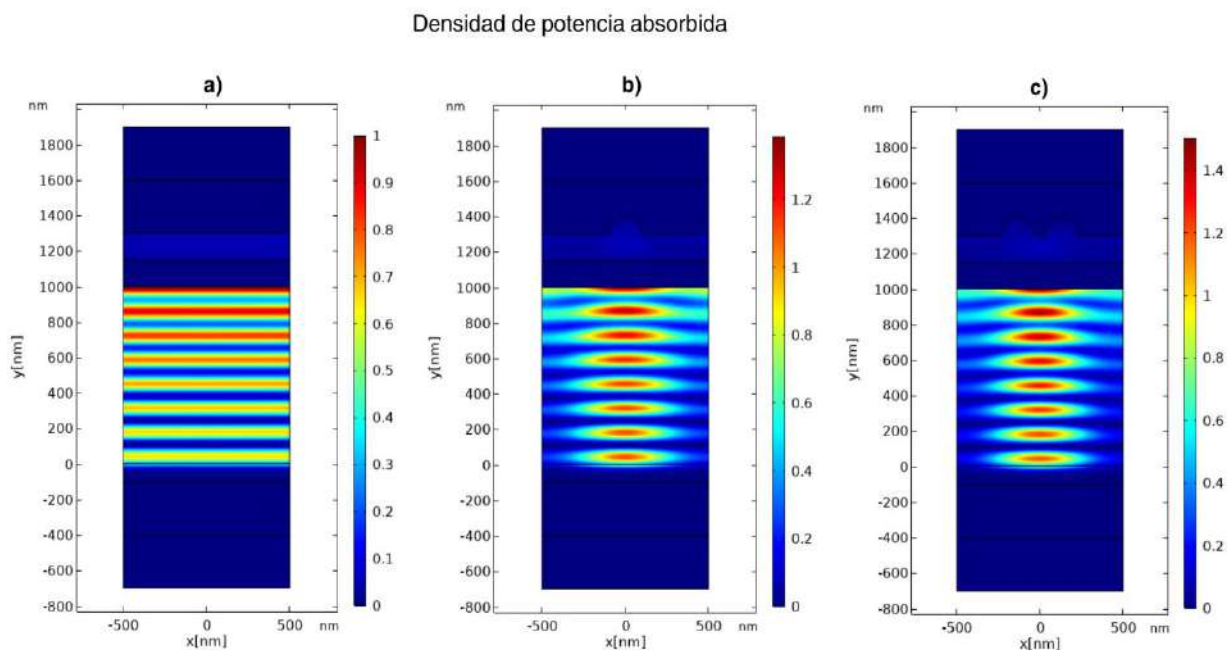


Figura 4. Distribución de densidad de potencia absorbida en la superficie W / m^3 de las estructuras a 800 nm de longitud de onda para a) estructura de placas planas, b) estructura con un nano alambre y c) estructura con doble nano alambre con una distancia de separación $d = 60 \text{ nm}$.

Fuente: Elaboración propia.

Además de los valores mejorados en la densidad de potencia absorbida, la eficiencia cuántica $QE(\lambda)$ contribuye a un mejor entendimiento de la mejora en la eficiencia de la absorción en todo el rango del espectro que estamos estudiando (desde 300 nm hasta 840 nm). Esta eficiencia cuántica puede interpretarse como el porcentaje que se absorbe de la potencia de radiación incidente y, por lo tanto, se trata de una cantidad adimensional cuyo valor mínimo es cero y el valor máximo es uno.

En la Figura 5 se muestra el cálculo de la eficiencia cuántica para una estructura con periodo de 1000 nm. La eficiencia cuántica de referencia (Gráfica azul) es mayor para longitudes de onda superiores a los 700 nm. Al agregar la rejilla y, aún más drásticamente, al agregar la doble rejilla se observa un incremento en la eficiencia cuántica a longitudes de onda menores que los 700 nm, es decir, más cercanas a la parte azul del espectro. Este hecho puede tener consecuencias interesantes en el incremento de la eficiencia de una celda solar. Es importante tener en cuenta que la energía asociada a un fotón se determina mediante la fórmula $E = hc / \lambda$, donde h , c y λ son la constante de Planck, la velocidad de la luz en el vacío y su longitud de onda, respectivamente (K.N. Liou, 2002). Esto implica que la energía aumenta a medida que la longitud de onda disminuye. Por lo tanto, incrementar la absorción de la radiación en longitudes de onda más cortas puede contribuir a una mejora en las capacidades de una celda solar.

