

Simulación de la variación del espesor de la capa absorbente en células solares de SnS utilizando Matlab

Simulation of the absorber layer thickness variation in SnS solar cells using Matlab

Carlos Rondón Almeyda¹  Clara L. Rojas Rincón¹  Alexander Sepúlveda Sepúlveda²  Mónica A. Botero¹  María A. Mantilla¹ 

¹Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia

Resumen

El estudio de células solares de película delgada basadas en sulfuro de estaño está adquiriendo cada vez más relevancia debido a sus ventajas frente a tecnologías similares, como su bajo coste, toxicidad y el hecho de que sus elementos constitutivos son más abundantes en la corteza terrestre; Además, podrían fabricarse mediante técnicas de vacío como pulverización térmica, pulverización catódica, coevaporación o evaporación térmica. Por otro lado, las Simulaciones permiten modelar el comportamiento de las células solares para comprender los procesos y mejorar la eficiencia del dispositivo. Por lo tanto, en este trabajo, el proceso de simulación se lleva a cabo utilizando modelos matemáticos que representan el comportamiento físico de la célula solar formada por heterounión de varias películas delgadas con configuración ZnO/ZnS/SnS. Se evaluaron dos modelos de radiación, uno utilizando una ecuación teórica y el otro con datos de la radiación incidente. Hasta el día de hoy se han realizado diferentes simulaciones de células solares utilizando principalmente un Simulador de Capacitancia de Células Solares (SCAPS); sin embargo, esta investigación se desarrolló utilizando MATLAB debido a su rendimiento y eficiencia. El espesor óptimo de la capa absorbente se estableció a partir de los resultados obtenidos para voltaje de circuito abierto (Voc), densidad de corriente de cortocircuito (J_{sc}), factor de llenado y eficiencia de conversión (η).

Abstract

The study of thin-film solar cells based on tin sulphide is becoming increasingly relevant due to its advantages over similar technologies, such as its low cost, toxicity, and the fact that its constituent elements are more abundant in the earth's crust; besides, they could be made by high vacuum techniques like thermal spraying, sputtering, co-evaporation, or thermal evaporation. On the other hand, Simulations allow modelling of the behaviour of solar cells to understand the processes and improve the device's efficiency. Therefore, in this work, the simulation process is carried out using mathematical models that represent the physical behaviour of the solar cell made of heterojunction of several thin films with ZnO/ZnS/SnS configuration. Two radiation models were evaluated, one using a theoretical equation and the other with data from the incident radiation. Until today, different simulations of solar cells have been carried out mainly using a Solar Cell Capacitance Simulator (SCAPS); however, this research was developed using MATLAB due to its performance and efficiency. The optimal thickness of the absorbent layer was established from the results obtained for open circuit voltage (Voc), short circuit current density (J_{sc}), fill factor (FF) and conversion efficiency (η).

Keywords: thin-film, solar cells, SnS, efficiency, absorber thickness.

Palabras clave: película delgada, células solares, SnS, eficiencia, espesor del absorbente.

¿Cómo citar?

Rondón, C., Rojas, C.L., Sepúlveda, A., Botero, m.A., Mantilla, M.A. Simulación de la variación del espesor de la capa absorbente en células solares de SnS utilizando Matlab. Ingeniería y Competitividad, 2024, 26(3)e-20113982

<https://doi.org/10.25100/iyv.26i3.13982>

Recibido: 26-05-24

Aceptado: 12-08-24

Correspondencia:

mabotero@saber.uis.edu.co

Esta obra está bajo una licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License.

Conflicto de intereses: ninguno declarado



OPEN  ACCESS

¿Por qué se realizó?:

En este trabajo se realizó una simulación de una celda solar de película delgada con configuración ZnO/ZnS/SnS porque nuestro grupo de investigación está interesado en investigar teórica y experimentalmente esta tecnología. Nuestro interés es adentrarnos en las celdas solares de película delgada más eficientes en zonas tropicales porque esta tecnología está hecha de elementos menos tóxicos y costosos que los que se utilizan actualmente en tecnologías similares y es una tecnología que podría hacer tránsito a nivel comercial en Colombia, debido a los métodos de síntesis en los que se puede fabricar.

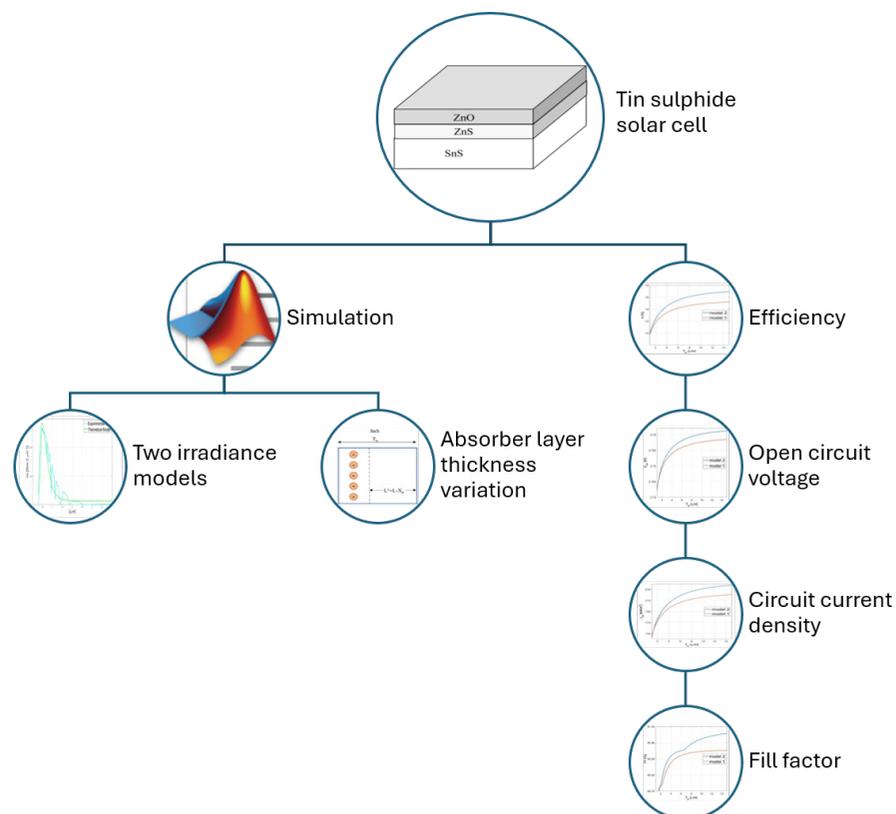
¿Cuáles fueron los resultados más relevantes?

