

Películas delgadas semiconductoras a base de TiO₂ para celdas solares.

Semiconductor thin films based on TiO₂ for solar cells.

M.G. Cruz-Guerrero¹, M. T. Romero-De La Cruz^{1*}, A. Martínez-Luevanos².

¹ Facultad de Ciencias Físico Matemáticas, Universidad Autónoma de Coahuila, Unidad Camporredondo, Edit. A, C.P.25000, Saltillo, Coahuila, México.

² Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Coahuila, Blvd. V. Carranza y José Cárdenas 935, Colonia República, C.P.25280, Saltillo, Coahuila, México.

*Correo electrónico de autor para correspondencia M. T. Romero-De La Cruz:

teresa.romero.cruz@uadec.edu.mx

Resumen: El óxido de titanio (TiO_2) se ha convertido en uno de los semiconductores más estudiados, ya que es de los materiales con mayor estabilidad física-química. Este material presenta propiedades ópticas y eléctricas únicas que permiten su uso en sectores tecnológicamente avanzados, como en la generación de hidrógeno, en aplicaciones electrónicas, en el campo de la biomedicina, en la terapia fotodinámica, en el sector de la construcción y adicionalmente abre la posibilidad de adentrarse en el campo de la energía fotovoltaica, la cual permite convertir la luz solar en electricidad, en forma de película para la fabricación de celdas solares. La buena combinación de las propiedades estructurales y superficiales de las películas delgadas del TiO_2 permite que cada vez tome mayor importancia como material con propiedades específicas para disminuir el uso de combustibles fósiles y obtener energías alternativas que sean limpias y accesibles.

Palabras clave: Óxido de titanio, películas delgadas, propiedades fotovoltaicas, celdas solares.

Abstract: Titanium oxide (TiO_2) has become one of the most studied semiconductors, as it is one of the materials with the highest physical-chemical stability. In addition to its optical and electrical properties, these unique properties of TiO_2 allow its use in technologically advanced sectors, such as hydrogen generation, electronic applications, biomedicine, photodynamic therapy, in the construction sector and mainly opening the possibility of entering the field of photovoltaic energy, which allows converting sunlight into electricity, in the form of a film for the

manufacture of solar cells. The good combination of structural and surface properties of TiO_2 thin films allow it to become increasingly important as a material with specific properties to reduce the use of fossil fuels and obtain alternative energies that are clean and accessible.

Keywords: Titanium oxide, thin films, photovoltaic properties, solar cells.

Introducción

Actualmente, existe una problemática ambiental debido al uso de combustibles fósiles para satisfacer las necesidades relacionadas con el consumo energético. Una manera de combatir los efectos adversos de la demanda energética es el desarrollo de nuevas tecnologías como el uso de celdas solares para la obtención de energía limpia. Actualmente, es un desarrollo innovador que se sigue estudiando para poder mejorar la técnica utilizada en su fabricación, buscando ser más eficiente y económico.

El dióxido de titanio (TiO_2) es un material que cada vez se le investiga más debido a sus múltiples aplicaciones, ya que, de acuerdo con el reporte de la literatura, es un compuesto con propiedades únicas, que lo convierten en un material apto para el área de la electrónica y óptica.

Con el propósito de incorporar al TiO_2 en una gran variedad de dispositivos electrónicos, este material ha sido sintetizado por diversas técnicas, en forma de

película delgada, que presenta características de semiconductores. Todo esto con propósito en ser utilizado en la fabricación de celdas solares.

El objetivo principal de este trabajo es dar a conocer un panorama general acerca de la fabricación de celdas solares, incorporando al TiO_2 como foto-ánodo en forma de película delgada, para mejorar su eficiencia y calidad.

Desarrollo de celdas solares

Las características eléctricas de una celda solar, como son la resistencia, la corriente y el voltaje, se pueden alterar cuando el dispositivo se expone a la luz. Para el proceso fotovoltaico se puede utilizar la luz artificial o solar, las fotoceldas se utilizan para medir la intensidad de la luz y detectar los cambios en la radiación electromagnética como detector de fotones. Es importante tomar en cuenta los principales requisitos para el desarrollo de celdas solares, los cuales son la correcta absorción de luz, separación de portadores de carga y por último la extracción de los portadores separados (Ezema y col., 2021).

El desarrollo de la tecnología fotovoltaica se ha clasificado principalmente en tres generaciones de celdas solares.

