

# ACERCAMIENTO AL SOL

CALOR Y ELECTRICIDAD PARA VIVIR MEJOR



DR. MANUEL MARTÍNEZ FERNÁNDEZ  
DRA. KARLA G. CEDANO VILLAVICENCIO

ACERCAMIENTO

AL SOL

CALOR Y ELECTRICIDAD PARA VIVIR MEJOR

# CRÉDITOS

“Acercamiento al sol: calor y electricidad para vivir mejor”.

Red CONACyT de Energía Solar  
Primera edición, 2017  
Red CONACyT de Energía Solar  
<http://redsolar.org/>  
redsol@ier.unam.mx  
+52 (777) 3620090 ext. 38028  
Temixco, Morelos, México

**Instituciones involucradas:**  
Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.  
Instituto de Energías Renovables.  
Red de Energía Solar.

Queda prohibida la reproducción total o parcial de esta publicación, ninguna parte de ella podrá ser almacenada o transmitida por ningún medio, sea este eléctrico, químico, mecánico, óptico, de grabación o de fotocopia, sin el permiso previo del editor.

**Compiladores:**

Martínez Fernández Manuel  
Cedano Villavicencio Karla G.

**Colaboración científica:**

del Río Portilla Jesús Antonio

**Colaboración técnica:**

Leal Fulgencio David

**Coordinación de la colección:**

Aguayo Miranda Carolina

**Colaboración en la colección:**

Aranda Reza Carmen  
Barreto Lira Samantha  
Valladares Arias Nydia

**Editora de estilo:**

Pérez Sabino Patricia  
Morones Bulnes Beatriz

**Diseño y composición:**

Flores Carreño Jocelyne I.

**Contribuciones de contenido:**

Aguilar Aguilar Jorge Ovidio  
Alvarado Juan José  
Arancibia Bulnes Camilo  
Borbón Núñez Hugo  
Bouttier Figueroa Diego Carlos  
Castrejón Rafael  
Cedano Villavicencio Karla G.  
Ceh Cih Francisco Javier  
Cervantes López José Luis

Cota Leal Marcos Alan  
Escobar Toledo Martha  
Farías Sánchez Mario H.  
García Gutiérrez Rafael  
Jaramillo Salgado Oscar Alfredo  
Jurado González Jorge Adolfo  
Loeza Poot Mariely  
López Sánchez Adolfo  
Martínez Escobar Dalia  
Martínez Fernández Manuel  
Mata Ramírez Jorge Octavio  
Meza Martínez David Ernesto  
Mis Fernández Ricardo Javier  
Murillo Bracamontes Eduardo  
Ortega Cruz Jorge

Peña Chapa Juan Luis  
Radnev Nedev Nicola  
Ramos Antonio Eduardo  
Rangel Segura Ricardo  
Ruíz Sánchez Teresa de Jesús  
Sánchez Juárez Aarón  
Sánchez Pérez Pedro Andrés  
Santos Magdaleno Rocío de la Luz  
Sotelo Lerma Mérida  
Tiznado Vázquez Hugo  
Vázquez Arce José Luis

**Agradecimientos:**

Consejo Nacional de Ciencia y  
Tecnología.

# ÍNDICE

## Capítulo 0

2025.....	9
Citlalli.....	14
Rebeca y la tecnología solar.....	18
Salto mortal: De la tortillería a las nanoanteras solares.....	20

## Capítulo 1

1.1 CeMIE Sol, una herramienta hacia el futuro.....	30
1.2 Uso de colectores solares en el sector industrial.....	34
1.3 Materiales organometálicos aplicaciones en la industria.....	43
1.4 Las celdas solares fabricadas con Perovskita: Progreso hacia aplicaciones energéticas.....	48
1.5 ¿Cómo se mide la radiación térmica?.....	54
1.6 Nano películas delgadas por ALD aplicaciones en la industria.....	59
1.7 Desarrollo de la metodología de Depósito Atómico en Capas en México.....	65
1.8 ¿En que consiste la técnica de depósito atómico en capas?.....	72
1.9 La importancia de la certificación de módulos fotovoltaicos: Normas y evaluación de la conformidad.....	78

## Capítulo 2

2.1 Perovskitas y kesteritas: El futuro para la fabricación de celdas solares de bajo costo.....	91
2.2 Comparación de las propiedades ópticas y morfológicas de las películas delgadas de CdS y CdS:O depositadas por RF-Sputtering.....	95
2.3 Activación de celda solar de películas delgadas de CdS/CdTe con mezcla de gases que contiene cloro.....	101
2.4 Perovskitas”, el material que llevara a la proxima generación de celdas solares.....	108
2.5 Fabricación de escalón para películas delgadas de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> y curva de calibración para Trimetilaluminio (TMA) en sistema ALD térmico.....	112
2.6 Crecimiento de películas delgadas de ZnO mediante la técnica de depósito atómico en capas.....	120
2.7 Diseño de un sistema electrónico para amplificación y enfriamiento del detector de un radiómetro óptico.....	127

## Capítulo 3

3.1 Influencia de la potencia y la temperatura en películas delgadas de ITO.....	138
---	-----

“

*La energía del Sol, en 1980,  
era el energético del futuro.*

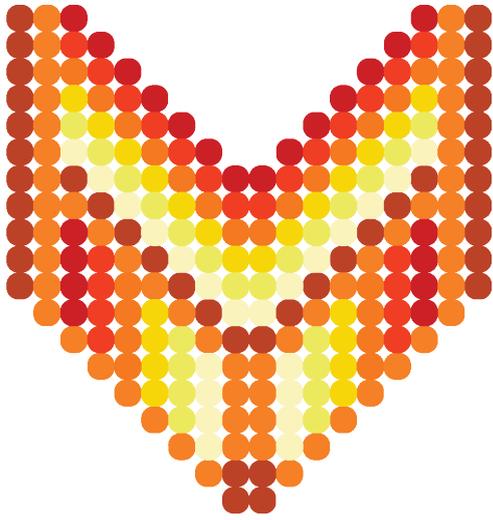
*Hoy, **es presente y futuro.**”*

*Manuel Martínez Fernández.*

# PRESENTACIÓN

Los miembros de la Red Temática de Energía Solar de CONACyT hemos colaborado para tener nuestro primer libro de divulgación y difusión sobre la investigación, desarrollo y utilización de la Energía Solar. Se presentan artículos que involucran también a personas que no participan en nuestra Red para enriquecer los contenidos del mismo. Hemos realizado un esfuerzo especial para que este libro sea de interés para muy diverso público, incrementando el nivel de conocimiento del lector a través del avance en los capítulos. Confiamos que será el inicio de una labor de comunicación continua y cada vez más efectiva de los miembros de la Red al público general.

Manuel Martínez y Karla Cedano.



# CAPÍTULO

# 0

1. 2025.
2. Citlalli
3. Rebeca y la tecnología solar.
4. Salto mortal: De la tortillería a las nanoanteras solares.

# 2025

Karla G. Cedano Villavicencio, Manuel Martínez Fernández

Nadie imaginó que 2020 sería un año de prosperidad para México, especialmente luego del 2017 y la crisis mundial del 2018. En retrospectiva, que el sismo de 2017 pasara como peccata minuta en comparación con lo sucedido ese invierno era impensable. El invierno de 2017 fue brutal. Las temperaturas descendieron en el hemisferio norte como nunca había sucedido. Los países desarrollados se dedicaron a paliar el frío con el remedio más antiguo del mundo, el fuego. Las fogatas e incendios (controlados la mayoría) ayudaron a pobres y a ricos a sobrevivir el duro inicio de 2018. Los índices de contaminación en las grandes urbes llegaron a niveles épicos, y con ellos, también se registró una mortandad nunca antes vista. Los indigentes fueron, como era de esperarse, la población más afectada, en particular los ancianos y niños menores de 6 meses. ¡Fue atroz! Pero el Sol... salió.

El mundo recibió la primavera de 2018 con alegría y esperanza, la temperatura rápidamente subió a niveles agradables, casi veraniegos. Entonces, los países desarrollados, que seguían despreciando el cambio climático, en un frenesí casi paradójico, dieron rienda suelta a incrementar las estrategias de climatización artificial. Con el incremento del uso de equipos de aire acondicionado aumentaron de forma desmedida las afecciones de vías respiratorias, pero la medicina moderna y nuestro afán por resolver sólo los síntomas mitigó, al menos en apariencia, el fenómeno. La primavera dio paso al verano y por supuesto, el Sol... salió, y ¡de qué manera! La oleada de calor europea de 2003, donde perdieron la vida cerca de 70,000 personas no fue nada comparada con el verano de 2018 que dejó más de 3 millones de muertos. Y una vez más los indigentes en las grandes urbes, esta vez sin distinción de edad, fueron inicialmente la población más afectada, porque hacia el otoño de 2018 todo cambió. En las grandes urbes, especialmente en los grandes y hermosos rascacielos, los jóvenes profesionistas empezaron a morir en sus cubículos.

Al inicio llegaban a trabajar bellos, esbeltos, y muy cansados. No era el cansancio típico de una semana intensa de trabajo, era una debilidad continua, un agotamiento mortal. Muchos lo atribuían a las cada vez más largas jornadas de trabajo, al estrés de la competitividad urbana, a la falta de proteína de origen animal en sus dietas, al calor extremo del exterior, o al frío clima artificial interior. Fuera cual fuese la causa miles de jóvenes ejecutivos comenzaron a tomar siestas de medio día, de media mañana y de media tarde. Las empresas modernas, embebidas en la filosofía del Best place to work, acondicionaron espacios comunes para tomar breves work naps durante la jornada. Hasta que un buen día, de manera casi simultánea, murieron centenas de jóvenes en Nueva York, Londres, Chicago y Los Ángeles. El mundo entró en pánico.

El invierno se acercaba y los bellos durmientes (como les llamaron por lo esbeltos y sonrosados que yacían, para no despertar jamás) eran cada día más, en más y más ciudades. La causa de la muerte, en todos los casos, fue envenenamiento por monóxido de carbono. Y entonces, el mundo recordó. Todo evocaba a esa epidemia, el mal de siglo pasado, el Síndrome de Inmunodeficiencia Adquirida (SIDA).

Investigadores de todo el hemisferio norte comenzaron proyectos de investigación abierta y colaborativa. Luego de mucha desinformación y mitos, descubrimos el gran mal y el 2018 pasó a la historia como el año en que el Síndrome de Anemia Aplástica Adquirida (SAAA) golpeó a la humanidad. Una mutación en un virus asociado a anemia aplástica y hepatitis, le confirió al agente la propiedad de transmitirse por aire. Una infección de vida corta, con un tratamiento conocido, se transformó en un agente letal al encontrar en los sistemas de ventilación de los grandes edificios no sólo su hogar, sino también una manera de prosperar en los cuerpos jóvenes y esbeltos de quienes laboraban en estos edificios; una población especialmente sensible a un decremento de glóbulos rojos. El cansancio y la debilidad provocadas por la anemia

aplástica, que en el siglo pasado se detectaba y trataba rápidamente, en el verano de 2018 encontró, hoy lo sabemos, un socio silencioso que segó la vida de millones: altísimas concentraciones de monóxido de carbono. Y así, una variación azarosa a un virus bien conocido encontró en dos efectos separados del cambio climático acelerado a sus mejores aliados en la fúnebre tarea. Quienes más tardaron en reaccionar a la nueva pandemia fueron los Estados Unidos. Los hechos alternativos, el manejo mediático, la política de negación del cambio climático y la confusión generada por una campaña masiva de apoyo a las energías limpias en lugar de a las energías renovables, desvió recursos invaluable hacia la atención de los síntomas de la emergencia de salud, en lugar de atender la causa medioambiental más importante. Una eliminación del uso de combustibles fósiles en ciudades habría rescatado la vida de más del 80% de las personas que murieron en los primeros cinco años de la pandemia.