Además, decidimos realizar la simulación en Matlab porque nos permite entender mejor los procesos de transporte eléctrico, podemos variar los parámetros de interés para determinar desde el punto de vista teórico cómo se comportaría la celda.

¿Qué aportan estos resultados?

Entre los parámetros más relevantes que tenemos, la eficiencia puede alcanzar valores superiores al 16% para espesores en el orden de los 10nm. En el proceso de síntesis se debe tener en cuenta que el factor de relleno presenta valores reducidos para espesores del orden de 2 y 6 nm, el ancho de la zona de carga espacial es importante porque el espesor de la capa buffer (ZnS) debe ser menor que este espesor para tener mejores eficiencias.

Graphical Abstract



Introducción

Las células solares son una tecnología de energía renovable que convierte directamente la energía solar en energía eléctrica. Las células son compuestas por diferentes materiales en forma de capas, y la unión entre el semiconductor de tipo p y el semiconductor de tipo n crea una Zona de Carga Espacial, que, al ser irradiada con luz solar, genera el efecto fotovoltaico. En las células solares de película delgada, la capa absorbente o el semiconductor de tipo p crea los portadores de carga, y la capa tampón es tanto un semiconductor de tipo n como un puente entre la capa absorbente y el óxido conductor transparente. Los investigadores están desarrollando diferentes materiales para cada capa para aumentar la eficiencia de las células solares (1) (2) (3).

El objetivo de fabricar células solares sin elementos tóxicos y abundantes en la corteza terrestre ha convertido al sulfuro de estaño (SnS) en un potencial candidato para ser utilizado como capa absorbente en dispositivos fotovoltaicos. Por otro lado, el SnS ha atraído la atención de los investigadores debido a que está compuesto por elementos de no toxicidad, bajo costo, abundancia de elementos y tiene una eficiencia teórica del 25%. (4,5) (6) Los absorbentes de SnS son películas inorgánicas semiconductoras con una conductividad intrínseca de tipo p, una banda prohibida directa de alrededor de 1,3 eV y un coeficiente de absorción superior a 10^4 cm^{-1} (7,8). Además, este tipo de película delgada se puede fabricar mediante diferentes técnicas de alto vacío como pulverización catódica, coevaporación, evaporación al vacío, evaporación térmica, sublimación espaciada estrecha, electrodeposición, proceso de deposición realizada, pirólisis por pulverización, etc. (9)

En la literatura, es posible encontrar algunos trabajos que simulan células solares de película delgada, como el que realizó una simulación numérica con la configuración del dispositivo FTO/WS₂/Cu₂Te/Cu₂O/Au utilizando el programa wxAMPS, L. Hafaifa et al. realizaron una simulación de una célula solar de película delgada de telurio de cadmio (CdTe) con diferente tampón mediante el simulador del dispositivo semiconductor Silvaco-Atlas. Hafaifa y muchos artículos utilizaron SCAPS-1D en la célula solar de película delgada. Con respecto a la simulación de la célula solar de película delgada SnS, la mayoría de los trabajos encontrados realizan la simulación utilizando SCAPS, y algunos trabajos hacen simulaciones por COMSOL Multiphysics. Sin embargo, no se ha explorado una investigación de las células solares de película delgada SnS que varían el grosor de la capa absorbente por medio de MATLAB. (10) (11) (12–15) (16–21) (22)

Esta investigación se llevó a cabo utilizando el software MATLAB y las propiedades ópticas y eléctricas de cada película que componen la estructura como datos de entrada. Este trabajo se centra en la simulación de células solares de película delgada con estructura de ZnO/ZnS/SnS a través de un script de MATLAB para obtener, analizar y comparar las salidas de los principales parámetros de operación como el voltaje de circuito abierto (V_{oc}), la densidad de corriente de cortocircuito (J_{sc}), el factor de llenado (FF) y la eficiencia de conversión (η). La simulación se lleva a cabo utilizando modelos matemáticos que representan el comportamiento físico de la célula solar. El script desarrollado en Matlab da mayor versatilidad en la investigación, ya que permite a los autores modificar los parámetros físicos de cada material, incluir información sobre nuevos datos, incluir datos de radiación de un sitio de estudio en particular, etcétera.

El desarrollo de esta investigación contribuye a seleccionar y comprender una estructura que permita obtener eficiencias para competir comercialmente con las células de silicio. Por otro lado, llevar a cabo el proceso de simulación reduce los costos operativos y experimentales. Por lo tanto, en el futuro, los recursos se pueden optimizar y priorizar en la síntesis de nuevos materiales.