Primera generación: la celda solar fue introducida en la década de 1950, se basa en obleas de silicio (Si), esta tecnología presentó ventajas como un alto rendimiento, excelente estabilidad y un tiempo de vida útil mayor de 25 años aproximadamente. Sin embargo, el inconveniente principal es el uso de láminas de SiO_2 con un alto

grado de pureza que requieren temperaturas mayores a los 1000 °C e instalaciones al vacío, implicando costos de fabricación muy altos (Ramírez-Como y col., 2021; Alonso y col., 2017).

Segunda generación: Estas celdas lograron reducir su costo al utilizar materiales en forma de película delgada, incluyendo el silicio amorfo (a-Si), cobre, indio, galio, selenio (CIGS) y telurio de cadmio (CdTe). Estas celdas pueden caracterizarse por presentar bajos costos, y flexibles, de bajo peso (Carlson y col., 1998; Shin y col., 2019).

Tercera generación: La necesidad por encontrar materiales o compuestos que presenten mejores coeficientes de absorción y transporte de carga para incrementar la conversión, provoca el surgimiento de la tercera generación enfocada en dispositivos fotovoltaicos de alta eficiencia, a un costo de producción más bajo y con tiempos menores a 2 años para poder recuperar la energía utilizada en su fabricación y funcionamiento, entre ellas se encuentran las celdas solares de perovskita (Esparza y col., 2020), sensibilizadas por colorante (Camarillo y col., 2020), de puntos cuánticos y orgánicas (Ramírez-Como y col., 2021; Acevedo, 2022).

Energía fotovoltaica y la incorporación del TiO_2

Con el paso del tiempo, el avance de la tecnología ha aumentado y sigue incrementándose la demanda de equipos ópticos y optoelectrónicos en áreas tan diversas como la exploración espacial, la generación de energía, la electrónica de

consumo y la protección del medio ambiente, lo que ha llevado a la búsqueda de nuevas alternativas para maximizar la eficiencia fotovoltaica en busca de la recolección de luz solar, ya que la energía solar es una fuente ideal de energía renovable al ser limpia, segura e ilimitada (Sarkin y col., 2020).

Se puede describir como efecto fotovoltaico, cuando los fotones cargados de energía de los rayos del sol interactúan con la materia, luego los electrones son liberados y estos electrones libres fluyen del polo negativo al positivo cargados en un circuito eléctrico (Sarkin y col., 2020).

Para que este sistema fotovoltaico capte la energía solar y la transforme en energía eléctrica, es necesario contar con un generador, el cual capta y convertirá la radiación solar en corriente eléctrica. Otros componentes en este sistema son: Una batería encargada de almacenar la energía eléctrica producida, un regulador de carga, el cual protege y garantiza el correcto mantenimiento de la carga de la batería, por último, un inversor de energía eléctrica, el cual tiene como objeto la transformación de la corriente continua producida por el panel solar a la corriente alterna (Colegio Oficial Ingenieros de Telecomunicación, 2007).

En el 2017 se rompió un récord en la aplicación global de energías renovables, destacando dentro de las principales la energía fotovoltaica, la cual consta en el empleo de celdas solares para la generación de energía limpia (Zhang y col., 2018). Cada vez se vuelve más importante la producción de dispositivos electrónicos que puedan disminuir el consumo de recursos naturales no renovables, como los

combustibles fósiles, por esta razón, resalta la implementación de celdas solares para producir energía eléctrica. Las celdas solares son dispositivos electrónicos que convierten la luz solar en electricidad para ser almacenada y utilizada en un circuito electrónico. Por tal motivo, los materiales semiconductores que puedan incorporarse en la fabricación de estos dispositivos, como el dióxido de titanio, son de gran importancia. (Loeza y col., 2021; Sawicka y col., 2020).

A continuación, se presenta una descripción general acerca del desarrollo de películas delgadas a base de TiO_2 , además de mostrar cómo es posible la incorporación de estas películas en celdas solares y una comparativa con otros óxidos semiconductores.

Semiconductores

Un semiconductor es un material que puede conducir la electricidad bajo ciertas condiciones para poder controlar el flujo de corriente eléctrica (P. Yu & Cardona, 2010). Por otra parte, los materiales conductores de electricidad contienen una alta densidad de portadores de carga, al contrario, los materiales aislantes presentan una actividad portadora de carga casi extinta, mientras que los materiales semiconductores cuentan con una densidad de portadores de carga intermedia entre conductores y aislantes, por lo cual son muy destacados tecnológicamente, ya que presentan un comportamiento característico dependiendo de la fuente de excitación presentada (Álvarez y Erazo, 2021).