México también sufrió, pero de manera distinta. La transición del 2017 al 2018 fue durísima, más por el “ajuste” al TLCAN que por la crisis climática. El primer golpe inició ese fatídico 30 de noviembre cuando los precios de la gasolina se liberaron y subieron como la espuma. Diciembre, entonces, fue un mes extrañamente pacífico pues, entre el alza de las concentraciones de CO en las grandes urbes y la depresión económica instantánea que acompañó al “ajuste”, poca gente salió de casa y aunque fue un duro invierno no tuvo las consecuencias que en el resto del hemisferio norte. Además, sucedió algo sin precedente, el Gran Milagro Mexicano. Por una de esas casualidades históricas, a mediados de enero de 2018 se presentaron tres eventos sin aparente relación. Por un lado, el extinto Instituto Mexicano del Petróleo, presentó un documento sobre cómo eliminar los combustibles fósiles en ciudades. Por otra parte, CeMIESol, el consorcio de investigación aplicada que todos conocemos hoy día, celebró un evento de relevancia nacional que agrupó por primera vez a los investigadores más importantes en energía solar, a los empresarios e inversionistas más interesados en la energía renovable, a

los funcionarios públicos de la Secretaría de Energía y del Conacyt y a Senadores y Diputados Federales de las comisiones relacionadas a los temas de energía, sustentabilidad e innovación. Y, finalmente, en el marco de ese evento dedicado a la energía solar, la RedSol, que entonces sólo contaba con una décima parte de los miembros que ahora la conformamos, expuso su cartera de proyectos de innovación basada en ciencia. Esta trífeca logró llamar la atención de los tres grupos industriales más importantes de nuestro país. Así, de la noche a la mañana, la economía mexicana vio luz en la inversión en proyectos de energía solar y lo que sucedió después ya es historia.

México se erigió como el paraíso solar, que es hoy, para los grandes capitales mexicanos y europeos. La generación distribuida de electricidad fue el principal motor de desarrollo del país, dando trabajo a los cientos de mexicanos que regresaban desanimados y golpeados (literal y figurativamente) del vecino país del norte. Lo que en otras áreas podría haber sido un crecimiento dependiente del exterior, desmedido y sin soporte institucional, en el caso de la energía solar fue todo lo contrario. La comunidad solar llevaba 42 años preparándose para esta oportunidad.

El Gran Milagro Mexicano reinició la historia económica de nuestro país, pues descubrimos una nueva forma de hacer las cosas. Encontramos la manera sustentable. Trabajamos para empoderar a la sociedad, mediante el acceso a energía limpia y de calidad. Esto disminuyó la desigualdad social y con ello, la inseguridad. En 2020, solo dos años después de la crisis mundial, México había encontrado niveles de bienestar equiparables a los del siglo pasado. Y sí, el SA3 nos pegó, pero hubo poca mortalidad, los niveles controlados de monóxido de carbono dieron tiempo a tratamientos contra la anemia que sufrían los afectados. La pandemia que golpeó la economía de Estados Unidos, mermando a la población más productiva del vecino del norte, nos ubicó como una alternativa envidiable. Corporativos enteros buscaron oportunidades

en todas las entidades de la República y pudimos darnos el lujo de estudiar los casos, establecer políticas públicas orientadas a un desarrollo sustentable y limitar la inmigración a empresas con alta responsabilidad social y ambiental. Los grupos de diseño bioclimático de edificaciones sustentables crecieron y lograron que la Ley General de Construcción privilegiara edificios sin aire acondicionado, diseñados por mexicanos y construidos con materiales y mano de obra nacionales.

Todo este sexenio hemos visto como las energías renovables, en particular la energía solar, han sido motor de un empoderamiento social. Hemos presenciado un año electoral en el que los ciudadanos participamos activamente, en el que, independientemente de quien ganó, la sociedad mexicana tiene una estabilidad natural. Estamos celebrando el inicio de un año que innumerables compilaciones del siglo pasado imaginaban. Es cierto, en 2018 tocamos fondo nos confrontamos con nuestros peores miedos. Siete años después podemos decir que, en nuestra noche más oscura, el Sol... salió.

# Citlalli

Karla Fernanda Ricalde Cedano

“En la familia siempre hemos vivido del sol, tus abuelos y sus abuelos siempre vivieron del sol y nunca nos ha faltado que comer, el sol y la tierra dan para vivir”, me decía mi papá cuando me veía con la cara pegada en un libro, porque sabía que yo lo hacía porque no quería vivir del sol. “Aquí en el ejido a eso nos dedicamos, a cosechar del sol”. Yo le decía que lo que cosechábamos era la milpa y que ni el maíz ni los frijoles eran sol. Yo odiaba el sol. Odiaba cuando mi mamá me pedía ir por agua en la tarde si no nos alcanzaba para bañarnos o tener que ir con mi papá al campo. Me chocaba cuando me obligaban a jugar con los otros niños a rostizarnos un rato en la calle. Yo quería quedarme en mi casa a aprender, a dibujar, a ver tele, no sé, a lo que fuera menos a estar en el sol. Mi tío Lorenzo, el único que había salido de Josefa, vivía en Tonalá, la cabecera municipal. Y siempre me decía que por eso el ejido de Josefa Ortiz de Domínguez era pobre, que para no ser pobres había que dejar de quemarse el coco y mejor echarle coco; irse a estudiar y moverse para México, Tuxtla o mínimo San Cristóbal. Me decía, “Citlalli, tú eres diferente, te gusta estudiar, aprovéchalo”. Mi tío decía también que en Josefa éramos de los pobres que ya ni de moda estábamos, porque no se habla lengua. Por eso mi papá quiso ponerme Citlalli, un nombre *nawatl*, porque se perdió la lengua de acá, aunque aquí ni se hablaba *nawatl*.

Yo no quería dedicarme al campo como mi papá, eso de estar todo el día al sol no era lo mío, y tampoco quería quedarme en casa e ir al campo como mi mamá, eso es mucho trabajo: tener que ir por leña, ir por agua, cuidar a los niños, hacer de comer... Yo les dije a mis papás que quería estudiar, quería entender cómo funcionaba el mundo, y ellos me apoyaron. Mi mamá veía cómo le hacía para hacer todo sola, mi papá trabajaba extra para poder pagar mis útiles. Me apoyaron siempre, hasta cuando llegaba de la escuela y me creía mucho y los corregía al hablar y al escribir, hasta

cuando les decía que yo no quería vivir del sol y ser pobre como ellos. Ellos me apoyaron, aunque eso implicaba un par de manos menos en la casa y en el campo. En la escuela se burlaban de mí; porque tenía nombre nawatl, porque vivía lejos, porque era más morena, porque era del ejido y vivía del sol, por eso resentía yo tanto que mi papá celebrara siempre al sol. El sol no me traía nada bueno, nomás esta piel morena que me hacía diferente.

En la primaria aprendí que el Sol era una estrella, y entonces entendí que me llamaba Citlalli por el agradecimiento obsesivo que tenía mi padre con nuestra estrella sol (y porque Tonatiuh, Ki'in<sup>1</sup> y Xëë<sup>2</sup> no eran muy buenos nombres para una niña). En la secundaria entendí que las plantas necesitaban luz solar para alimentarse a través de la fotosíntesis, y que, pues sí, medio cosechamos sol. Luego en la prepa aprendí que se necesita la radiación UV del sol para poder sintetizar la pre vitamina D para fijar el calcio, que por eso mi papá siempre fue de huesos fuertes. Y que, pues sí, medio vivíamos del sol. En la prepa también aprendí que cuando había mucho-mucho sol los hombres no salían de sus casas y podía caminar más tranquila por las calles, y entendí que el sol era mi aliado. Yo terminé la prepa porque me gustaba aprender, por eso no me pesaron los años de tener que caminar una hora al sol para llegar a la carretera para poder tomar el colectivo a Tonalá. Me mudé a la capital para poder seguir con la universidad, y mi tío estaba muy orgulloso de mí, quería que saliera del ejido para no regresar jamás.

Fui la primera mujer en mi familia, y en Josefa, en tener un título universitario. En la universidad aprendí que se podía cosechar el sol, y que tenía que regresar a Josefa, que aquí tenemos un potencial solar envidiable. Y que podía vivir del sol.

Me costó mucho explicarles a todos los del ejido que yo, la hijita de Lucas y Soledad, sabía de lo que hablaba, y que los armatostes antinaturales que nos iban a quitar parte de nuestra tierra representaban un cambio para bien. No amenazaban nuestras

---

1 Sol en Maya Peninsular

2 Sol en mixe

tradiciones, ni lo que llevábamos años haciendo en Tonalá, vivir del sol. “Ya han intentado hacerlo antes *m’ija*”, me decía mi mamá, “nadie ha podido convencernos, nos hablaban como tontos, luego vienen los trajeados y es como si hablaran en lengua, *nadien* entiende”. Y sí, por su gran potencial solar, la gente iba a cada rato al ejido a tratar de convencerlos de poner módulos solares. Lo malo no era cuando venían de la universidad, con buenas intenciones, pero poco entendimiento del ejido, lo verdaderamente malo eran los de las transnacionales que no explicaban nada y nada más trataban de pagar una miseria por nuestras tierras.

Me di a la tarea de explicarles, de asegurarme de que vieran que sólo íbamos a aprovechar algo que ya teníamos, algo nuestro. Quería que en verdad entendieran los armatostes. Así que bien que mal les expliqué el efecto fotovoltaico.

*Vamos a hacerle como las plantas. Verán, el sol emite luz, que está hecha de fotones. Los fotones son pedazos de energía y le pueden transferir esa energía a las cosas, es por eso que cuando estamos al sol nos calentamos, por la transmisión de energía. Esto es porque nosotros, como todo a nuestro alrededor, estamos hechos de partículas pequeñas llamadas átomos que están hechos de varias sub-partículas, entre ellas los electrones. Algunos fotones chocan con algunos electrones, les transfieren energía y como que los empujan y hacen que éstos salten.*

*Esto lo hacen las plantas todo el tiempo. Transforman el agua y el  $\text{CO}_2$  del aire en aire bueno para nosotros y en alimento para ellas. Para esto necesitan que la energía del sol interactúe con la clorofila que transfiere la energía de algunos fotones a sus electrones para hacer que las piezas que forman el agua y el  $\text{CO}_2$  se reacomoden para hacer el oxígeno que necesitamos para respirar y glucosa que necesitan para crecer. Nosotros hacemos algo similar pero diferente para poder fijar el calcio, por eso la gente del pueblo tiene buenos huesos, no como la gente de ciudad que le huye al sol. Lo que hacemos es lo mismo, con ayuda de los fotones, liberamos electrones para darle la energía que necesita una hormona de la piel para transformarse en vitamina D, que nos ayuda a absorber el*

*calcio. Los armatostes van a hacer lo mismo, no son antinaturales, al contrario, son más naturales que hacerle hoyos a la tierra. Hacen lo que nosotros hacemos, aprovechar el sol. Los armatostes están compuestos de pequeñas celdas hechas de distintos semiconductores, que son materiales que al ser golpeados por los fotones liberan electrones para transformarlos en energía eléctrica, energía limpia. Yo sé que aquí en el ejido ya casi todos tenemos luz, pero no la tenemos todo el tiempo. A veces se nos va, y luego estamos cuidando no gastar mucha porque sale muy cara, pero con estos armatostes ya no vamos a tener que preocuparnos. Todo va a ser diferente. Vamos a poder poner estufas eléctricas, para que las mujeres no tengamos que salir más por leña, podemos poner bombas que funcionen con la energía de nuestros armatostes para que tampoco tengamos que mandar a nuestras hijas por agua, a ellas ya sólo las vamos a mandar a la escuela.*

*Me escucharon. Me hicieron preguntas y yo los escuché, contesté todas sus dudas. Estaban llenos de mitos: que si nos iba a dar cáncer, que tienen que ser profesionales o contratar profesionales para darles mantenimiento, que si nos iba a costar un ojo de la cara y nos iba a dejar más pobres. Me aseguré que todos y todas entendieran el qué, para qué y por qué de los armatostes, sabía que sólo así los sentirían suyos.*

*Quedarse en Josefa ya no es de pobres, ya no estamos aquí porque nos tocó, estamos aquí porque queremos estar. Ahora tenemos nuestra propia fuente de energía eléctrica y ya estamos de moda, por ser un ejido sustentable. Las niñas y los niños pueden ayudar en la casa y además estudiar por las tardes. Ahora que calles están más seguras, ya no tienen que jugar a rostizarse, pueden salir de noche a jugar. Las mujeres ahora ya no tienen que caminar con miedo en las noches, ni ir a recolectar leña si no quieren, pueden usar sus estufas eléctricas, aunque siguen yendo de vez en cuando porque insisten con que las tortillas no saben igual.*

*Yo, como mi mamá, mi papá, mis abuelos y sus abuelos, vivo del sol, pero diferente.*

# Rebeca y la tecnología solar

Silvia Patricia Pérez Sabino

Era sábado 4 de febrero de hace un par de años, amanecí con una resaca que ni la famosa combinación de vitaminas del complejo B, vitamina C y minerales como el calcio, el magnesio y el zinc, aliviaban mi malestar, tal vez se debió a la emotiva celebración que le realizamos a nuestra compañera Rebeca el viernes por la noche, quien obtuvo una beca para poder estudiar en el extranjero un Doctorado en Tecnología de Ingeniería.