Metodología

Modelos numéricos

En esta sección, se presentan dos modelos de irradiancia, y las ecuaciones matemáticas que representan el comportamiento de la estructura ZnO/ZnS/SnS se han utilizado para desarrollar la simulación para determinar los parámetros de salida en función del espesor de la capa absorbente. Además, también se muestran las características que representan cada película en la estructura. Esta investigación podrá determinar un espesor de capa absorbente que aumente la eficiencia de la estructura. A continuación (Figura 1), podemos ver las dimensiones de cada película que representa la estructura en estudio.

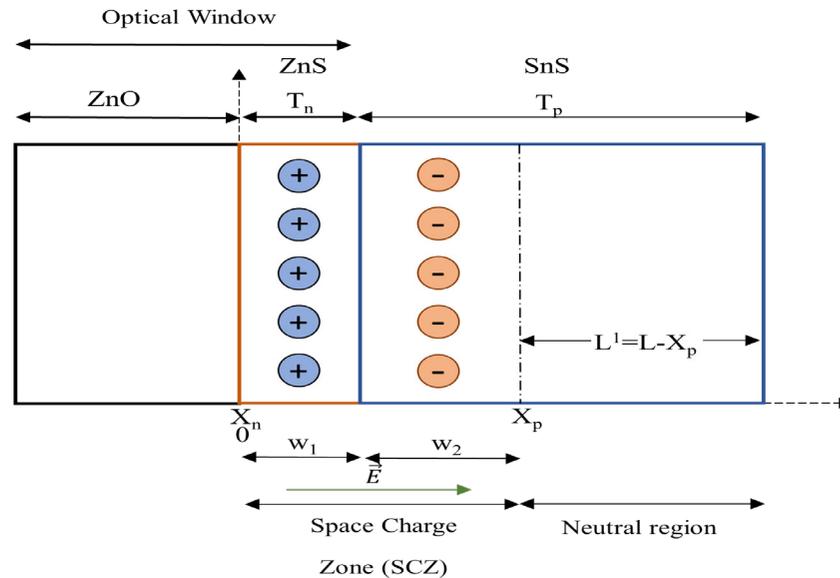


Figura 1. Dimensiones de la estructura de ZnO/ZnS/SnS

\$w_1\$ es la fracción de la zona de carga espacial (ZCC) en la capa tampón y \$w_2\$ es la fracción de la ZCC en la capa de absorción. \$T_n\$ representa el espesor de la capa tampón que para este análisis es igual a \$w_1\$, \$T_p\$ representa el espesor de la capa de absorción y \$L\$ es la suma de \$T_n\$ y \$T_p\$. \$X_n\$ es el espesor de la zona de carga neutra de la capa n que toma un valor de cero para este análisis, \$X_p\$ se define como \$X_p = w_1 + w_2\$, y \$L_1\$ es el espesor de la zona de carga neutra de la capa p.

Definición matemática de SCZ

Sobre la base de la figura y asumiendo que el punto de partida de los ejes de referencia desde el ZnS es un cero, se ha establecido a partir de la literatura [\(23,24\)](#) y \$w_2\$ como se muestra en las Ec. 1 y 2, respectivamente. \$V_d\$ es el potencial de difusión, \$\epsilon_1\$ es la permitividad de la capa tampón (ZnS) y \$\epsilon_2\$ es la permitividad de la capa absorbente (SnS).

$$w_1 = \left(\frac{2V_d}{e} * \left[\frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{\epsilon_1 N_d + \epsilon_2 N_a} \right] \right)^{\frac{1}{2}} * \left(\frac{N_d}{N_a} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

$$w_2 = \frac{N_d}{N_a} w_1 \quad (2)$$

Donde, V_d está determinado por el siguiente Ec. 3 [11].

$$V_d = \frac{E_{g2} + x_2 - x_1}{e} + U_t \ln \left(\frac{N_a N_d}{N_{c1} N_{v2}} \right) \quad (3)$$

Donde x_1 y x_2 son las afinidades electrónicas de las capas absorbente y tampón, respectivamente, U_t es el potencial termodinámico que toma un valor de 25,7 mV, N_a y N_d son las concentraciones de aceptores y donantes, respectivamente, N_{c1} es la densidad efectiva de la banda de conducción de los estados, N_{v2} es la densidad efectiva de la banda de valencia de los estados, y E_{g2} es la brecha SnS.

Modelos de irradiancia

Para llevar a cabo la investigación sobre el comportamiento de la estructura del ZnO/ZnS/SnS se aplicó tanto un modelo teórico como un modelo experimental para determinar la irradiancia del espectro solar a nivel del suelo en función de la longitud de onda. El modelo teórico se representa con Ec. 4. El modelo experimental se obtiene a partir de datos experimentales suministrados por la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA). En la figura 2 se pueden observar ambos modelos. (25)

$$I_{rs}(\lambda) = 0.06977 + 7.0625 \left(1 - e^{\frac{-(\lambda-0.26053)}{0.15994}} \right)^{2.28411} e^{\frac{-(\lambda-0.26053)}{0.15994}} \quad (4)$$

La irradiancia del espectro solar a nivel del suelo en función de la longitud de onda se da a continuación (Figura 2).