Los óxidos semiconductores presentan grandes ventajas para aplicaciones en dispositivos electrónicos, como lo son: la síntesis a través de métodos de bajo costo, tienen propiedades de transparencia, lo cual indica que dejan pasar muy fácilmente la luz. Cabe destacar que estos óxidos pueden ser fabricados a bajas temperaturas, incluso sobre sustratos flexibles, además de ser muy amigables con el medio ambiente (Quiroz & Dussàn, 2019).

Los materiales semiconductores más utilizados en celdas solares son: silicio (Si), germanio (Ge), arseniuro de galio (GaAs), fosfuro de indio (InP), telurio de cadmio (CdTe), seleniuro de galio cobre-indio (CIGS), óxido de zinc (ZnO), dióxido de titanio (TiO_2), entre otros (Zhang y col., 2018).

Se han varias investigaciones en los que se ha propuesto el uso de películas delgadas de TiO_2 en celdas solares para lograr la alteración del semiconductor de banda prohibida ancha, para mejorar el rendimiento de absorción de luz visible (Ezema y col., 2021).

Los semiconductores se pueden clasificar como intrínsecos y extrínsecos según su grado de impurezas presentes. Los extrínsecos se clasifican en tipo P y tipo N según el tipo de elementos dopantes que contengan. Por otra parte, los semiconductores intrínsecos son materiales que han sido refinados para poder reducir las impurezas, tan puro como se pueda obtener (P. Yu & Cardona, 2010).

Los semiconductores, en estado puro y a bajas temperaturas, presentan una muy baja conductividad. Al contrario de los metales, los semiconductores cuentan con un coeficiente negativo de temperatura, lo cual significa que a medida que aumenta la temperatura, también aumentara la conductividad en el semiconductor (Zhang y col., 2018).

Generalidades del Óxido de titanio (TiO_2)

Se ha reportado que sobre el titanio metálico se forma una película pasiva de manera espontánea sobre su superficie, compuesta de TiO_2 (Filippin y col., 2017). La película formada es un óxido de carácter iónico, por lo que está formado por iones Ti^{4+} y O^{2-} . Hoy en día este óxido es ampliamente utilizado debido a que es de los semiconductores con mayor estabilidad fisicoquímica, además de que presenta buenas propiedades ópticas y eléctricas, las cuales dependen de diversos factores como el método y las condiciones utilizadas durante su síntesis (Zhang y col., 2018). El TiO_2 es característico por no presentar toxicidad, acompañada de un bajo costo de fabricación, lo hacen destacar como un material innovador con un gran futuro en múltiples áreas (Sanjay y col., 2018; Zhang y col., 2018).

El TiO_2 es un material que ha sido explotado desde principio del siglo XX, últimamente ha tomado un increíble auge debido a que es considerado como un material con valor a nivel científico (Colegio Oficial Ingenieros de Telecomunicación, 2007).

La importancia de este material se debe a su peculiaridad en cuanto a sus propiedades estructurales, fisicoquímicas y electrónicas intrínsecas (Parrino y Palmisano, 2020).

El TiO_2 es considerado un material cerámico que puede presentar polimorfismo, esto quiere decir que existe en tres fases Anatasa, Rutilo y Brookita (Figura 1) con la misma composición química, de las cuales la considerable como más estable químicamente hablando es el rutilo, sin embargo, se ha comprobado que existe en al menos once formas cristalinas (Parrino y Palmisano, 2020).