Dentro de la fiesta, los abrazos, las palabras de despedida empezamos a filosofar sobre lo que implicaba la palabra tecnología; que si es un conjunto de técnicas, que si involucra procesos, que si se construyen objetos para satisfacer necesidades. Tuvimos una larga e improductiva rebatiña, pero al final sí coincidimos en que la tecnología está presente en todos lados: en la escuela, en el trabajo, en la cocina, en el campo, en la medicina, a través de relojes electrónicos, marcapasos, audífonos, baterías y paneles solares, que son algunos conceptos que recuerdo de esa divertida noche.

A raíz de la tecnología, decía Rebeca que se ha tomado gran interés en el estudio de los semiconductores porque son necesarios para la fabricación de los dispositivos electrónicos, los cuales ocupan para convertir en señales eléctricas la información procedente del mundo exterior, transformándolas en otras fuentes de energía.

Otro de mis compañeros de trabajo al que le dicen el Chip por estar siempre a la vanguardia en nuevas tecnologías y, con el cual hablo poco, porque no hay poder humano que lo separe de su ordenador, comentó que el sulfuro de cadmio es un semiconductor que en los últimos 20 años ha sido objeto de estudio en la producción de celdas solares.

¿Sulfuro de cadmio?, le dije. Ahora sí que mis clases de química me traicionaron, pero me salvó Chip, diciéndome que es un compuesto inorgánico de azufre y cadmio que se presenta en la forma de un sólido color amarillo-naranja, parecido al sustituto en polvo de caldo de pollo y que se encuentra en la naturaleza y se utiliza como pigmento amarillo, en televisores, en la fotografía y para la fabricación de fotorresistencias; éstas últimas se refieren a un componente electrónico que posee una resistencia que disminuye con el aumento de intensidad de luz que incide sobre ella y también se le conoce como fotoconductor, célula fotoeléctrica o fotorresistor.

También se encuentra el sulfuro de cadmio en la conversión fotovoltaica de energía solar, en ésta su aplicación es en celdas solares de película delgada. Aquí Rebeca re-actualizó la ávida plática, mencionando que al iluminar un material o dispositivo (celda solar), se produce fotovoltaje y, estas celdas, se pueden procesar de diferentes maneras, entre ellas a través de películas delgadas semiconductoras.

Mientras la escuchaba, recordaba que las celdas solares son mecanismos capaces de transformar la energía solar en eléctrica y ¡bingo! ahora sí ligaba la importancia que tiene el concepto que recién me explicaba Chip de esta nueva tecnología solar, y cómo podría ayudar a que estas celdas fueran más eficientes en su conducción de energía y menos costosa su fabricación.

Hoy sé que existen desarrollos impulsados en diferentes puntos del país con el apoyo del Centro Mexicano de Innovación en Energía Solar – CeMIE Sol, el cual une a la academia con la industria en pro del desarrollo y la innovación tecnológica en el sector de la energía solar. No cabe duda que la generación de energía eléctrica a través del área solar es una alternativa eficaz, real y gracias a la despedida de Rebeca lo descubrí, minimizando el malestar que padecía en ese momento.

# Salto mortal: De la tortillería a las nanoantenas solares

Denise Estrada Wiese  
Instituto de Investigación en Ciencias Básicas y Aplicadas,  
Universidad Autónoma del Estado de Morelos  
Jesús Antonio del Río Portilla  
Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional  
Autónoma de México

Voy saliendo de la tortillería y veo a Ingrid sentada en el cafecito de enfrente. Le hago señas para saludarla pero no voltea. Parece distraída viendo algo sobre la mesa típico de Ingrid. Le grito:

- ¡Ingrid, hey güera!

No recibo respuesta alguna. Ya me intrigó saber qué tiene a mi amiga tan clavada así que decido acercarme. Siempre tiene cosas interesantes que platicar. Al fin, todavía tengo un ratito antes de ir por mi hija a la escuela.

- ¡Hola güera!... ¿por qué tan pensativa? ¿ Estás leyendo el periódico?... ¿Ahora qué pasó?

- ¡Ay, hola Beto! No, no pasó nada. Estoy tratando de entender este artículo sobre nanoantenas para cosechar la energía solar.

- Ahhh... mmmm... ¿nanoantenas?

- Ya sabes, me gusta leer esos artículos que aparecen los lunes en el periódico La Unión de Morelos [1].

- Si... y mira explica cómo se captura la luz solar en microscópicas antenas... Pero estaba tratando de ver la diferencia entre la captura de la luz solar para calentar agua con calentadores solares o en utilizar esta energía para convertirla en electricidad con

sistemas fotovoltaicos y ahora me doy cuenta que también la luz solar se puede capturar con antenas.

- ¿No son los mismos aparatos?

- No, fíjate que todos son diferentes y funcionan de forma distinta.

- A ver explícame, cómo es que son diferentes.

- Precisamente estoy tratando de entenderlo. Mira, Beto, un calentador solar funciona de la siguiente manera: primero recuerda que la materia está formada por átomos y que ellos en los sólidos, como los metales, están colocados en arreglos ordenados. Los físicos dicen que están en estructuras cristalinas. Así cuando un rayo de luz golpea a esa red de átomos la pone a vibrar y se calienta.

- A ver explícame cómo al ponerse a vibrar se calienta.

- Podemos decir que cuando los átomos de un material se mueven tienen una energía cinética y mientras más se muevan pues más energía tienen. De acuerdo con la teoría cinética de la materia, mayor energía cinética se traduce en mayor temperatura. Así cuando la luz incide sobre el metal, en particular sobre el cobre, material del que están hechos muchos calentadores solares, sus átomos se mueven más rápidamente calentándose el metal y con ello el agua de adentro de los tubos del calentador solar.

- Entonces, los calentadores solares están formados por tubos de cobre.

- Sí, la mayoría, están contruidos así. Mira este artículo sobre las cosas importantes para poder comprar un calentador solar [2]. A mí me ayudó mucho cuando compré el mío.

- Excelente, mándame la liga y lo revisaré.

De pronto me doy cuenta de que las tortillas recién hechas empiezan a quemarme las manos. Las pongo sobre la mesa:

- ¿No quieres una tortilla calentita?

- No, gracias, con el café estoy bien.

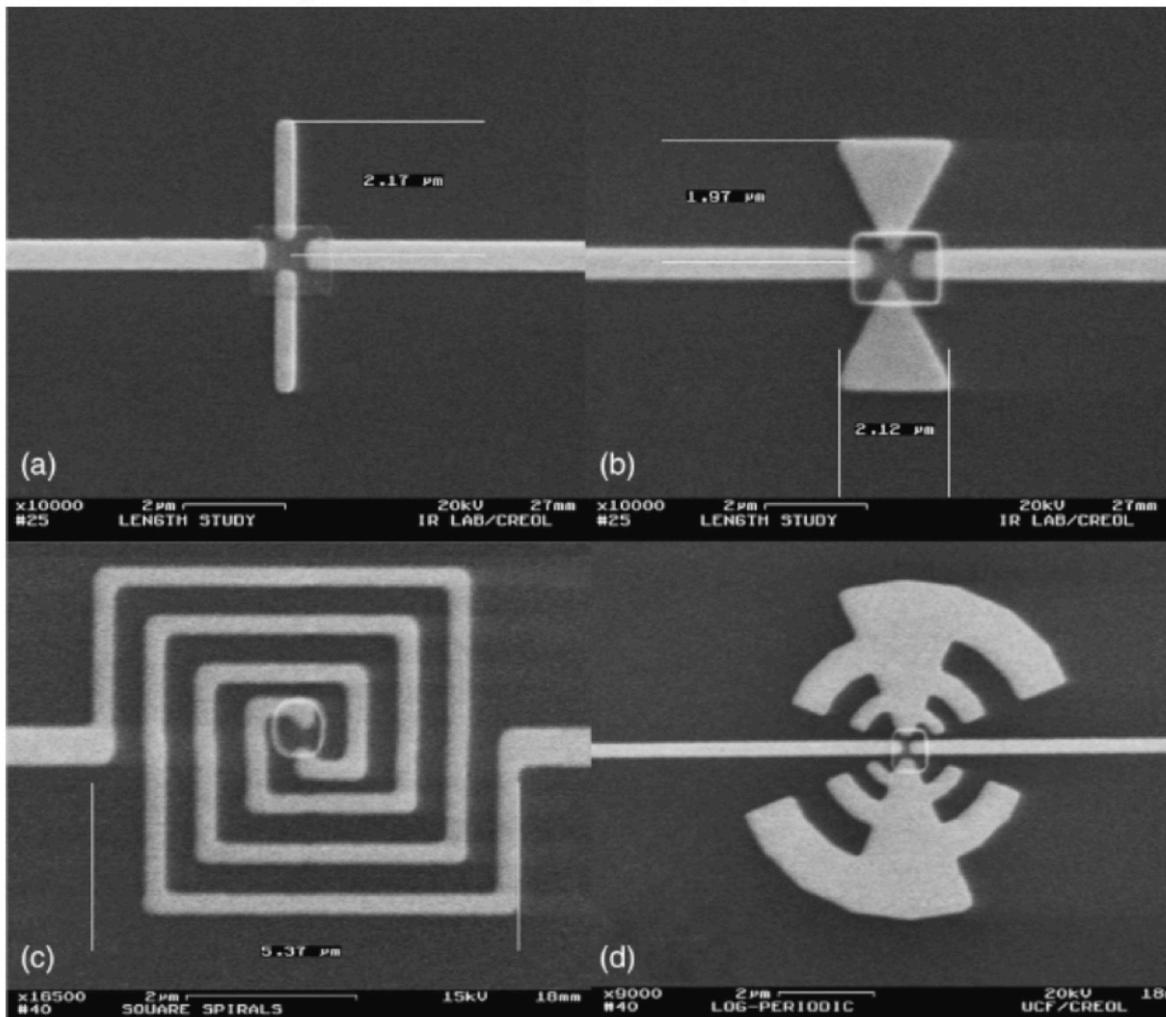
Como quiero saber de qué hablaba mi amiga al mencionar las nanoantenas, decido sentarme y pedir una limonada. Pongo las tortillas en una bolsa de plástico para que no se vayan a enfriar.

- A ver güerita, entonces ya entendí como funciona un calentador solar, pero ahora explícame ¿cómo es que usando la misma energía solar es posible generar electricidad?

- Pues mira, un sistema fotovoltaico opera en forma diferente que los calentadores. En este caso la luz solar golpea a uno de los electrones que están dentro de los átomos de la superficie de la celda fotovoltaica. La longitud de onda de estos fotones es más pequeña y por eso interacciona con un electrón en lugar de interaccionar con toda la red de átomos, como en el caso de los calentadores. Cuando este fotón golpea al electrón lo hace pasar a un nivel energético mayor y entonces, el electrón queda libre y se puede mover entre los átomos formando una corriente eléctrica... Luego te paso otro artículo donde explican más a detalle los procesos en las celdas fotovoltaicas [ 2].

- ¡Wow! ¿o sea que dependiendo del tamaño de la longitud de onda de la luz, ésta va a interactuar de manera diferente con los materiales? Recuérdame, pero eso de la longitud de onda tiene que ver con el color ¿verdad?