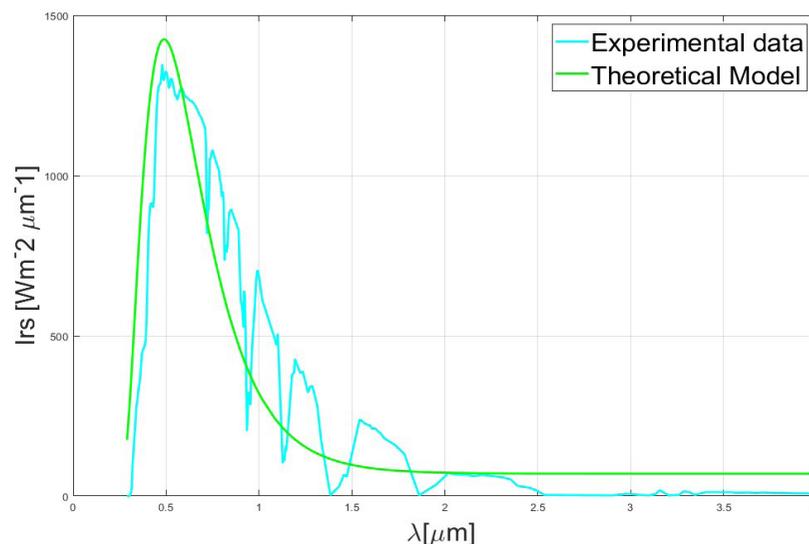


Figura 2. Irradiancia del espectro solar a nivel del suelo en función de la longitud de onda. Los datos experimentales se trazaron en cian y el modelo teórico se trazó en verde.

Densidad de corriente

La integral de la fotocorriente permite calcular la densidad de corriente (J_{ph}) para todo el rango del espectro solar. La ecuación (Ec. 6) para la fotocorriente viene dada por. (26)

$$J_{ph} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} J_{ph}(\lambda), \quad J_{ph}(\lambda) = J_p(\lambda) + J_{scz}(\lambda) + J_n(\lambda) \quad (6)$$

Donde la integral se evaluó por λ_1 y λ_2 con valores de 0.29 μm y 8 μm , respectivamente. $J_{ph}(\lambda)$ es la suma de la densidad de corriente debida al movimiento de los electrones en el semiconductor tipo p (Ec. 7), el movimiento de los agujeros en el semiconductor tipo n (Ec. 8) y la densidad de corriente en la zona de carga espacial (Ec. 9). Cada una de las densidades de corriente se ha obtenido mediante las siguientes ecuaciones. (27)

$$J_p(\lambda) = \left(q \frac{I_{rs}(\lambda)(1-R)\alpha_1 L_p}{hv(\alpha_1^2 L_p^2 - 1)} \right) \quad (7)$$

$$\left(\frac{\frac{S_p L_p}{D_p} + (e^{-\alpha_1 X_n}) \left(\frac{S_p L_p}{D_p} \cosh\left(\frac{X_n}{L_p}\right) + \sinh\left(\frac{X_n}{L_p}\right) \right)}{\frac{S_p L_p}{D_p} \sinh\left(\frac{X_n}{L_p}\right) + \cosh\left(\frac{X_n}{L_p}\right)} - \alpha_1 L_p (e^{-\alpha_1 X_n}) \right)$$

$$J_n(\lambda) = \left(q \frac{I_{rs}(\lambda)(1-R)\alpha_2 L_n}{hv(\alpha_2^2 L_n^2 - 1)} \right) (e^{-\alpha_1(X_n + w_1)} - \alpha_2 w_2) \quad (8)$$

$$\left(\alpha_2 L_n - \frac{\frac{S_n L_n}{D_n} \left(\cosh\left(\frac{L'}{L_n}\right) - e^{-\alpha_2 L'} \right) + \sinh\left(\frac{L'}{L_n}\right) + \alpha_2 L_n e^{-\alpha_2 L'}}{\frac{S_n L_n}{D_n} \sinh\left(\frac{L'}{L_n}\right) + \cosh\left(\frac{L'}{L_n}\right)} \right)$$

$$\left(\alpha_2 L_n - \frac{\frac{S_n L_n}{D_n} \left(\cosh\left(\frac{L'}{L_n}\right) - e^{-\alpha_2 L'} \right) + \sinh\left(\frac{L'}{L_n}\right) + \alpha_2 L_n e^{-\alpha_2 L'}}{\frac{S_n L_n}{D_n} \sinh\left(\frac{L'}{L_n}\right) + \cosh\left(\frac{L'}{L_n}\right)} \right)$$

$$J_{scz}(\lambda) = \left(q \frac{I_{rs}(\lambda)(1-R)e^{-\alpha_1 X_n} (1 - e^{-\alpha_1 w_1 - \alpha_2 w_2})}{hv} \right) \quad (9)$$

α_1 es el coeficiente de absorción de ZnS, α_2 es el coeficiente de absorción de SnS, R es su efectividad, D_n y D_p son los coeficientes de difusión de electrones y huecos, respectivamente, y L_n y L_p representan la longitud de difusión de electrones y huecos, respectivamente.

Absorción óptica de la ventana

En esta configuración de análisis, el ZnO y el ZnS de tipo n son la ventana óptica. El ZnS tiene una banda prohibida más amplia de 3,58 eV y es transparente en una longitud de onda de 350-550 nm (28) y el ZnO es un óxido conductor transparente. Luego, conocer la cantidad de energía absorbida y en qué longitud de onda ocurrió permite reconocer cuánta irradiación llega a la capa absorbente. En la figura 3, el flujo solar se representa en función de la longitud de onda. Se observa que solo una pequeña fracción del flujo solar

se absorbe cuando la longitud de onda toma valores aproximados de $0,3 \mu\text{m}$ a $0,38 \mu\text{m}$. Por lo tanto, se establece que el ZnO es casi transparente a la configuración.