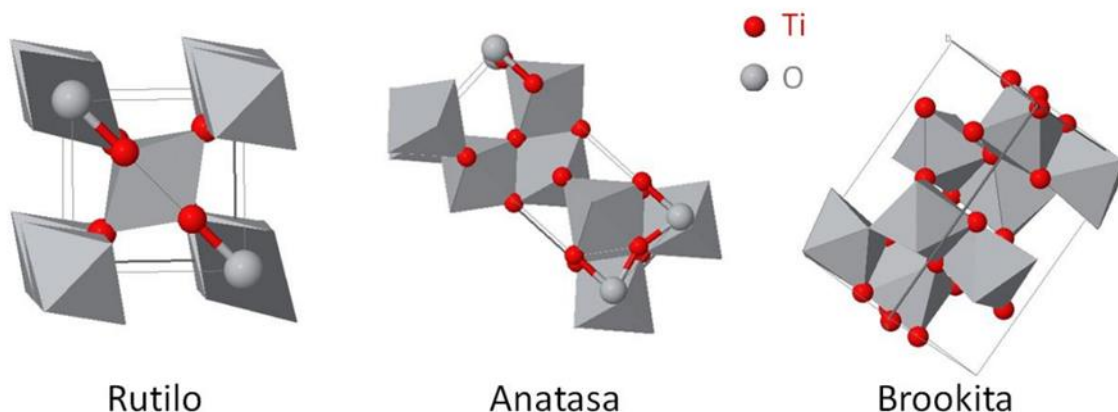


Figura 1. Principales modificaciones polimórficas del TiO_2 . (Zhang et al., 2018).

El dióxido de titanio es un semiconductor con una brecha prohibida que oscila entre 3.0 y 3.2 eV y que corresponde a una longitud de onda de 387 nm, lo que lo convierte en un material fotosensible en el rango cercano al UV del espectro electromagnético; es un material traslúcido y presenta un color blanco muy característico (Zhang y col., 2018; Quiroz & Dussàn, 2019).

Algunas de las propiedades físicas de este material dependen de la fase cristalina, de la morfología y de las relaciones superficie-volumen, lo cual origina propiedades fisicoquímicas muy variadas para sus diversas aplicaciones (Parrino y Palmisano, 2020). En la Tabla 1 se presentan las tres estructuras cristalinas del TiO_2 , su banda de energía prohibida, índice de refracción, densidad y sus parámetros de red.

Tabla 1. Propiedades físicas del óxido de titanio (TiO_2) (Pérez, 2014).

Estructura cristalina	Sistema cristalino	Ancho de banda (eV)	Índice de refracción (n)	Constante de red (nm)			Densidad kg/cm^3
				a	b	c	
Anastasa	Tetragonal	3.2	2.5	0.373 3	-----	0.937	3830
Rutilo	Tetragonal	3.0	2.9	0.458 4	-----	0.295 3	4240
Brookita	ortorrómbica	3.1	2.8	0.543 6	0.916 6	0.513 5	4170

Se ha observado que a presión y temperatura ambiente, la fase rutilo es más estable; sin embargo, los métodos de hidrólisis y otras síntesis de química húmeda producen anatasa, estos experimentos hallados muestran la existencia de una región de estabilidad dependiente del tamaño de fases del TiO_2 , además se ha observado transiciones de fase de anatasa a brookita y viceversa antes de la transformación final a rutilo, lo cual sugiere energías cercanas y en especial que las entalpías superficiales de las tres fases principales están fuertemente afectadas por

las variables experimentales y el tamaño de las partículas (Parrino y Palmisano, 2020).

Los defectos del TiO_2 toman un importante papel en casi todas sus aplicaciones, ya que frecuentemente definen sus propiedades fisicoquímicas. El dióxido de titanio puede oxidarse o reducirse dentro de una sola fase, lo que conduce a la formación o eliminación de defectos puntuales que son termodinámicamente reversibles. Los defectos puntuales son considerados imperfecciones de tamaño atómico, la química de este defecto se puede utilizar como marco en la ingeniería de nuevos materiales basados en TiO_2 con propiedades controladas que se desean para aplicaciones específicas. Los defectos puntuales se pueden clasificar como vacancias de oxígeno, estos defectos se forman cuando se reduce el dióxido y son compensadas por la presencia de Ti^{3+} debido a los electrones libres generados durante su formación, estas vacancias son las responsables de su carácter del tipo n. Otro tipo de defecto son las vacancias de titanio las cuales se desarrollan cuando se oxida el TiO_2 (Hümmelgen, 2012).

Los cristales de este óxido tienen una alta resistividad, las vacancias de oxígeno, al igual que la presencia de intersticios de titanio y las superficies cristalinas reducidas que presentan, mejoras considerables en la conductividad eléctrica del TiO_2 , actualmente estudios reportan que se ha propuesto que las vacancias de titanio pueden ser responsables de la conductividad de tipo p, la sustitución de oxígeno

por vapor de agua da lugar a una mejora muy característica en la conductividad eléctrica de las películas de TiO_2 (Parrino y Palmisano, 2020).

Dependiendo de su composición química, este óxido puede presentar diversos valores de conductividad eléctrica, se puede decir que su estructura es deficiente en oxígenos, lo cual conduce a que sus estados electrónicos estén localizados cerca de la banda de conducción, dándole su estado característico de semiconductor (Pérez, 2014).