- Casi exacto Beto, los colores son mucho más complicados que la longitud de onda; pero precisamente el tamaño de las nanoantenas selecciona la longitud de onda de la luz que puede aprovechar. En el artículo dice que son dispositivos metálicos tan pequeños como la longitud de onda de la luz infrarroja, o sea millones de veces más pequeños que esta silla, por ejemplo, ¡imagínate!, pero más grandes que las longitudes de onda de la luz visible. Mira esta imagen donde se ven algunas de las diferentes nanoantenas que se han fabricado (ver **Figura 1.**)



*Figura 1. Nanoantenas fabricadas usando litografía por haz de electrones. Se muestran diferentes geometrías: (a) dipolo, (b) corbata, (c) espiral, (d) antena log-periódica [3].*

- ¿Y cómo es que algo tan pequeñito puede capturar la energía solar ?
- Pues yo entiendo lo siguiente: cuando la luz interacciona con una nanoantena sus electrones de conducción, pueden empezar a vibrar todos a la vez. Esta vibración colectiva sólo se da para frecuencias especiales, es decir, está “cuantizada” y cuando la luz que incide en la nanoantena tiene alguna de esas frecuencias, el diminuto dispositivo empieza a resonar debido al efecto de la vibración de sus electrones. Hoy aprendí que a este efecto se le llama resonancia plasmónica ya que como los modos de vibración están cuantizados los podemos “ver” como partículas llamadas plasmones.
- A ver, entonces la luz empuja a un electrón como si fuera un columpio, ¿no? y cuando la luz tiene una longitud de onda o frecuencia específica todos los electrones se impulsan, como en el columpio, en forma sincronizada y llaman a eso resonancia plasmónica, ¿quién sabe qué... ¡ah! resonancia plasmónica, pero ¿y eso de qué sirve?
- Pues resulta que el efecto de resonancia altera los campos electromagnéticos de la luz y podemos aprovecharlo por ejemplo para amplificar una señal, o combinarlo con un dispositivo fotovoltaico para generar electricidad...
- ¡A ver, a ver... espera amiguita... pausa! Me habías dicho que las nanoantenas y los sistemas fotovoltaicos son dos cosas diferentes ¿y ahora me dices que los quieren combinar?
- Sí, Beto, se trata de aprovechar las propiedades de ambos dispositivos. Cuando las nanoantenas capturan la energía solar en infrarrojo pueden transferirla al sistema fotovoltaico, que no absorbe en longitudes de onda infrarrojas, y éste la convierte en electricidad. Entonces al poner muchísimas nanoantenas sobre las celdas fotovoltaicas se aprovecha un rango mayor de longitudes de onda de la radiación solar mejorando la eficiencia de los dispositivos.
- ¿Y habrá alguna otra propiedad de las antenitas que se pueda usar para mejorar estos dispositivos?

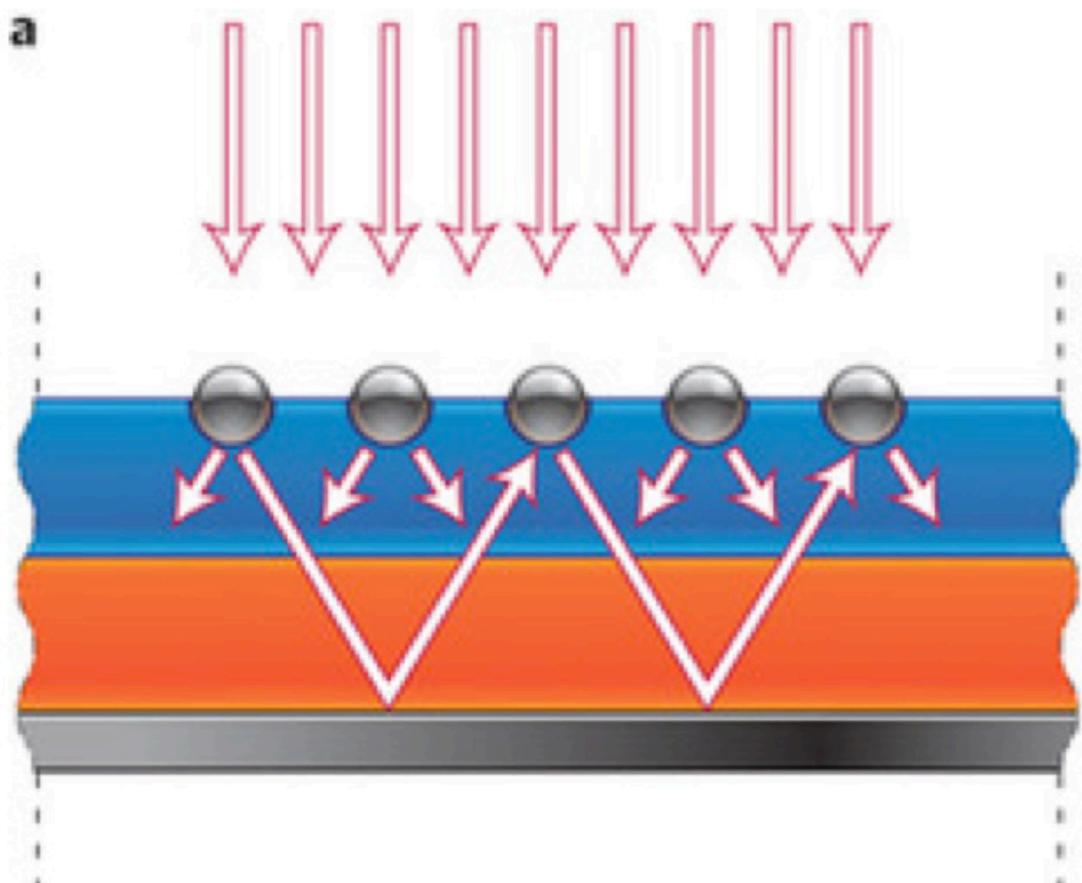
- Que perspicaz me saliste querido Beto, pues fíjate que sí, precisamente era lo que estaba analizando cuando llegaste. Otra manera de construir estos dispositivos compuestos es aprovechando que las nanoantenas son muy buenas para dispersar la luz, pero no entiendo como funciona.

- Ahh, mi hija me contó sobre la dispersión de la luz, en la escuela hicieron un experimento con un prisma: cuando un rayo de luz pasa a través de él cambia el tamaño de su longitud de onda y la dirección con la cual entró al prisma... Entiendo que aquí quiere decir que la luz que entra a la nanoantena también cambia de dirección y longitud de onda al salir de ella...

- ¡Sí, Beto, creo que así funciona! Entonces dice en el artículo que estaba leyendo, que se puede atrapar la luz solar en la celda fotovoltaica usando la dispersión. Mira este esquema (**Figura 2.**), ahora lo entiendo. Cuando la luz es dispersada por las nanoantenas, la luz que no es absorbida por la celda lo hará nuevamente, “rebotando” entre éstas hasta que sea absorbida.

- Entonces, de esta manera también se aprovecha más la energía solar y se mejora la eficiencia del sistema fotovoltaico, ¿estás de acuerdo? Creo que resolvimos el misterio mi querida Ingrid.

- Es verdad Beto, muchas gracias por tu ayuda para comprender todo esto.



*Figura 2. La luz incidente es dispersada por las nanoantenas aumentando las regiones de captación de la luz en la celda fotovoltaica, mejorando así su eficiencia [4].*

- No hay de que Ingrid, la verdad me asombran todas las locuras que los científicos descubren para mejorar el mundo en que vivimos. Ojalá pronto podamos comprar en el Super dispositivos portátiles con nanoantenas para cosechar energía....

- Ya, Beto, no te claves tanto, ya te pareces a mí.

- Tienes razón güera ... ¡Oh no, mi hija ya salió de la escuela! ...ya me tengo que ir de todos modos, la ida por las tortillas ya se prolongó demasiado.

Mientras voy corriendo con mis tortilla, voy pensando, seguro esas nanoantenas podrían capturar la energía disipada en la tortillería y convertirla en electricidad.

Los autores de este texto estamos trabajando en colaboración con el Dr. Francisco Javier González de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí para incrementar la eficiencia en la cosecha de radiación infrarroja mediante nanoantenas soportadas en silicio. Este proyecto de colaboración está apoyado parcialmente por la Red Temática de Energía Solar de CONACyT. Así en un futuro cercano podríamos tener dispositivos que aprovechan la energía térmica y convertirla en electricidad mediante nano o microantenas.

#### Referencias:

[1] M. López y F.J. González <http://acmor.org.mx/?q=content/cosechando-sol>

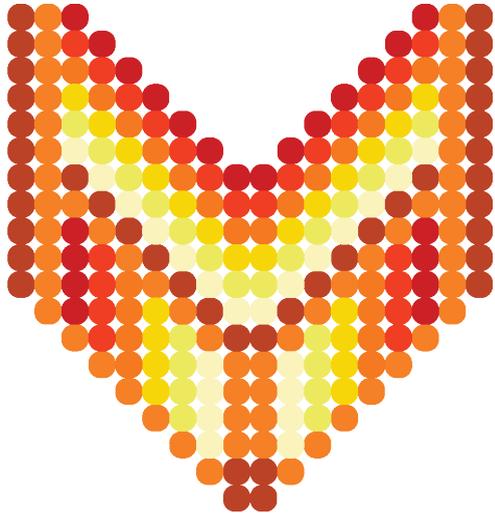
[2] N. Ortega y J.A. del Río <http://www.acmor.org.mx/?q=content/%C2%BFqu%C3%A9-aspectos-son-importantes-para-comprar-un-calentador-solar>

[3] P.K. Nair <http://acmor.org.mx/?q=content/la-energ%C3%AD-solar-una-riqueza-para-todos>

[4] P. Bharadwaj, et al., *Advances in Optics and Photonics* 1, 438–483 (2009).

[5] V. Giannini et al., *Chemical Review* 111, 3888–3912 (2011).





# CAPÍTULO

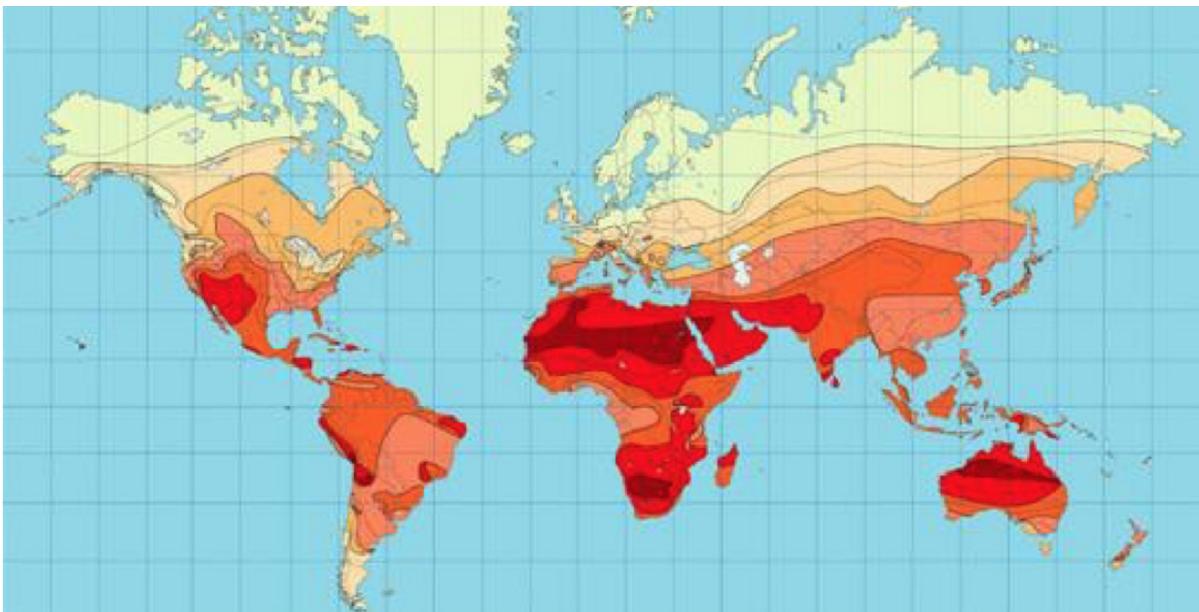
# 1

1. CeMIE Sol, una herramienta hacia el futuro.
2. Uso de colectores solares en el sector industrial.
3. Materiales organometálicos.
4. Las celdas solares fabricadas con Perovskita: Progreso hacia aplicaciones energéticas.
5. ¿Cómo se mide la radiación térmica?
6. Nano películas delgadas por ALD aplicaciones en la industria.
7. Desarrollo de la metodología de Depósito Atómico en Capas en México.
8. ¿En qué consiste la técnica de depósito atómico en capas?
9. La importancia de la certificación de módulos fotovoltaicos: Normas y evaluación de la conformidad.