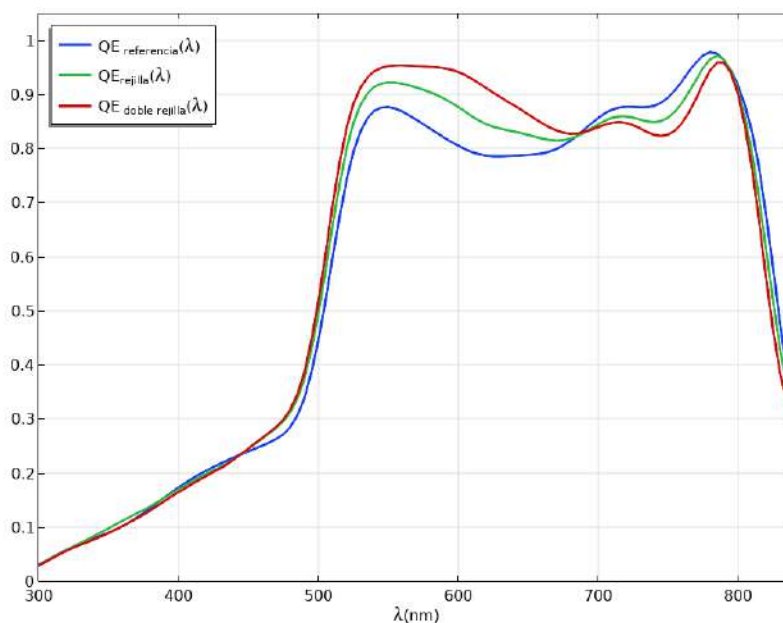


Figura 5. Comparación de la eficiencia cuántica $QE(\lambda)$ del sistema simple de nano capas (El cual es nuestro sistema de referencia), del sistema que contiene la rejilla y del sistema que contiene la

Para indagar en una posible mejora en la absorción en condiciones de iluminación solar, es requerido considerar las características de dicha radiación, las cuales están contenidas en el estándar AM1.5G. En este trabajo es de especial interés evaluar los efectos de la doble nano rejilla, por lo que se calculó su eficiencia cuántica integrada y a partir de ésta se obtuvo el porcentaje de mejora que se introduce respecto al sistema de referencia. Para un periodo de 600 nm el porcentaje de mejora se incrementó hasta un valor máximo de 2.4%. Se observa que, para el periodo de 800 nm, y también para el de 1000 nm, los porcentajes máximos de mejora son de aproximadamente 3.75%. Las distancias de separación d que permiten estos porcentajes pueden observarse en la Figura 6. Obsérvese que, para un periodo de 1000 nm, el porcentaje de mejora en la absorción decae drásticamente a medida que d se incrementa por encima de los 200 nm.

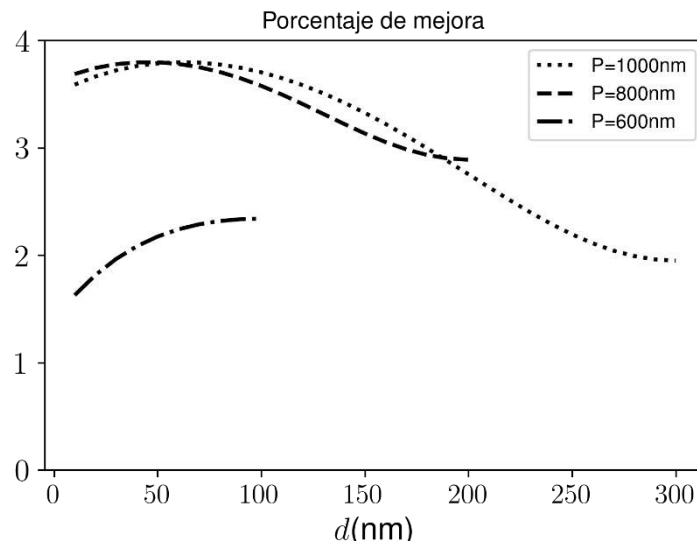


Figura 6. Porcentaje de mejora de la absorción introducida por la doble nano rejilla como función de la distancia de separación entre los nano alambres de ITO. La doble nano rejilla muestra un mejor desempeño cuando el periodo es de 1000 nm y de 800 nm.