El TiO_2 es comúnmente utilizado en celdas solares como un material transportador de electrones, funciona como una especie de puente que permite el acople electrónico-estructural entre la capa activa de la celda y uno de sus electrodos, de esta manera mejora el flujo de electrones que se produce durante el efecto fotovoltaico de manera que puedan ser recolectados fácilmente, generando energía eléctrica (Loeza y col., 2021).

Tomando en cuenta todas las propiedades mencionadas, el TiO_2 es hoy utilizado en una amplia gama de aplicaciones en áreas como: biología, fotocátalisis y optoelectrónica; teniendo lugar en dispositivos como transistores de películas delgadas, sensores de gas, dispositivos electrocrómicos y celdas solares (Zhang y col., 2018).

Síntesis de dióxido de titanio (TiO_2)

La síntesis de materiales tales como los óxidos metálicos son un área de la ciencia que progresa de manera exponencial. Actualmente, se realiza un gran número de esfuerzos por sintetizar TiO_2 por diferentes métodos para afinar sus propiedades fisicoquímicas y ampliar su uso en la tecnología moderna.

Entre los métodos de obtención más utilizados para la síntesis de TiO_2 se encuentra el método sol-gel, este término se utiliza para describir la síntesis de una red polimérica inorgánica de óxidos metálicos por medio de las reacciones químicas de hidrólisis consiste en implementar precursores que evolucionan hasta formar un sistema parecido a un gel de dos fases (Abdul y col., 2022). Cuenta con cuatro etapas características: hidrólisis, policondensación, secado y descomposición térmica (Pereyra e Israel 2018). La polimerización completa y la pérdida de solvente conducen a la transición del sol líquido al gel sólido. Con este método se pueden realizar películas delgadas sobre una pieza del sustrato, la formación del gel húmedo se forma cuando el sol se vierte en un molde, después se convierte en una cerámica, con el subsiguiente secado y posterior tratamiento térmico (Mironyuk y col., 2020).

Obtención de películas de TiO_2

La implementación de nuevos materiales en forma de recubrimientos o películas delgadas es cada vez más importante en la ciencia de los materiales. La aplicación para la cual se fabrique el material determinará su tamaño y morfología, produciendo fibras, cables, láminas, polvos o en su defecto películas delgadas,

entre otros tipos de materia. Las películas delgadas se fabrican a través de la condensación átomo por átomo sobre la superficie de un sustrato de manera controlada, se consideran películas delgadas aquellos materiales que cuentan con espesores desde algunos nanómetros ($10^{-9}m$) hasta varias micras ($10^{-6}m$) (Quiroz & Dussàn, 2019).

Es importante mencionar que una película delgada es un material de bajas dimensiones, lo cual significa que el material presenta propiedades exclusivas, a diferencia de las presentadas cuando el compuesto se encuentra en bulto. Existen múltiples técnicas de depósito que involucran procesos químicos, físicos o una combinación de ambas, con variables que pueden influir en la estructura y efectividad de las películas obtenidas. A continuación, se muestran algunas técnicas de depósito para desarrollar películas delgadas (Figura 2) (Quiroz & Dussàn, 2019).