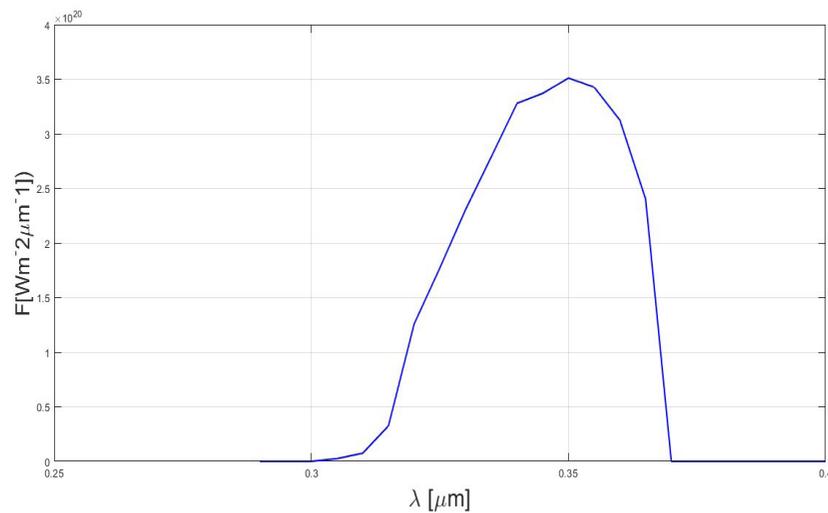


Figura 3. Flujo solar en ZnO en función de la longitud de onda.

Parámetros de simulación

Los parámetros utilizados para llevar a cabo la simulación se establecieron a partir de la investigación bibliográfica consultada. Los datos de constantes ópticas se obtuvieron aplicando transmitancia como datos experimentales y COPS II como datos virtuales.

Coefficiente de absorción

El coeficiente de absorción y la banda prohibida se calcularon a partir de los espectros de transmitancia de los SnS y ZnS y del software COPS II (producto licenciado). Los espectros de transmitancias se determinaron a partir de película delgada sintetizada por evaporación en el Laboratorio de la Universidad Industrial de Santander. COPS II fue desarrollado por la Universidad Industrial de Santander. El coeficiente de absorción de SnS y ZnS en función de la longitud de onda se muestra en la figura 4.

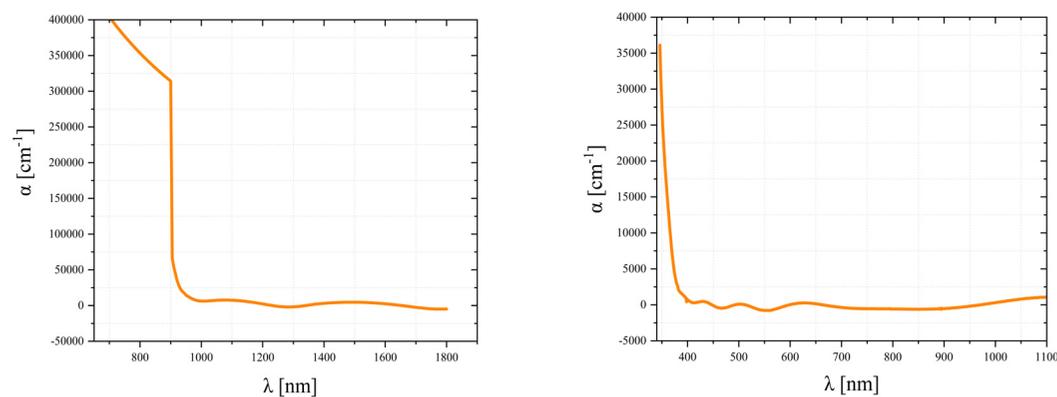


Figura 4. Coeficiente de absorción en función de la longitud de onda. a) SnS y b) ZnS

La banda prohibida determinada para la película delgada de SnS es de 1,37 eV, para la película delgada de ZnS es de 3,58 eV y para la película delgada de ZnO es de 3,37 eV.

Características de la estructura ZnO/ZnS/SnS

En este estudio se utiliza ZnO como óxido conductor transparente (TCO), SnS como película absorbente y ZnS como capa tampón, lo que resulta en la simulación de la estructura de ZnO/ZnS/SnS. Los parámetros que se utilizaron en la simulación se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros utilizados en la simulación de SnS y ZnS

Propiedades de la capa	Símbolo	Unidad	SnS	ZnS	
Concentración del aceptor	Na	M-3	1.8x10 ²²		(29)
Concentración de donantes	Nd	M-3		9x10 ²³	(30)
Permitividad relativa	ϵ		12.5	9	(31,32)
Densidad efectiva de estados	NC	M-3	7,5 x 10 ²⁴		(33)
Densidad efectiva de estados	NV	M-3	1.0 x10 ²⁵		(34)
Afinidad	χ	Ev	4.2	3.9	(35,36)
Velocidad de recombinación de los agujeros	Sp	M/s		10	(32)
Longitud de difusión del orificio	Elepé	m	2.27x10 ⁻⁶	2.48x10 ⁻⁶	(31,32)
Coeficiente de difusión de los agujeros	Dp	M ² s ⁻¹	1.03x10 ⁻⁵	1.03x10 ⁻⁴	(31,32)
Velocidad de recombinación de electrones	Sn	M/s	200		(37)
Coeficiente de difusión de electrones	Dn	M ² s ⁻¹	los 2.57x10 ⁻⁴	5.91x10 ⁻⁴	(31,32)
Longitud de difusión de electrones	En	m	1.13x10 ⁻⁵	3.44x10 ⁻⁶	(31,32)
Energía de banda prohibida	Eg	Ev	1.37	3.58	
Movilidad electrónica	Mn	m ² /V.s	1x10 ⁻²	0.023	(31,32)
Movilidad de los agujeros	μ_p	m ² /V.s	4x10 ⁻⁴	4x10 ⁻³	(31,32)

Desarrollo de simulaciones

El desarrollo del modelo se realizó a través del software MATLAB. Se utilizaron como datos de entrada los parámetros estructurales de cada película en la celda investigada y los modelos de irradiancia. A partir del código y los datos de entrada, se determinó el J_{ph} en función de la longitud de onda. Este valor se calculó para cada valor de espesor de la capa absorbente. Posteriormente, utilizando los valores de J_{ph} , se calcularon el voltaje de circuito abierto (V_{oc}), la densidad de corriente de cortocircuito (J_{sc}), el factor de llenado (FF) y la eficiencia de conversión (η). Con los resultados, se estableció el espesor óptimo

de la capa absorbente. En la figura 5 se muestra una representación esquemática del desarrollo de la simulación.