Fuente: Elaboración propia.

Aunque nuestro estudio se centró específicamente en el uso de doble de nano rejilla de ITO, los resultados obtenidos respaldan la idea general de que la modificación de un sistema de capas con nanoestructuras puede conducir a mejoras en la eficiencia y la capacidad de absorción de la radiación solar. Los resultados reportados en la presente contribución son consistentes con estudios anteriores que han utilizado partículas esféricas de ITO sobre nano cables de fosforo de indio (InP)(van Dam y col., 2016) y también hemisferios de ITO sobre diferentes arreglos de nano cables (Kordrostami & Yadollahi, 2020). Además, existen estudios que reportan el análisis de dímeros metálicos con forma cilíndrica (Belan y col., 2015) semejantes a la nano rejilla doble presentada en este trabajo; sin embargo, es importante destacar, que aún queda mucho por explorar en el campo de las nanoestructuras dieléctricas.

Conclusiones

La fabricación de nano estructuras en sistemas de capas destinados a aplicaciones fotovoltaicas ha demostrado ser un mecanismo efectivo para incrementar la eficiencia de las celdas solares de película delgada. Con la finalidad de incrementar la absorción de un sistema de capas delgadas, se analizó el desempeño de nano estructuras basadas en rejillas simples y dobles hechas de alambres semicirculares de ITO. Las variables geométricas analizadas incluyeron el periodo de las rejillas y la distancia de separación entre los nano alambres de la rejilla doble.

La evaluación del desempeño de la capa absorbente fue efectuada desde un enfoque óptico, es decir, se resolvió numéricamente la ecuación de ondas en el dominio de las frecuencias y se calcularon dos grupos de cantidades físicas. El primer grupo, densidad de potencia absorbida y eficiencia cuántica, considera una radiación incidente uniforme para cada longitud de onda. La introducción de nano rejillas mejoró estas cantidades debido a un incremento en la absorción de radiación de longitudes de onda menores a 700 nm, donde los fotones transportan una mayor energía. El segundo grupo, eficiencia cuántica integrada y

porcentaje de mejora, nos proporciona una mejor descripción de la absorción, ya que toma en cuenta el estándar de radiación solar AM 1.5G. La doble rejilla mostró un porcentaje de mejora del 3.75%. Además, se observó que los parámetros geométricos de la doble rejilla deben elegirse cuidadosamente, ya que una mala elección de estos puede incluso provocar un detrimento en la absorción.

Por último, es preciso mencionar que el estudio óptico aquí efectuado puede generalizarse para tomar en cuenta fenómenos más complejos tanto ópticos como aquellos relacionados con las propiedades eléctricas de los materiales semiconductores involucrados. Por ejemplo, nuestro análisis puede extenderse al considerar los efectos de la polarización y el ángulo de incidencia del campo eléctrico. Evidentemente, este análisis más general puede darnos una visión aún más realista del fenómeno de generación de energía fotovoltaica.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Coahuila por su valioso apoyo durante la realización de esta investigación. También se agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo financiero otorgado a través de las becas de María Isidra Rodríguez González y José Manuel González Vargas.