## Por un México solar: CeMIE Sol, una realidad en temas energéticos

México posee una amplia riqueza cultural, paisajes asombrosos y contrastantes, con ciudades que albergan mágicas historias y tradiciones. Cuenta con una posición geográfica privilegiada, que lo convierte en uno de los países con mayor diversidad en cuanto a flora y fauna, con una gran variedad de climas; desde

cálidos o tropicales hasta áridos o secos. Además, México se ubica dentro del cinturón solar o franja solar, lo cual lo hace pertenecer al grupo de 60 países que reciben mayor cantidad de radiación solar el planeta, siendo así, el tercer país con mayor incidencia solar con una radiación promedio de  $5.3 \text{ kw/m}^2$ .



*Imagen 1. Cinturón Solar y distribución de radiación solar.*

## Del Sol a los hidrocarburos

El Sol es la principal fuente de energía que nuestro planeta recibe, la energía que produce en 10 días sobre la Tierra, equivale a todas las reservas conocidas de petróleo, carbón y gas. Además de su propia capacidad para generar energía solar térmica y fotovoltaica, está en el origen de las energías renovables. Una vez que su radiación llega a la Tierra, se generan una serie de procesos físicos, químicos y biológicos, que propician las condiciones adecuadas para que la vida se puede desarrollar.

A partir de esa sucesión de hechos, se producen otras fuentes de energía como los hidrocarburos. Sin embargo, la utilización de este recurso no renovable, ha estado en el centro de las reflexiones sobre el daño que pueden generar en la salud, en el medio ambiente y en el cambio climático.

## México y el aprovechamiento de la energía solar

En México existe un consorcio en red de científicos, gobierno y empresas que busca generar productos y servicios de valor agregado basados en energía solar llama-

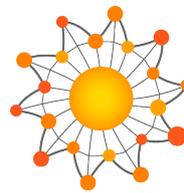
do Centro Mexicano de Innovación en Energía Solar (CeMIE Sol). ¿Qué es el CeMIE Sol?, El Centro Mexicano de Innovación en Energía Solar, como tal no es un lugar o una Institución, es una red de científicos enfocados en generar innovación en energía solar basada en ciencia, que genera productos buscan impactar directamente a la sociedad “Innovación que no llega el usuario no es Innovación”. Las primeras propuestas para el Centro se realizaron en 2012 y en noviembre de 2013 la Secretaría de Energía y el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, otorgaron el proyecto de CeMIE Sol al “Consortio”, refiriéndonos a un grupo de instituciones lideradas por el Instituto de Energías Renovables de la UNAM, y formalizado en febrero de 2014.

Este Centro es el esfuerzo de muchas instituciones, actualmente se tiene participando a más 96 instituciones y más mil personas que trabajan en conjunto y que buscan una manera diferente de concebir la forma en que el conocimiento pueda llegar a las personas. Es un esfuerzo de la Secretaría de Energía (SENER) y el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), instituciones están apostando a que el conocimiento llegue al mercado, basándose en el financiamiento del Fondo de Sustentabilidad Energética. Lo principal que busca hacer este consorcio,

es generar una sinergia, pero ¿qué quiere decir sinergia? La definición de la Real Academia Española nos dice que sinergia es “Acción de dos o más causas cuyo efecto es superior a la suma de los efectos individuales”, dicho de otra forma, que dos o más actores, trabajen para que en conjunto logren más de lo que se puede lograr individualmente, es más, ni siquiera la suma de estos organismos es suficiente para decir que hay sinergia, sino que se logró más que la suma.

Hay que eficientar la forma de colaborar, esto se refiere a que, cuando hay dos personas en instituciones y lugares distintos que trabajan en un tema similar, la riqueza de compartir este conocimiento se multiplica, además de buscar que se genere ese impulso para promover más Innovación, crear instituciones y las normas para regular el cómo va operar este sistema energético. El gobierno mexicano ha hecho un gran trabajo, ya que estos centros son una propuesta novedosa, a través del SENER y del CONACyT, quienes financian los proyectos y actúan como observadores, buscando que se generen productos de innovación y conocimiento, al igual que recursos humanos. Juntos ponen las metas de contribución al desarrollo basado en energías renovables. Uno de

los primeros encargos es que estos Centros tiendan a ser independientes, al menos independientes en la forma administrativa, que no dependan de financiamiento público y que puedan subsistir con recursos propios. Estos Centros han llegado a tal importancia, que la Secretaría de Energía está considerándolos como los consejeros obligados en temas energéticos.



# CeMIE Sol

Centro Mexicano de  
Innovación en Energía Solar

*Imagen 2. Logotipo CeMIE Sol.*

## Soñar no cuesta nada

Una de las grandes metas de CeMIE Sol es contribuir a un México sustentable, a un México solar, en donde se utilice este tipo de energía para su desarrollo económico, que respete al ambiente y que haya una repartición de la riqueza con reglas claramente establecidas que perduren por largo tiempo. Pero un México solar no es tarea solamente del CeMIE Sol, ni de alguna institución académica. Esto es una

tarea de todos; si las personas no utilizan la energía solar, que está distribuida y está para todos, ¿Quién la va a usar? Es hoy que se debe de actuar, ya sea instalando calentadores solares en casa en lugar de quemar el gas, instalando paneles fotovoltaicos para utilizar la energía eléctrica.

Debemos utilizar ya la energía solar y empezar a no utilizar los hidrocarburos, es una responsabilidad de la sociedad, y solamente va a haber un México sustentable, si se toman acciones de la mano de empresarios, gobierno, instituciones de educación superior y sociedad, asumiendo una responsabilidad cada persona puede poner su granito de arena desde la utilización directa de la energía solar al sacar a tender la ropa en vez de usar la secadora hasta el gobierno federal con la comisión federal de electricidad haciendo megaproyectos de parques solares para obtener energía eléctrica para suministrar los hogares Mexicanos. Los cambios reales los hacen la sociedad, todos tenemos responsabilidad en generar un México sustentable.

## REFERENCIAS

<http://www.cemiesol.mx/home/>

<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/277/A5.pdf>

<https://www.nasa.gov/sun>

<https://energiasrenovablesverdes.wordpress.com/2014/09/19/el-cinturon-solar/>

# Uso de colectores solares en el sector industrial

*Eduardo Ramos Antonio<sup>1</sup>, Camilo Arancibia Bulnes<sup>2</sup>, Martha Escobar Toledo<sup>3</sup>*

*<sup>1</sup>Universidad Tecnológica de los Valles Centrales de Oaxaca.*

*<sup>2</sup> Instituto de Energías Renovables, UNAM.*

## Palabras Clave

Colectores solares, Análisis térmico, Calentamiento de agua, Calor de proceso industrial, Energía solar, Proceso Térmico.

## Resumen

En este documento se presenta una descripción de los diversos tipos de colectores solares térmicos y aplicaciones. Se intenta una introducción el impacto de la industria en relación al crecimiento económico del país, seguida de la descripción de colectores incluyendo placa plana, compuesto parabólico, tubo de vacío, cilindro parabólico, lente Fresnel. Esto es seguido por un análisis sobre el uso de la tecnología de concentración lineal a nivel mundial y en específico a nivel nacional, como se ha estado desarrollando ésta tecnología dentro del país de México.

## 1. Introducción

En la actualidad el sector industrial desempeña un papel importante en el crecimiento económico de un país, por ello existe la necesidad de satisfacer la demanda energética en relación al consumo de la energía ya sea en forma eléctrica o térmica. Para esto sería deseable utilizar energías renovables. De acuerdo con la agencia internacional de energía (2016) el consumo mundial de energía en el sector industrial es de 29.2%. México se encuentra en un punto donde el sector energético es una fuente de oportunidades para impulsar el desarrollo y la transición hacia un modelo sustentable haciendo uso racional de los recursos energéticos del país. La tecnología de los colectores solares puede facilitar en gran medida los requerimientos de calor de proceso de las diferentes industrias, evitando el uso de fuentes convencionales de energía y por tanto disminuyendo el impacto ambiental. Las tec-

nologías solares pueden ser fotovoltaicas o térmicas. Es importante distinguir entre los paneles solares fotovoltaicos y los colectores solares, donde los primeros son un conjunto de celdas encargados de convertir la luz solar directamente a electricidad y los segundos consisten en el aprovechamiento de la luz del Sol para producir calor que pueden aprovecharse para diferentes procesos como: secado, escalado, cocción, esterilización, deshidratación, climatización, pasteurización, evaporación, entre otros.

Existen dos tipos de colectores: los estacionarios y los de seguimiento solar; el primero se caracteriza por tener la misma área de captación y absorción de la radiación solar, mientras que el de seguimiento solar se compone de superficies cóncava reflectante para la captación y enfoque de la radiación del Sol hacia un receptor cuyas dimensiones son más pequeñas, lo favorece el aumento de la radiación de flujo.

Movimiento	Tipo de colector	Tipo de absorbedor	Razón de concentración <sup>1</sup>	Rango de temperatura
Estacionario	Colector de placa plana	Plano	1	30-80 °C
	Colector de tubo evacuado	Plano	1	50-200 °C
	Colector parabólico compuesto	Tubular	1-5	60-240 °C
De seguimiento de un solo eje	Colector lineal Fresnel	Tubular	10-40	60-240 °C
	Colector de canal parabólico	Tubular	14-45	60-300 °C

<sup>1</sup> Razón de concentración= Área de absorción dividido entre el área de abertura de captación.

Tabla 1. Collectores de mediana temperatura más utilizados en la industria.

Los colectores estacionarios tienden a estar estáticos, no presentan movimientos y tres de los cinco que se presentan a continuación entran en esta categoría:

**1) Colector de placa plana.** Es un colector que se componen de una cubierta transparente que permite el paso de la radiación solar e impide la pérdida de calor al contacto con el medio ambiente, similar a un invernadero. La placa absorbente es

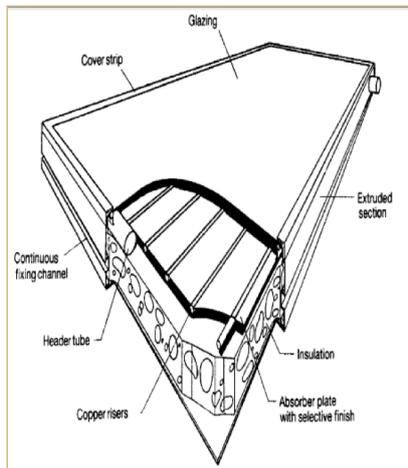
recubierta de una superficie selectiva aumentando su eficiencia. La parte inferior de la placa de absorción y los lados del colector están aislados de manera uniforme con la finalidad de evitar pérdidas de calor.

**2) Colector parabólico compuesto.** Está constituido de dos superficies parabólicas cuyo foco o punto de concentración solar (receptor) es el mismo, en ese foco se coloca un tubo de cobre que en su

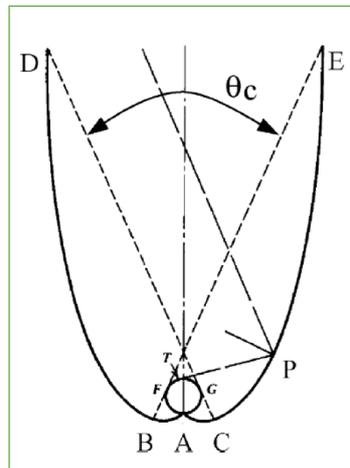
mayoría se pinta de color negro para transformar la luz solar que llega a la superficie de cobre en calor, el colector parabólico compuesto concentra la luz en el foco y puede aún recibir radiación difusa de acuerdo a su ángulo de aceptación el que puede ser aumentado con aletas de cobre soldadas a los tubos de cobre.

tiene en un extremo una capa de bario color plata y se torna de color gris claro cuando pierde el vacío.