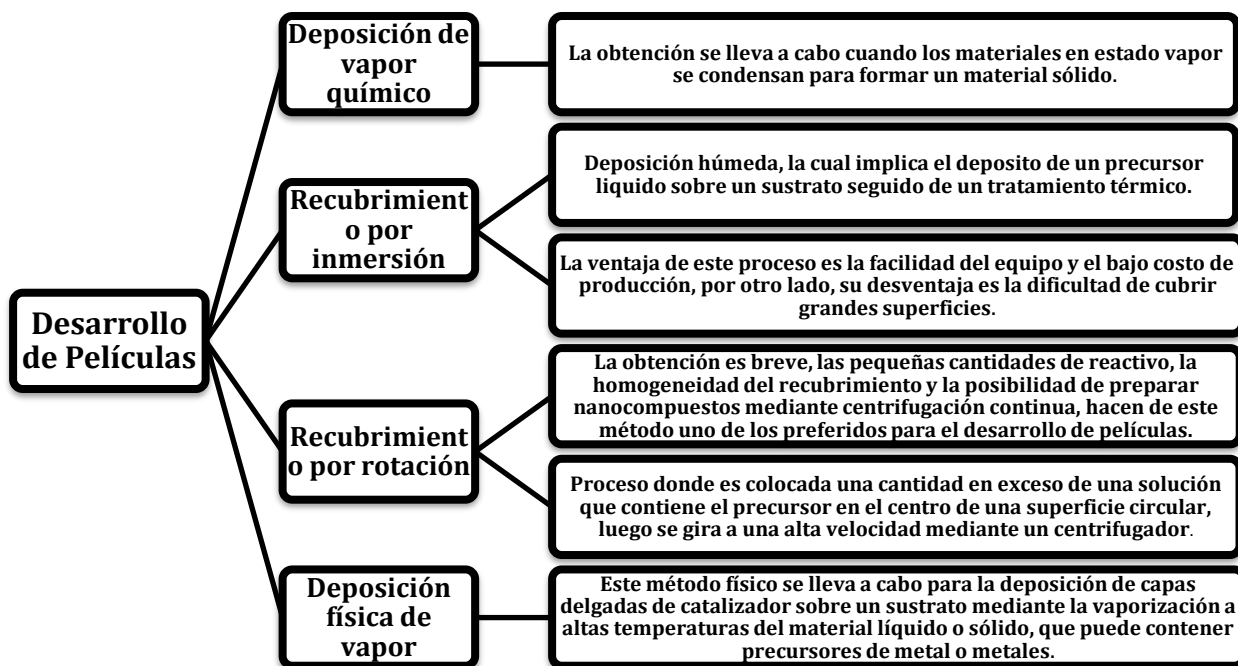


Figura 2. Esquema de relación de preparación de películas de TiO_2 (Elaboración propia).

Es muy importante conocer las diversas técnicas de caracterización utilizadas para determinar las condiciones de las películas obtenidas y poder determinar si el material es factible como transportador de energía. A continuación, se resumen las técnicas más utilizadas en la caracterización de las películas sintetizadas (Tabla 2).

Tabla 2. Técnicas de caracterización utilizadas en la síntesis del TiO_2 (Elaboración propia).

Técnicas de caracterización de películas.	Características de la técnica.
Difracción de rayos X.	Se determina el porcentaje de cristalinidad, relación de fase cristalina, los parámetros de red, de facetas y su distribución, además del tamaño de las partículas primarias.
Microscopia electrónica de barrido.	Se obtiene características morfológicas y composicionales, además de la determinación de las propiedades de los materiales a base de TiO_2 con alta resolución.
Microscopia electrónica de transmisión.	Permite obtener una resolución mayor que la microscopia óptica.
Método Brunauer-Emmet-Teller (BET).	Permite determinar el volumen de la monocapa y el parámetro del modelo.
Espectroscopia de reflectancia difusa.	Estudio de las propiedades ópticas.
Espectroscopia de fotoluminiscencia.	Obtención de las propiedades electrónicas e información sobre la estructura del material, mediante el espectro resultante.
Espectroscopia de fotoelectrones de rayos X.	Estudio cualitativo y cuantitativo de la composición y el estado electrónico de los elementos que componen varios tipos de materiales.
Análisis termogravimétrico.	Ilustración de las transmisiones de fase.

Aspecto económico.

Las pinturas y los pigmentos son el principal campo de aplicación del TiO_2 , resultados recientes en 2018 por Parrino y colaboradores, proyectaron valores en el mercado del TiO_2 en 15,760 millones de dólares y estimaron una tasa de crecimiento anual de un 8% aproximadamente para el 2025. El mercado más grande es Asia, siendo China el país dominante. Los países de América del Norte

representaron el 16% del volumen del mercado en 2018. El apogeo del mercado fotovoltaico en América Central y América del Sur impulsará la demanda de TiO_2 que se utiliza para la fabricación de módulos fotovoltaicos. Europa se aproxima a un crecimiento económico en el mercado del dióxido de titanio debido a la inversión por parte de Alemania, Italia y Francia en busca de vehículos más ligeros (Parrino y Palmisano, 2020).

Competencias en el mercado.