Figura 5. Representación esquemática del desarrollo de simulaciones.

Resultados y discusión

La estructura de la célula solar ZnO/ZnS/SnS se simuló con los parámetros presentados en la tabla 1. La simulación se llevó a cabo variando el espesor de la capa absorbente de 1 μm a 15 μm . En este estudio, se evaluó la densidad de corriente de cortocircuito, el voltaje de circuito abierto, el factor de llenado y la eficiencia de conversión. En esta investigación se consideró un modelo teórico de irradiancia (modelo 1) y un modelo experimental de irradiancia (modelo 2). En la figura 4 se presentan los resultados obtenidos, y es posible observar que tanto V_{oc} como J_{sc} muestran un aumento en las longitudes de onda entre 1 μm y 8 μm , además de que los trazados alcanzan valores más altos cuando el espesor es mayor a 8 μm aproximadamente. En este punto, los V_{oc} y J_{sc} para el modelo 1 son 0,757 V y 214 mA/m², respectivamente. Los V_{oc} y J_{sc} para el modelo 2 son 0,759 V y 228 mA/m², respectivamente. Se pudo establecer que el modelo 2 genera valores de eficiencia de conversión (η) superiores al modelo 1. Estos valores son aproximadamente un 1,4% más altos. Los valores de eficiencia de conversión para el modelo 1 y el modelo 2 fueron de 14,7% y 16,1%, respectivamente. Finalmente, el FF alcanzó un valor superior al 80,95% para el modelo 2. Esto se debe a que el modelo 2 toma valores reales, mientras que el modelo 1 es un modelo matemático (Figura 6).

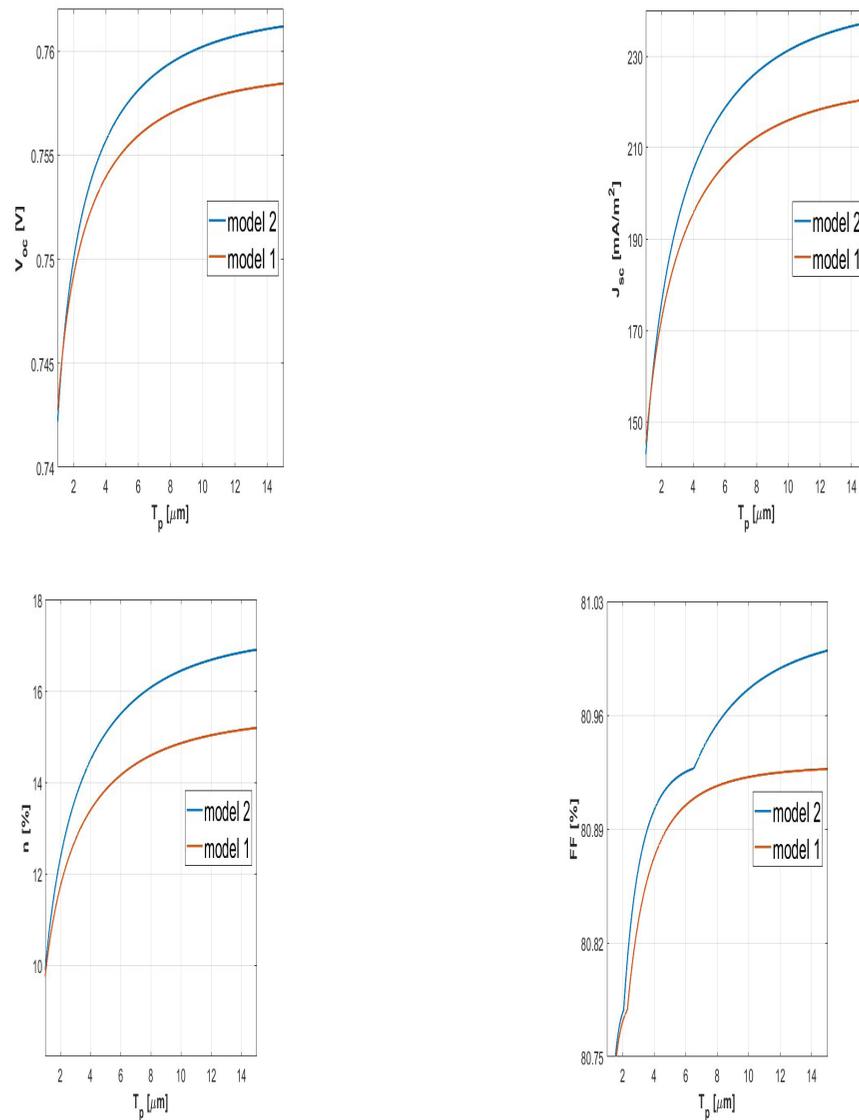


Figura 6. Voltaje de circuito abierto (V_{oc}), densidad de corriente de cortocircuito (J_{sc}), conversión eficiente (n) y factor de llenado (FF) en función del espesor de la capa absorbente.