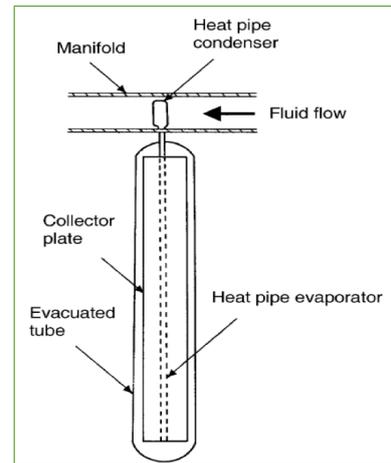
**4) Colector lineal Fresnel.** Éste tipo de colector se compone de un conjunto de espejos lineales en forma de tiras, que concentran la luz solar en un receptor fijo montado en la parte superi



**Figura 1.** Colector de placa plana. Kalogiru, S. (2004).



**Figura 2.** Colector parabólico compuesto. Kalogiru, S. (2004).



**Figura 3.** Colector de tubo evacuado. Kalogiru, S. (2004).

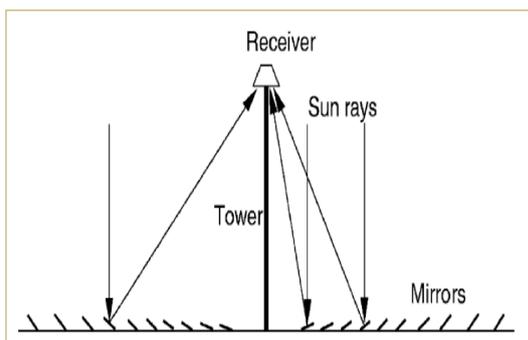
**3) Colector de tubo evacuado.** También llamado tubo de vacío, está compuesto de un tubo receptor dentro de otro tubo de vidrio borosilicato generando un vacío entre ambos. En la parte exterior del tubo interior se ha depositado una superficie selectiva donde

or, cada tira de espejos adquiere un movimiento independiente de tal forma que todas las tiras de espejos direccionen la luz solar al mismo receptor. La mayor ventaja de este tipo de colector es que utiliza reflectores que son más baratos en comparación con el vidrio

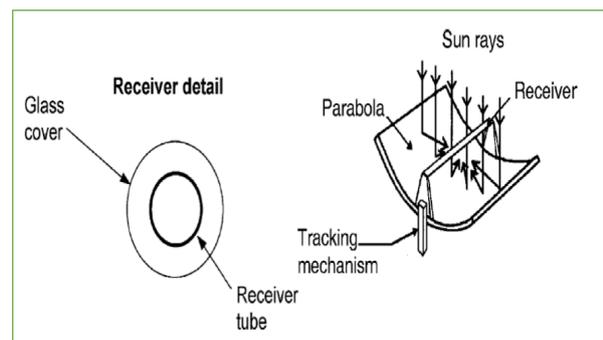
borosilicato. Además, de que este tipo de colectores requieren un menor diseño en su estructura en comparación con los concentradores de tipo canal parabólico.

**5) Colector de Canal Parabólico.** Es un colector solar de concentración, que transforman la radiación solar directa en energía térmica, calentando un fluido de trabajo. El colector de canal parabólico consiste en reflejar la radiación solar di-

recta sobre la línea focal de la parábola, en la que se sitúa el receptor o tubo absorbedor. Desde el punto de vista estructural, este tipo de colector presenta un sistema de seguimiento solar, el más común consiste en un dispositivo que gira los reflectores del colector alrededor de un eje. Normalmente, los colectores de canal parabólico se instalan de forma que su eje de giro quede orientado en la dirección Este-Oeste o Norte-Sur.



**Figura 1.** Colector lineal tipo Fresnel.  
Kalogiru, S. (2004).



**Figura 1.** Colector de canal parabólico.  
Kalogiru, S. (2004).

## **Uso de la Tecnología de concentración solar en un entorno mundial y en México**

A nivel mundial, el consumo total de energía para satisfacer la demanda energética del sector industrial varía considerablemente entre los diferentes países, dependiendo del nivel de actividad industrial, en base a los estudios realizados la gran mayoría de países no cuenta con registros de datos específicos sobre el uso de la tecnología de concentración solar, los datos encontrados solo representan un estimado. En México el sector industrial es el segundo consumidor de energía, durante el 2015 alcanzó el 31.4% del consumo energético total, además es claro que la mayoría de los estados tienen el potencial para la aplicación significativa de los sistemas solares térmicos para la producción de calor de proceso, esto debido a que

México se encuentra dentro del Cinturón solar; es decir un conjunto o grupo de 60 países que reciben mayor cantidad de radiación solar del planeta y México es uno de los cinco países que reciben mayor energía de este tipo a nivel mundial.

México es un país que tiene la gran ventaja de contar con incidencia del Sol en un rango muy elevado. En particular la región del norte es de los territorios más iluminados del mundo. Chihuahua, Sonora, Durango y Baja California son los estados que tienen mayor oportunidad para el uso de la tecnología de concentración solar.

Hoy en día existen diferentes aplicaciones de procesos industriales donde se requiere calentamiento solar de proceso, siendo considerada como una de las opciones de energía limpia y renovable, de manera general se muestran a continuación los procesos industriales con mayor demanda energética.

<b>Industria</b>	<b>Temperatura °C</b>
Alimentos	70 - 120
Láctea	60 - 150
Bebidas	60 - 140
Textil	60 - 180
Papel	60 - 170
Química y Farmacéutica	100 - 200
Automotriz	40 - 225
Productos de cuero, caucho, plástico y fabricación de vidrio	60 - 80

*Tabla 2. Industrias de mediana temperatura.*

<b>Proceso</b>	<b>Temperatura</b>
Secado	40 - 200
Templado	40 - 80
Evaporización	110 - 170
Deshidratación	40 - 80
Destilación	100 - 200
Pasteurización	60 - 150

*Tabla 3. Procesos Industriales de Mediana Temperatura.*

## **Tecnología de concentración solar en México**

En la actualidad el uso de la tecnología de concentración solar en el sector industrial en México es tecnología que se encuentra infrautilizada; es decir existen patentes, avances tecnológicos e investigaciones sobre la tecnología de concentración solar. Empresas que son distribuidores de esta tecnología, pero en su mayoría son colectores solares de placa plana y de tubos evacuados. Cabe mencionar, que ésta tecnología no es nueva que y la respaldan años de investigación y desarrollo, pero se aplican relativamente muy poco en el sector industrial, porque lamentablemente la falta difusión en la sociedad, provocando desconfianza y poca inversión por parte de las empresas.

## **Conclusiones**

De acuerdo al análisis sectorial sobre el uso de colectores solares en el sector industrial, en la actualidad el uso de la tecnología de concentración solar en el sector Industrial, es una alternativa tecnológica de bajo impacto ambiental, bajo costo, que permite atender los requerimientos energéticos en procesos industriales. Particularmente el desarrollo de esta tecnología, presenta condiciones favorables ya que busca crear innovaciones técnicas relacionadas con el diseño, construcción y operación de sistemas de concentración solar para la generación de calor de proceso, satisfaciendo las necesidades de la industria, además de reducir los costos de operación en los procesos.

## REFERENCIAS

Ashish K. Sharma, C. S. (2017). Solar industrial process heating: A review. ELSEVIER, 124-133.

Kalogiru, S. (2004). ELSEVIER. Solar thermal collectors and applications, 235-253.

Shahjadi Hisan Farjanaa, N. H. (2017). Solar process heat in industrial systems – A global review. ELSEVIER, 1-16.

## Materiales organometálicos Aplicaciones en la industria

Jorge Luis Vazquez Arce<sup>1</sup>, Rafael García Gutiérrez<sup>1</sup>, Jorge Octavio Mata Ramírez<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño de la Universidad Autónoma de Baja California, campus Ensenada.

<sup>2</sup>Departamento de Investigación en Física de la Universidad de Sonora.

En los últimos 15 años, la tecnología de los semiconductores ha adquirido gran relevancia en nuestra vida cotidiana. Tanto las computadoras como los celulares, las luces LED e innumerables aparatos que están a nuestro alcance, han evolucionado día con día mejorando su eficiencia, calidad y precio. Los dispositivos semiconductores como los transistores y diodos que componen nuestros aparatos electrónicos, son hechos principalmente de elementos como Ga, Al, In, Si, Ge, C, Cd, As, entre otros, y son útiles, debido a que su comportamiento puede ser fácilmente manipulado por la adición de impurezas en su estructura a nivel atómico, conocidas como dopaje. La conducción de corriente en un semiconductor se produce a través de electrones y espacios “libres” o “huecos” en la estructura, y se les conoce como portadores de carga<sup>1</sup>. Estos dispositivos son sintetizados indus-

trialmente mediante técnicas de deposición química en fase gas como: depósitos por vapores químicos organometálicos (MOCVD, por sus siglas en inglés) y por depósitos por capas atómicas (ALD, por sus siglas en inglés), que utilizan como precursor del elemento

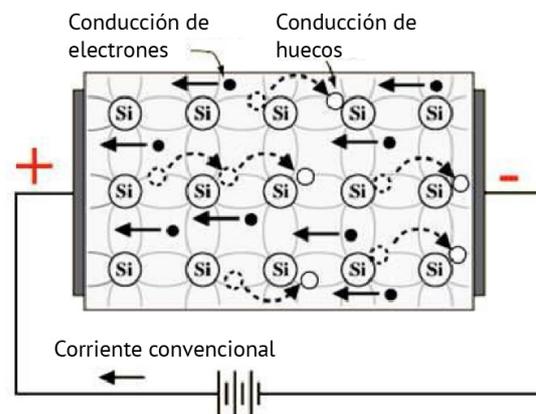


Figura 1. Esquema del flujo de electrones en un material semiconductor.

semiconductor que quieren depositar, este compuesto. Un material organometálico consiste en un átomo metálico, unido a uno o varios ligandos orgánicos (compuestos de carbono); de tal forma que este compuesto adquiere propiedades intensivas totalmente diferentes a las del átomo metálico, como un aumento en la presión de vapor y una considerable disminución en el punto de fusión, las cuales, al ser una síntesis de deposición vía vapor, ayudan a disminuir los costos de producción ya que la temperatura a la cual los elementos semiconductores tienen una presión de vapor ideal para la deposición, es muy baja en comparación con un material organometálico, además ofrecen mayor control sobre el crecimiento del depósito

PRECURSOS	FÓRMULA QUÍMICA
Trimetil Aluminio	$\text{Al}(\text{CH}_3)_3$
Trimetil Galio	$\text{Ga}(\text{CH}_3)_3$
Tetraetil Germanio	$\text{C}_8\text{H}_{20}\text{Ge}$

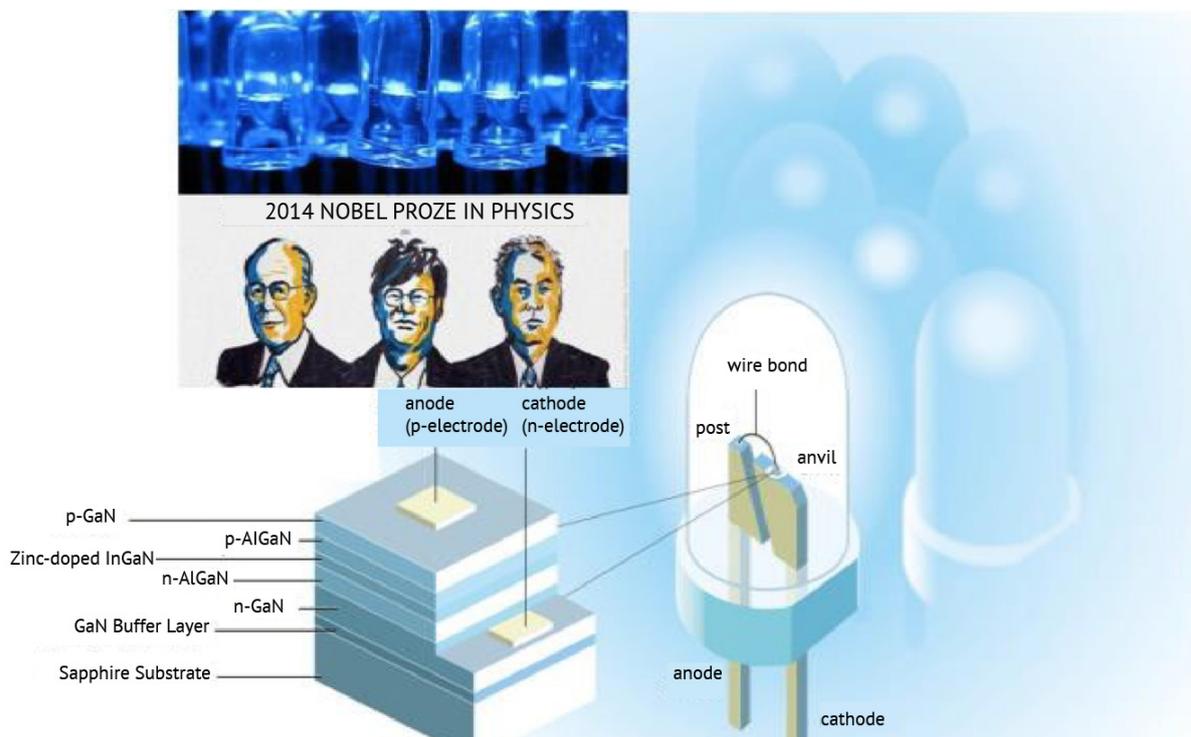
[www.strem.com](http://www.strem.com)