Los óxidos de metales inorgánicos que van desde ZnO , TiO_2 , Al_2O_3 , NiO , CuI , MoO_3 , CuSCN , CuO , Vox , Cu_2O , entre otros más han sido utilizados como andamios de soporte de perovskita, celdas fotovoltaicas, las cuales emplean semiconductores del tipo p. Hasta ahora han demostrado características excelentes y convincentes, con gran estabilidad química y movilidad elevada, además de ser altamente transparentes en el rango visible. Las ventajas de usar materiales inorgánicos son tan grandes que han reemplazado a los materiales inorgánicos convencionales en muchas aplicaciones que demandan celdas solares, áreas de alta resistencia mecánica, catálisis, almacenamiento de hidrógeno en baterías, celdas de combustible, biosensores y muchos otros más (Ezema y col., 2021).

Conclusión: Tomando en cuenta lo anterior se puede concluir que el TiO_2 es un semiconductor con amplias aplicaciones que tiene un gran futuro en el área fotovoltaica debido a que cuenta con múltiples propiedades, como lo es la estabilidad química, resistencia a la corrosión, no presenta toxicidad, es abundante

y tiene un bajo costo. El TiO_2 es un material innovador en el desarrollo y fabricación de celdas solares a partir de su síntesis, esto nos proporciona una alternativa de energía limpia, impactando directamente de manera favorable en combatir la problemática ambiental a nivel mundial.

Agradecimientos:

Se agradece a la Universidad Autónoma de Coahuila, a la Facultad de Ciencias Químicas, a la Maestría en Ciencia y Tecnología de Materiales, y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo de la beca con número 826192.

Referencias:

- Abdul Razak, K., Che Halin, D. S., Abdullah, M. M. A., Mohd Salleh, M. A. A., Mahmed, N., Azani, A., & Chobpattana, V. (2022). Factors of controlling the formation of titanium dioxide (TiO₂) synthesized using sol-gel method – A short review. *Journal of physics. Conference series*, 2169(1): 012018. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2169/1/012018>
- Alonso, J., Reynoso, E., Trujillo-Navarrete, B., & Cazarez-Castro, N. R. (2017). Fabricación automatizada de películas delgadas compactas en el desarrollo de celdas solares tipo Grätzel, en *Revista Tecnología e Innovación*. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/329831096_Fabricacion_automatizada_de_peliculas_delgadas_compactas_en_el_desarrollo_de_celdas_solares_tipo_Gratzel#fullTextFileContent. Fecha de consulta: 11 de enero del 2024.
- Álvarez-Constante, D. M., & Rosero-Erazo, C. R. (2021). Potencial bactericida de nanopartículas de óxido de bismuto y dióxido de titanio, en *Revista Dominio de las Ciencias*, 7(3): 822-836. <https://doi.org/10.23857/dc.v7i3.2026>

Álvarez, P. J. (2017). Películas delgadas de TiO_2 modificado con Co para su aplicación en sistemas electrocatalíticos y fotocatalíticos, en *Repositorio Institucional*. [En línea]. Disponible en: <https://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/978091>. Fecha de consulta: 11 de enero del 2024.

Acevedo, M. J. A. (2022). Obtención y estudio de capas finas de perovskita de haluros metal-orgánicos para celdas solares, en *Repositorio Cinvestav*. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.cinvestav.mx/handle/cinvestav/3635>. Fecha de consulta: 11 de enero 2024.

Camarillo, J. M., Martínez, I. P., Aviña, X. & Simental, J. H. (2020). Desarrollo de Celdas Solares Sensibilizadas con Tinte Utilizando Titanato de Bismuto Dopado con Niobio Depositado en el Electrodo, en *Revista Memorias Del XXVI Congreso Internacional Anual De La Somim*. [En línea]. Disponible en: http://somim.org.mx/memorias/memorias2020/articulos/A2_115.pdf. Fecha de consulta: 11 de enero 2024.

Carlson, D., Rajan, K., Arya, R., Willing, F., & Yang, L. (1998). Advances in amorphous silicon photovoltaic technology. *Journal of Materials Research*, 13(10): 2754-2762. <https://doi.org/10.1557/jmr.1998.0377>

COIT, Colegio Oficial Ingenieros de Telecomunicación. (2007). Energía Solar Fotovoltaica. Madrid: Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación. [En línea]. Disponible en: <https://www.coit.es/comunicacion/publicaciones/manuales-tecnicos/recursos/energia-solar-fotovoltaica>. Fecha de consulta: 11 de enero 2024.