Referencias

- Bayod-Rújula, A. A. (2019). Solar photovoltaics (PV). En *Solar Hydrogen Production: Processes, Systems and Technologies* (pp. 237–295). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814853-2.00008-4>
- Belan, S., Parfenyev, V., & Vergeles, S. S. (2015). Negative-angle refraction and reflection of visible light with a planar array of silver dimers. *Optical Materials Express*, 5(12): 2843. <https://doi.org/10.1364/OME.5.002843>
- Duque, J. S., Blandón, J. S., & Riascos, H. (2017). Localized Plasmon resonance in metal nanoparticles using Mie theory. *Journal of Physics: Conference Series*, 850: 012017. IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/850/1/012017>

- Efazl, E. T., Rhaman, M. M., Al Imam, S., Bashar, K. L., Kabir, F., Mourtaza, M. E., Sakib, S. N., & Mozahid, F. A. (2021). A review of primary technologies of thin-film solar cells. *Engineering Research Express*, 3(3): 032001. <https://doi.org/10.1088/2631-8695/ac2353>
- Einstein, A. (1905). On a Heuristic Point of View about the Creation and Conversion of Light. *Annalen der Physik*, 17(6): 132–148.
- Green, M. A., Dunlop, E. D., Siefert, G., Yoshita, M., Kopidakis, N., Bothe, K., & Hao, X. (2023). Solar cell efficiency tables (Version 61). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 31(1): 3–16. <https://doi.org/10.1002/pip.3646>
- International Energy Agency (IEA). (2022). *Renewables 2022*. <https://www.iea.org/reports/renewables-2022>
- Kabir, E., Kumar, P., Kumar, S., Adelodun, A. A., & Kim, K. H. (2018). Solar energy: Potential and future prospects. En *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82: 894–900. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.094>
- K.N. Liou. (2002). Fundamentals of Radiation for Atmospheric Applications. En *An Introduction to Atmospheric Radiation* (Vol. 84, pp. 1–36). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0074-6142\(02\)80016-X](https://doi.org/10.1016/S0074-6142(02)80016-X)
- Kordrostami, Z., & Yadollahi, A. (2020). High absorption enhancement of invert funnel and conical nanowire solar cells with forward scattering. *Optics Communications*, 459: 125059. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2019.125059>
- Kumar, S. G., & Rao, K. S. R. K. (2014). Physics and chemistry of CdTe/CdS thin film heterojunction photovoltaic devices: Fundamental and critical aspects. En *Energy and Environmental Science* (Vol. 7(1): 45–102. Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/c3ee41981a>
- Lee, T. D., & Ebong, A. U. (2017). A review of thin film solar cell technologies and challenges. En *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70: 1286–1297. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.028>
- Maier, S. (2007). *PLASMONICS: FUNDAMENTALS AND APPLICATIONS*. Springer.
- Powalla, M., Paetel, S., Ahlswede, E., Wuerz, R., Wessendorf, C. D., & Magorian Friedlmeier, T. (2018). Thin-film solar cells exceeding 22% solar cell efficiency: An overview on CdTe-, Cu(In,Ga)Se₂-, and perovskite-based materials. *Applied Physics Reviews*, 5(4). <https://doi.org/10.1063/1.5061809>
- Swinehart, D. F. (1962). The Beer-Lambert Law. *Journal of Chemical Education*, 39(7): 333. <https://doi.org/10.1021/ed039p333>

- The German Energy Society. (2013). *Planning and Installing Photovoltaic Systems. A guide for installers, architects and engineers* (2a ed.). Earthscan.
- van Dam, D., van Hoof, N. J. J., Cui, Y., van Veldhoven, P. J., Bakkers, E. P. A. M., Gómez Rivas, J., & Haverkort, J. E. M. (2016). High-Efficiency Nanowire Solar Cells with Omnidirectionally Enhanced Absorption Due to Self-Aligned Indium–Tin–Oxide Mie Scatterers. *ACS Nano*, *10*(12): 11414–11419.
<https://doi.org/10.1021/acsnano.6b06874>
- Wang, D., & Su, G. (2014). New strategy to promote conversion efficiency using high-index nanostructures in thin-film solar cells. *Scientific Reports*, *4*(1): 7165.
<https://doi.org/10.1038/srep07165>
- Wrigglesworth, E. G., & Johnston, J. H. (2021). Mie theory and the dichroic effect for spherical gold nanoparticles: an experimental approach. *Nanoscale Advances*, *3*(12): 3530–3536. <https://doi.org/10.1039/D1NA00148E>