**Tabla 1.** Materiales organometálicos que se utilizan como precursores para síntesis de materiales semiconductores en técnicas como Metal Organic Chemical Vapor Deposition (MOCVD) y Atomic Layer Deposition (ALD)

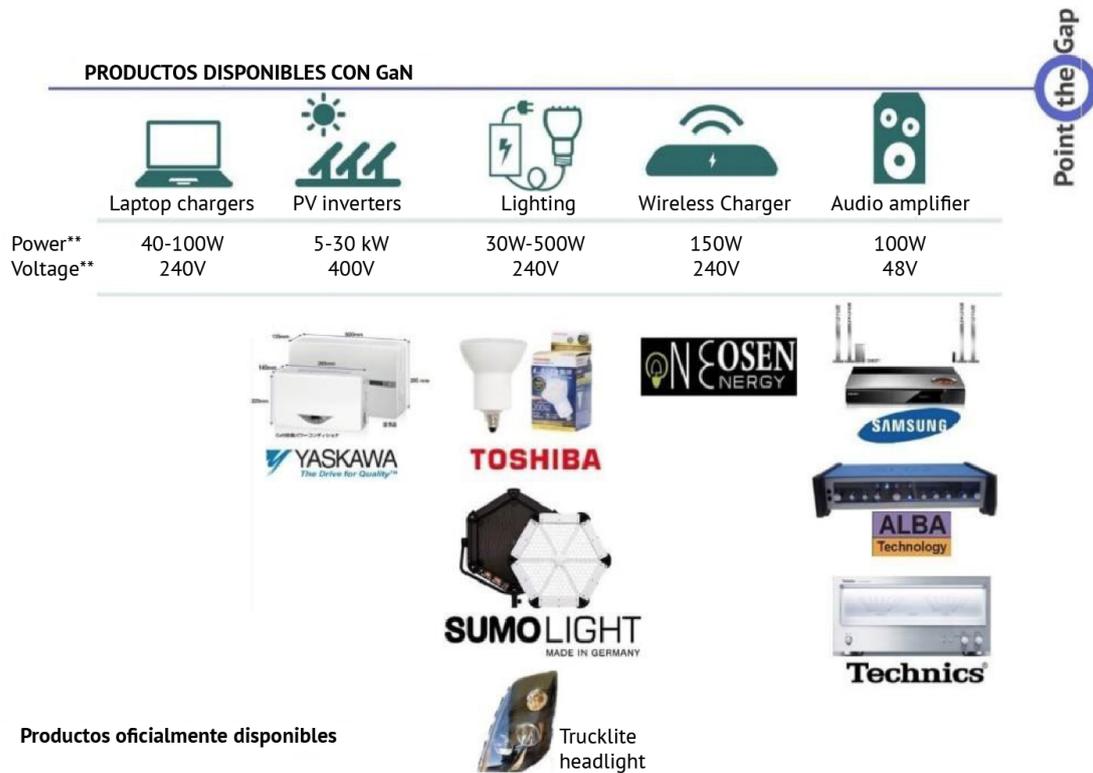
debido a que ofrecen la posibilidad de colocar átomo por átomo<sup>2</sup>. Una de las principales aplicaciones donde se usaron materiales organometálicos como precursores, fue el descubrimiento del LED azul, premio nobel en 2014, por los Doctores Akasaki, Nakamura y Amano. Un diodo emisor de luz consiste en varias capas de materiales semiconductores: una capa

de tipo n con un exceso de electrones, y una capa de tipo p con un exceso de huecos. Entre ellos, está una capa activa, en la que los electrones negativos y los agujeros positivos son accionados cuando se aplica una tensión eléctrica al semiconductor. Cuando los elec-

trones y los agujeros se encuentran se recombinan y se crea la luz. Aproximadamente la eficiencia lumínica reciente es algo más de 300 lúmenes/vatio, que se puede comparar a 16 para las bombillas incandescentes y cerca de 70 para las lámparas fluorescentes<sup>3</sup>.



**Figura 2.** Estructura del led azul inventado por los doctores Akasaki, Nakamura y Amano, acreedores del premio nobel en 2014.



*Figura 3. En esta imagen se muestran algunas de las aplicaciones que podemos encontrar en el mercado del Nitruro de Galio (GaN) sintetizado mediante la técnica Metal Organic Chemical Vapor Deposition (MOCVD) utilizando precursores organometálicos como el Trimeti-Galio (TMGa). <https://www.pntpower.com/our-reports/gallium-nitride-applications/>*

En la actualidad, podemos encontrar una gran variedad de componentes electrónicos sintetizados utilizando materiales organometálicos que usamos de manera cotidiana en pantallas de tele-

visión, blue-ray, celdas solares, sensores de gas, computadoras, celulares, vidrios de baja emisividad y un gran número de dispositivos que cada día ayudan a mejorar nuestra calidad de vida<sup>1</sup>.

## Agradecimientos

A la Red Temática de Energía Solar del CONACyT, por su financiamiento para la realización de la estancia de investigación en el Departamento de Investigación en Física de la Universidad de Sonora. Al Dr. Rafael García Gutiérrez del Departamento de Investigación en Física de la Universidad de Sonora por todo el apoyo durante mi estancia y mi trabajo de investigación en Síntesis de Materiales Organometálicos.

## REFERENCIAS

- [1] Ghibaudo, G. and Rafhay, Q. 2014. Electron and Hole Mobility in Semiconductor Devices. Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering. 1–13.
- [2] R. A. Fischer, Precursor Chemistry of Advanced Materials: CVD, ALD and Nanoparticles (Springer, Heidelberg, 2005). 1-48 125-145.
- [3] L. Bergstrom *et al.*, 2014 “Blue LEDs - Filling the World with New Light,” Royal Swedish Academy of Sciences.

## Las celdas solares fabricadas con Perovskita: Progreso hacia aplicaciones energéticas

*Diego Carlos Bouttier-Figueroa<sup>1</sup>, Marcos Alan Cota-Leal<sup>2</sup>, Merida Sotelo-Lerma<sup>1</sup>*

*<sup>1</sup>Departamento de Investigación en Polímeros y Materiales, Universidad de Sonora, Calle Rosales y Blvd. Luis Encinas S/N, Col. Centro, C.P. 83000 Hermosillo, Sonora, México.*

Todos los días, los seres vivos recibimos la luz solar directamente del Sol que se encuentra sobre nosotros, esta luz solar puede ser aprovechada como una fuente de energía 100% natural por encontrarse ilimitada en la naturaleza y estar libre de contaminantes a diferencia de la producida a través de hidrocarburos.

El Sol posee una cantidad de energía inmensa, que llega al planeta en forma de calor y radiación, esto es lo que conocemos como energía solar, llegando todos los días sin costo alguno. Afortunadamente esta energía puede ser empleada al recolectarse empleando un dispositivo fotovoltaico, llamado celda solar [2]. El material Perovskita se nombró en honor a L.A. Perovski, quién es un mineral-

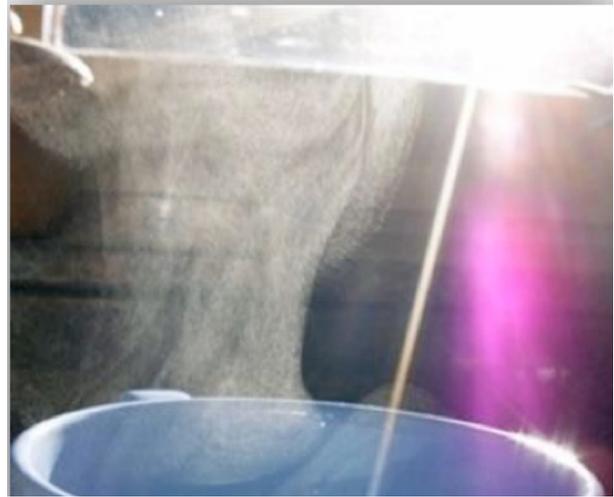
ogista ruso. Este tipo de celdas solares están fabricadas por una parte orgánica y una inorgánica, creando un material híbrido y han llegado a tener un gran impacto en la industria fotovoltaica, puesto que en el periodo de 2012 a 2015 subieron su eficiencia de un 9.8% a un 20.2% [3].

Este material híbrido posee un gran potencial, para ser empleado en diversas aplicaciones por sus propiedades asombrosas que incluyen: a) Puede recolectarse una gran cantidad de luz; b) Tiene un potencial de procesamiento de bajo costo; c) Es una buena opción para procesos de baja temperatura, por lo que puede emplearse en sustratos flexibles; d) Por su bajo costo de procesamiento y alta eficiencia, a este tipo de dispositivos

le toma menos tiempo regresar la inversión que se hará en su compra [4]. Existen 4 retos principales para lograr la comercialización de las celdas solares de perovskita: 1) Son muy sensibles al aire, por la presencia de oxígeno y vapores de agua. La presencia de oxígeno y vapores de agua degradan la perovskita, debido a que se comporta como una sal y se disuelve. 2) La preparación continua de perovskita necesita de cajas de guantes donde no haya contacto con oxígeno. 3) El plomo es muy común para fabricar este material, el cual puede provocar problemas de salud y ecológicos. 4) Tienen una vida útil más corta que las celdas solares comerciales actuales [5].

A continuación, se detallan algunas aplicaciones que pueden tener estas celdas solares [6]:

a) Plantas de poder: Se puede lograr que la luz solar y su energía, sean empleadas para calentar agua y producir vapor para rotar turbinas y generar electricidad.



*Figura 1. Vapor generado en una taza al ser calentado por rayo solar.*

b) Hogares: Tradicionalmente se puede emplear para calentar agua y ahorrar energía eléctrica, ahorrando dinero de la economía familiar.



*Figura 2. Casa con paneles solares.*

c) Usos comerciales: Los edificios pueden tener vidrios foto voltaicos o paneles solares. Los cuales recolectan energía solar, que es convertida en electricidad para posteriormente suplirse a las diferentes partes el edificio. Lo que permite a compañías generar su propia electricidad.



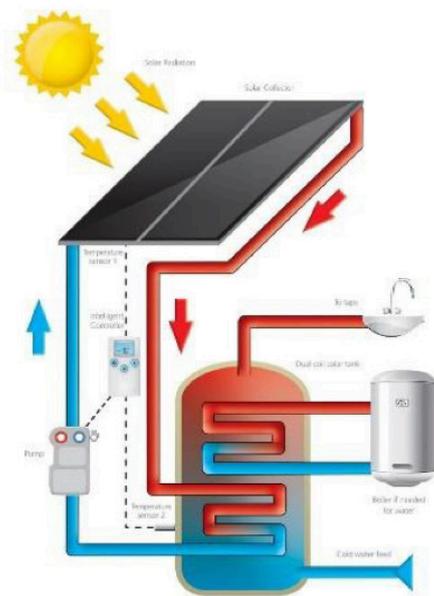
*Figura 3. Edificio construido con vidrios fotovoltaicos.*

d) Sistemas de ventilación: Se puede emplear para que ventiladores de baño, de techo y piso en edificios funcionen. Los abanicos se usan mucho en casas, oficinas y cocinas lo que incrementa las cuentas de electricidad, pero al usar energía solar estos costos disminuyen.



*Figura 4. Abanico funcionando con celda solar.*

e) Bombas de poder: El uso del poder solar no se limita solo a los sistemas de ventilación, sino que además se puede emplear para la circulación de agua. Es factible colocar bombas de poder, las cuales pueden conectarse a una unidad de poder solar. Se necesita trabajar en corriente DC, pero es posible llevar agua a todo un edificio.



**Figura 5.** Sistema de distribución de agua que funciona con celda solar.

f) Albergas: Estos lugares son sinónimo de alegría para chicos y grandes, pero en invierno se vuelve difícil mantener el agua a temperatura corporal. Sin embargo, al emplear poder solar este

problema se puede resolver. Los paneles solares pueden generar calor que mantendrán el agua a una temperatura agradable.



**Figura 6.** Casa con panel solar para calentar alberca.

g) Luz solar: Algunas lámparas pueden almacenar energía del Sol. Estas luces son llamadas luz de día. Almacenan energía durante el día y la liberan durante la noche, con este tipo de lámparas muchos locales pueden ahorrar costos, una ventana de oportunidad para restaurantes.