Los valores de w_1 dentro de la capa ZnS y w_2 dentro de la capa SnS son 6,589 nm y 329,45 nm, respectivamente. Por lo tanto, el espesor de SCZ tiene un valor de 336,04 nm. Debido a los valores generados para la simulación, es posible determinar que valores de la capa de SnS mayores a 8 μm presentan alta eficiencia. A partir de ahí, es posible establecer que para espesores superiores a 8 μm la estructura podría absorber casi toda la energía de la radiación. Además, la estructura podría construirse con $X_n = 0$.

Conclusiones

En esta investigación se realizó una simulación de la estructura de una célula solar ZnO/ZnS/SnS teniendo un ZnS como capa amortiguadora y un SnS como capa absorbente. La simulación permitió estudiar la influencia a través de la variación del espesor del absorbente en los parámetros de la celda.

La simulación se llevó a cabo en Matlab mediante modelo matemático y modelo experimental de irradiancia. Permite determinar un ancho de la SCZ de 336.04 nm y debido a esto, es posible establecer que los J_{sc} crecen rápidamente cuando el espesor

de la capa absorbente es menor que w_2 . Además, los resultados indican que si el espesor del absorbedor es superior a $8 \mu\text{m}$, es posible absorber casi toda la energía de radiación. La eficiencia se logró con un espesor de $8 \mu\text{m}$ con el modelo 2 fue de 16.1% con un FF de 80.95%.

Además, la investigación da como resultado que la irradiancia afecta a los parámetros de la célula. Por lo tanto, las fechas experimentales produjeron mayores V_{oc} , J_{sc} , n y FF.

Reconocimiento

Agradecemos a la Universidad Industrial de Santander por el apoyo financiero brindado a través del proyecto 3719.

Referencias

1. Gurevich Y, Meléndez L. Fenómenos de contacto y sus aplicaciones en celdas solares. 1 Ed. México: Fondo de cultura Económica - FCE; 2010. 31–35.
2. Ullah H, Marí B. Análisis numérico de células solares policristalinas basadas en SnS. Microestructura de superretículos. Agosto de 2014; 72:148–55.
3. Gul M, Kotak Y, Muneer T. Revisión sobre la tendencia reciente de la tecnología solar fotovoltaica. Exploración y Explotación Energética. 19 de julio de 2016; 34(4):485–526.
4. Caballero R, Condé V, León M. Películas delgadas de SnS cultivadas por sulfuración de capas de Sn evaporadas: Efecto de la temperatura y presión de sulfuración. Películas sólidas delgadas. Agosto de 2016; 612:202–7.
5. Javed A, Khan N, Bashir S, Ahmad M, Bashir M. Propiedades estructurales, eléctricas y ópticas dependientes del espesor de películas delgadas cúbicas de SnS. Mater Chem Phys. Mayo de 2020;246:122831.
6. Oomae H, Eguchi T, Tanaka K, Yamane M, Ohtsu N. Difracción de rayos X y espectroscopía de fotoelectrones de rayos X, caracterización de películas delgadas de estaño sulfurado depositadas por evaporación térmica. Películas sólidas delgadas. Enero de 2018; 645:409–16.
7. Kutwade V V., Gattu KP, Sonawane ME, Tonpe DA, Mishra MK, Sharma R. Contribución en la mejora de PCE: diseño numérico y optimización de células solares de película delgada SnS. Revista de Investigación de Nanopartículas. 12 de julio de 2021; 23(7):146.
8. Sanguino P, Kunst M, Ben Mbarek M, Reghima M, Bundaleski N, Teodoro O, et al. Un método sin contacto para estudiar la cinética de los portadores en películas delgadas de SnS. Vacío. Marzo de 2023;209:111784.
9. Andrade-Arvizu JA, Courel-Piedrahita M, Vigil-Galán O. Células solares de película delgada basadas en SnS: perspectivas en los últimos 25 años. Revista de Ciencia de los Materiales: Materiales en Electrónica. 14 de julio de 2015; 26(7):4541–56.
10. Kuang H, Xiao Y. Simulación numérica de célula solar de película delgada basada en Cu₂Te con Cu₂O HTL para alta eficiencia. Micro y Nanoestructuras. Abril de 2024;188:207790.