Ramírez-Como, M., Sacramento, A., Sánchez, J. G., Estrada, M., Pallarès, J., Balderrama, V. S., & Marsal, L. F. (2021). Small molecule organic solar cells toward improved stability and performance for indoor light harvesting application. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 230: 111265. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2021.111265>

Esparza, D., Torres, J., Sánchez, J. & Rivas, J. M. (2020). Celdas solares de tercera generación a base de puntos cuánticos y perovskitas, en *Revista Investigación Científica*. [En línea]. Disponible en: <https://revistas.uaz.edu.mx/index.php/investigacioncientifica/article/view/995/926>

Ezema, F., I., Lokhande, C. D. & Jose, R. (2021). *Chemically Deposited Nanocrystalline Metal Oxide Thin Films: Synthesis, Characterizations, and Applications* (2021 ed.). Springer.

Filippin, F., Santos, E. & Avalle, L. (2017). SEMICONDUCTOR PROPERTIES OF TITANIUM OXIDE FORMED ON GLASS/Ti/TiO₂ SUBSTRATES IN DILUTED ACID SOLUTION. *Anales AFA*, 28(2): 45-49.
<https://doi.org/10.31527/analesafa.2017.28.2.45>

Hümmelgen, I. A. (2012). "Oxide Semiconductors for Solar Energy Conversion—Titanium dioxide". Author: Janusz Nowotny. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 16(6): 2287. <https://doi.org/10.1007/s10008-012-1650-6>

Loeza, M. I., Méndez, J. M. & Hernández, E. N. (2021). Obtención de películas delgadas de TiO₂ por medio de Rocío Piroclítico Ultrasónico con aplicaciones fotovoltaicas, en *Revista Identidad Energetica*. [En línea]. Disponible en: http://cinergiaug.org/Revista/VI_2021/RIE_V4_N1_Dic2021.11.pdf Fecha de consulta: 11 de enero 2024.

Mironyuk, I. F., Soltys, L. M., Tatarchuk, T. R. & Savka, K. O. (2020). Methods of Titanium Dioxide Synthesis (Review). *Physics and Chemistry of Solid State*, 21(3): 462-477. <https://doi.org/10.15330/pcss.21.3.462-477>

Parrino, F. & Palmisano, L. (2020). Metal Oxides: Titanium Dioxide (TiO₂) and Its Applications, en *Elsevier Science*. [En línea]. Disponible en: <https://books.google.com.mx/books?id=3J-uzQEACAAJ> . Fecha de consulta: 11 de enero 2024.

Pereyra, S., & Israel, R. G. (2018). Eficiencia de las Células Fotovoltaicas Nanoestructuradas a Base de Dióxido de Titanio, Sensitivizadas con Pigmentos Nativos Peruanos, en Chaclacayo – 2018. Universidad César Vallejo.

Quiroz, H. P., & Dussàn, A. (2019). Synthesis temperature dependence on magnetic properties of cobalt doped TiO₂ thin films for spintronic applications. *Applied Surface Science*, 484: 688-691. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.03.068>

Sanjay, P., Deepa, K., Madhavan, J., & Senthil, S. (2018). Performance of TiO₂ based dye-sensitized solar cells fabricated with dye extracted from leaves of *Peltophorum pterocarpum* and *Acalypha amentacea* as sensitizer. *Materials Letters*, 219: 158-162. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.02.085>

Sarkin, A. S., Ekren, N., & Sağlam, Ş. (2020). A review of anti-reflection and self-cleaning coatings on photovoltaic panels. *Solar Energy*, 199: 63-73. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.01.084>

Sawicka-Chudy, P., Sibiński, M., Rybak-Wilusz, E., Cholewa, M., Wysz, G. & Yavorskyi, R. (2020). Review of the development of copper oxides with titanium dioxide thin-film solar cells. *AIP Advances*, 10(1): 010701. <https://doi.org/10.1063/1.5125433>

- Shin, W., Hernández-Granados, A., Huang, W. H., Hu, H., & Tao, M. (2019). Sulfurization of hematite Fe_2O_3 and anatase TiO_2 by annealing in H_2S . *Materials Chemistry and Physics*, 222: 152-158.
<https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2018.10.008>
- Yu, P., & Cardona, M. (2010). Fundamentals of semiconductors: Physics and Materials Properties, *en Springer Science & Business Media*. [En línea].
Disponible en: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-00710-1>
- Zhang, Y., Liu, J., Ji, Y., Li, D., Xu, J., Xu, L., & Chen, K. (2018). Enhanced up-conversion red light emission from rare earth titanium oxide nanocrystals with pyrochlore phase. *Optical Materials Express*, 8(9): 2643.
<https://doi.org/10.1364/ome.8.002643>