11. Hafaifa L, Maache M, Allam Z, Zebeir A. Simulación y análisis de rendimiento de células solares de película delgada CdTe utilizando diferentes capas tampón basadas en calcogenuro de zinc sin Cd. Resultados en óptica. Febrero de 2024;14:100596.
12. Oublal E, Al-Hattab M, Ait Abdelkadir A, Sahal M, Kumar N. Eficacia fotovoltaica del CNGS como BSF y segundo absorbente para células solares de película delgada CIGS: enfoque numérico mediante el marco SCAPS-1D. Ciencia e Ingeniería de Materiales: B. 2024 Jul;305:117401.
13. Chouk R, Aguir C, Tala-Ighil R, Al-Hada NM, Al-Asbahi BA, Khalfaoui M. Simulación numérica y diseño óptimo de una célula solar de perovskita basada en una capa de transporte de electrones de óxido de zinc sensibilizada. Modelado, experimentación y diseño multiescala y multidisciplinar. 2 de marzo de 2024;
14. Shamardin A, Kurbatov D, Volobuev V. Análisis de células solares de película delgada $\text{Cu}_2\text{ZnSnXGe}_{1-x}\text{S}_4$ depositadas por pulverización: creación de modelos en SCAPS-1D y simulación numérica de su rendimiento. En: 2020 IEEE 10th International Conference Nanomaterials: Applications & Properties (NAP). Sumy, Ucrania: IEEE; 2020. p. 01TFC20-1-01TFC20-4.
15. Chargui T, Lmai F, AL-Hattab M, Bajjou O, Rahmani K. Estudio experimental y numérico de la célula solar de heterounión CIGS/CdS. Opt Mater (Amst). Junio de 2023;140:113849.
16. Garain R, Basak A, Singh UP. Estudio de la dependencia del espesor y la temperatura en el rendimiento de una célula solar basada en SnS mediante SCAPS-1D. Mater Hoy Proc. 2021; 39(5):1833–7.
17. Badyakar S, Das C. Simulaciones numéricas en células solares basadas en a-Si:H/SnS/ZnSe. Mater Hoy Proc. 2022; 62(8):5275–82.
18. Oublal E, Sahal M, Abdelkadir AA. Nuevo análisis teórico de una nueva célula solar SnS/CdS de heterounión con homounión P-P+ en el enfoque numérico de la cara posterior. Física Aplicada Actual. julio de 2022; 39:230–8.
19. Gohri S, Madan J, Pandey R. Impacto de la técnica de deposición de ángulo de refilón en el rendimiento de la célula solar de película delgada SnS: simulación SCAPS-1D. En: 2022 IEEE International Conference of Electron Devices Society Kolkata Chapter (EDKCON). IEEE; 2022. Págs. 195-8.
20. Bhattacharjee P, Garain R, Basak A, Singh UP. Modelado numérico y evaluación del rendimiento de una célula solar de heterounión basada en SnS con capa BSF de p+-SnS. Opta por el electrón cuántico. 22 de diciembre de 2022; 54(12):867.
21. Kumar A, Prabu RT, Das A. Análisis de configuración de células solares basadas en SnS para dispositivos de alta eficiencia. Opta por el electrón cuántico. 13 de agosto de 2022; 54(8):521.
22. Boubakri A, Joudri A, Koumya Y, Rajira A, Almaggoussi A, Abounadi A. Una simulación de las características de salida de las células solares basadas en SnS. Mater Hoy Proc. 2022; 51(6):2047–52.
23. Colinge J, Colinge C. Física de los dispositivos semiconductores. Kluwer Editorial Académica; 2006. 1–102.
24. Tamaño SM, LI Y, NG K. Física de los dispositivos semiconductores. 4 ed. A John Wiley e Hijos, Inc.; 2021. 1–83.
25. Benmir A, Aida MS. Modelado analítico y simulación de células solares CIGS.

- Procedia Energética. 2013; 36:618–27.
26. Acevedo-Luna A, Bernal-Correa R, Montes-Monsalve J, Morales-Acevedo A. Diseño de células solares de película delgada basadas en un modelo analítico simple unificado. *Revista de Investigación Aplicada y Tecnología*. Dic 2017; 15(6):599–608.
 27. Botero MA, Mantilla MA, Calderón CL. Simulación del efecto del espesor de la capa absorbente en el rendimiento de las células solares CuInSe₂. En: 46^a Conferencia de Especialistas Fotovoltaicos (PVSC) de IEEE 2019. Chicago, Illinois, Estados Unidos: IEEE; 2019. Págs. 0915-9.
 28. Arsad AZ, Bahrudin MS, Arzaee NA, Rahman MNA, Chau CF, Abdullah SF, et al. Películas delgadas de sulfuro de zinc depositadas por baño químico: Consideración de ajuste de las propiedades estructurales, ópticas y eléctricas de la banda prohibida para la aplicación de células solares CIGS. *Ceram Int*. 2024 Abr; 50(7):11776–86.
 29. Ahmed MJ, Saleh AN. Influencia de los defectos a granel en la capa absorbente de SnS en las propiedades ópticas y eléctricas de la célula solar. *J Phys Conf Ser*. 1 de diciembre de 2021; 2114(1):012044.
 30. Cherouana A, Labbani R. Estudio de células solares CZTS y CZTSSe para la selección de capas tampón. *Appl Surf Sci*. 2017 Dic; 424:251–5.
 31. Cheraghizade M, Jamali-Sheini F, Shabani P. Temperatura de recocido del SnS nanoestructurado en el papel de la capa absorbente. *Proceso Mater Sci Semicond*. febrero de 2019; 90:120–8.
 32. Vallisree S, Thangavel R, Lenka TR. Investigaciones teóricas sobre la mejora de la eficiencia fotovoltaica de un dispositivo de célula solar nanoestructurado basado en CZTS/ZnS/ZnO. *Revista de Ciencia de los Materiales: Materiales en Electrónica*. 9 de mayo de 2018; 29(9):7262–72.
 33. Minbashi M, Ghobadi A, Ehsani MH, Rezagholipour Dizaji H, Memarian N. Simulación de células solares basadas en SnS de alta eficiencia con SCAPS. *Energía solar*. Dic 2018; 176:520–5.
 34. Jafarzadeh F, Aghili H, Nikbakht H, Javadpour S. Diseño y optimización de células solares en tándem SnS de perovskita/homojunción de alta eficiencia utilizando SCAPS-1D. *Energía solar*. Abril de 2022; 236:195–205.
 35. Ahmmed S, Aktar A, Hossain J, Ismail ABMd. Mejora del voltaje de circuito abierto de la célula solar de heterounión basada en SnS utilizando NiO HTL. *Energía solar*. septiembre de 2020; 207:693–702.
 36. Echendu OK, Weerasinghe AR, Diso DG, Fauzi F, Dharmadasa IM. Caracterización de capas delgadas de ZnS de tipo n y tipo p cultivadas por un método electroquímico. *J Matriz de electrones*. 24 de abril de 2013; 42(4):692–700.
 37. Lin S, Li X, Pan H, Chen H, Li X, Li Y, et al. Análisis numérico de célula solar de homojunción SnS. *Microestructura de superretículos*. marzo de 2016; 91:375–82.