**Figura 7.** Lámpara que funciona con panel solar.

h) Automóviles solares: Los paneles solares se pueden instalar en automóviles que absorben la luz del sol durante el día y la convierten en energía eléctrica. Este tipo de vehículos se llaman carros solares. La energía eléctrica que se genera se almacena en baterías dentro del carro. Debido a esta habilidad los carros también pueden usarse durante la noche.



*Figura 8. Vehículo con panel solar.*

i) Aplicaciones remotas: Varios edificios en lugares remotos hacen uso del poder eléctrico generado al cosechar la energía solar. Estos edificios usan esta energía a una escala importante.

Existen escuelas, clínicas y salones comunitarios que toman estos paneles solares junto con baterías para llevarlas a dónde se requiera.

j) Satélites: Las comunicaciones satelitales necesitan una fuente de poder eléctrico que sea ligera, dure por muchos años y funcione bien en el vacío del espacio. La energía solar es abundante en la atmósfera terrestre, por lo que las celdas fotovoltaicas han probado ser una solución ideal para darle poder a los satélites.



*Figura 9. Satélite con celdas solares.*

Las celdas solares de perovskita son muy importantes para la comercialización de celdas solares en los próximos años, debido a su alta eficiencia. Sin embargo, algunos problemas se necesitan resolver antes de ser comercializadas como lo son la toxicidad, la durabilidad y que sea de precio accesible. Hasta el momento la eficiencia más alta se ha logrado en perovskitas que usan plomo, por lo que su utilización está restringida debido a su naturaleza tóxica. Pero al lograr una manera efectiva de evitar riesgos toxicológicos, no cabe duda de que se comercializará de una manera exponencial.

## REFERENCIAS

- [1] Seelam Prasanthkumar, Lingamallu Giribabu, (2016). "Recent advances in Perovskite-Based Solar Cells", *Journal of Current Science*, Vol. 111, 1173-1181.
- [2] Ao Zhang, Yunlin Chen, Jun Yan, (2016). "Optimal Design and Simulation of High-Performance Organic-Metal Halide Perovskite Solar Cells", *Journal of Quantum Electronics*, Vol. 52, 90-96.
- [3] Steve Albrecht, Michael Saliba, Juan Pablo Correa Baena, Felix Lang, Lukas Kegelmann, Mathias Mews, Ludmilla Steier, Antonio Abate, Jorg Rappich, Lars Korte, Rutger Schlatmann, Mohammad Khaja Nazeeruddin, Anders Hagfeldt, Michael Grätzel, Bernd Rech, (2016) " Monolithic Perovskite/Silicon-Heterojunction Tandem Solar Cells Processed at Low Temperature", *Journal of Energy and Environmental Science*, Vol. 9, 81-88.
- [4] Usha Mandadapu, S. Victor Vedanayakam, K. Thyagarajan, (2017) "Simulation and Analysis of Lead based Perovskite Solar Cell using SCAPS-1D", *Indian Journal of Science and Technology*, Vol. 10, 65-72.
- [5] Mohammad I. Hossain, Fahhad H. Andrabi, Nouar Tabet, (2015) "Copper Oxide as inorganic hole transport material for lead halide perovskite based solar cells", *Journal of Solar Energy*, Vol. 120, 370-380.
- [6] Navneet Kour, Rajesh Mehra (2017) "Recent Advances in Photovoltaic Technology based on Perovskite Solar Cell- A Review", *International Research Journal of Engineering and Technology*, Vol. 4, 1284-1296.

## ¿Cómo se mide la radiación térmica?

J.O. Aguilar<sup>1</sup>, R. Castrejón<sup>2</sup>, O.A. Jaramillo<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidad de Quintana Roo, División de Ciencias e Ingeniería,  
Chetumal, Quintana Roo 77019, México.

<sup>2</sup>Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, Tonantzintla, Puebla 72840, México.

<sup>3</sup>Instituto de Energías Renovables, UNAM. Temixco, Morelos 62580, México.

ovidio@uqroo.edu.mx, rcg@ier.unam.mx, ojs@ier.unam.mx

Alguna vez te has preguntado ¿Qué es la radiación térmica? y ¿Cómo se mide?

La radiación térmica es la transmisión de calor entre dos cuerpos los cuales, en un instante dado, tienen temperaturas distintas, sin que entre ellos exista contacto ni conexión por otro sólido conductor. Sin embargo, antes de enfocarnos en la medición de la radiación térmica, hablaremos un poco sobre el espectro electromagnético, en donde se encuentra incluida la radiación térmica. Se denomina espectro electromagnético a la distribución energética del conjunto de las ondas electromagnéticas, como se puede observar en la **Figura 1**. Cada cuerpo tiene un espectro de radiación electromagnética específico, tanto para la radiación electromagnética que absorbe como la que emite

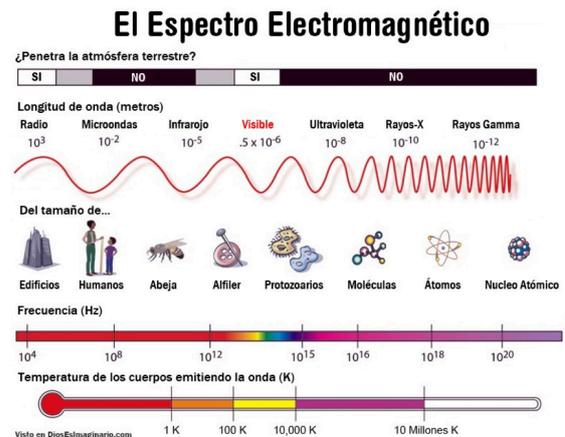


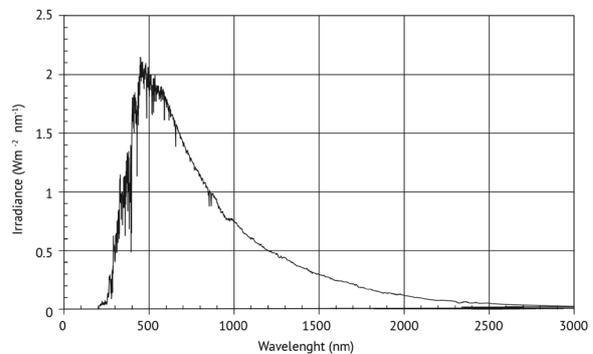
Figura 1. Espectro electromagnético [1].

y esto se utiliza para identificarlo de forma análoga a una huella dactilar [1], clasificándose se por su frecuencia, la cual consiste en , el número de repeticiones por unidad de tiempo. La radiación electromagnética de interés para aplicaciones del uso de la

energía solar, es la comprendida en el intervalo de 250 a 2500 nm, la cual conocemos como irradiancia solar, como se observa en la **Figura 2**. Este espectro de radiación electromagnética se divide en tres partes, de los 250 a los 380 nm se conoce como radiación solar ultravioleta; de los 380 a los 780 nm como radiación solar visible y de los 780 a los 2500 nm, radiación solar infrarroja.

### Las radiaciones benéficas y perjudiciales en la vida.

La radiación ultravioleta es la que más daño ocasiona al ser humano, porque es la principal causa del cáncer en la piel, envejecimiento prematuro, cataratas en ojos y supresión inmune [2]. La radiación visible, aunque tiene una carga energética considerable, es la que permite que la fotosíntesis se lleve a cabo, además de permitirnos observar la naturaleza y todo lo que nos rodea. La radiación térmica es la comprendida en el rango de longitudes de onda de 0,1  $\mu\text{m}$  a 1000  $\mu\text{m}$ , abarcando por tanto la región infrarroja del espectro electromagnético, la región, visible y la ultravioleta. Ahora bien,



**Figura 2.** Distribución espectral de la radiación solar extraterrestre que llega a la superficie de la Tierra. [2].

¿por qué es importante medir la intensidad de la radiación térmica? vamos a poner un ejemplo sencillo a continuación. Durante un día de verano salimos muy temprano de casa dejándola cerrada, pero con las cortinas abiertas en la ventana por donde recibe mayor incidencia solar. Al regresar por la tarde nos damos cuenta que la temperatura en nuestra casa se incrementó considerablemente y nos preguntamos, ¿a qué se debe esto? Lo que sucede es que la radiación solar que llega a la Tierra esta contenida en el intervalo de 250 a 3000 nm, como se mencionó anteriormente y el vidrio de la ventana es transparente a la mayor parte de esta radiación. Por ejemplo, un vidrio claro de 6 mm deja pasar aproximadamente un

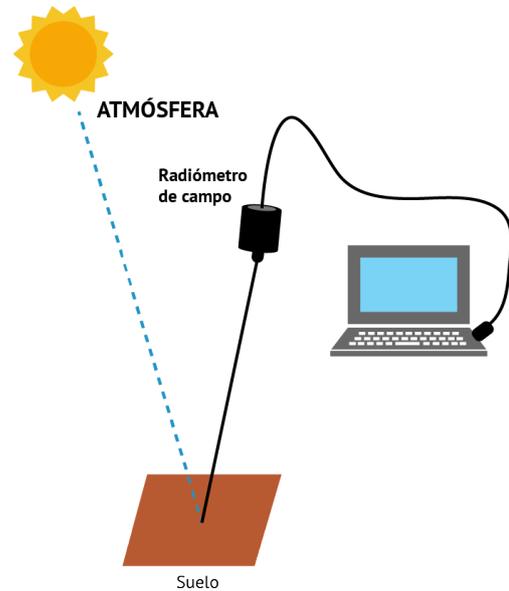
80% de la radiación solar que incide en éste. Cuando esta lo atraviesa e incide en el piso, paredes y muebles en general que están dentro de la casa, éstos aumentan su temperatura y emiten radiación electromagnética de onda larga ( $>$  a 3000 nm), la cual no puede atravesar el vidrio para poder salir, ya que este es opaco a longitudes de onda mayores a 3000 nm. Por tanto, la radiación electromagnética emitida por los cuerpos que están en el interior de la casa, ocasionan un incremento de la temperatura a causa de un fenómeno que conocemos como efecto invernadero, es decir, la energía térmica queda atrapada en la casa. Es importante mencionar que esta no es la principal causa de que la temperatura en la casa se incremente, también se debe considerar la ganancia de calor a través de paredes y techo y a las nulas corrientes de aire en la casa, porque se encuentra cerrada.

### **Midiendo la radiación térmica de los cuerpos**

Una vez explicado lo anterior, ahora sí, ya podemos enfocarnos en la medición de la radiación térmica de los cuerpos, caso específico de cuerpos altamente radiativos, como el Sol, con el objetivo de saber como interactúan con el medio que los rodea. Por ejemplo, en aplicaciones el

área de la solar térmica, la cual aprovecha la radiación solar para convertirla en energía térmica, es necesario utilizar materiales que tengan una alta absorción de la radiación electromagnética y una baja emisión, para lograr una mayor eficiencia térmica en la conversión de energía. La radiación térmica se mide con unos dispositivos llamados radiómetros, aparatos que se usan para medir el flujo radiativo emitido por cuerpos radiantes como hornos, calderas, cámaras de combustión, lámparas, y suelos entre otros objetos. Esta radiación está relacionada de manera específica con los radiómetros ópticos que se usan para la medición de flujos radiativos provenientes de fuentes a muy alta temperatura como el Sol u otras fuentes altamente radiativas. Su funcionamiento consiste en apuntar el radiómetro sobre el objeto a medir, por ejemplo un panel fotovoltaico, entonces, la radiación térmica emitida por dicho objeto es captada por el radiómetro, que en el caso de los radiómetros ópticos, ésta radiación se dirige mediante espejos a una detector, por ejemplo una termopila. Esta convierte la radiación electromagnética en una fuerza electromotriz (fem), que es directamente proporcional a la potencia del flujo radiativo que interesa medir. En la **Figura 3**. se muestra el esquema básico de medición de un radiómetro VNIR (mide en la región

del espectro visible e infrarrojo cercano). En este caso el detector termopila se encuentra dentro del radiómetro, así como un circuito electrónico que se encarga de convertir la fem generada por el detector termopila en un valor del flujo radiativo que puede observarse en una computadora o dispositivo móvil. Existen radiómetros que al medir flujos radiativos de fuentes a muy alta temperatura, presentan una salida no lineal en la fem que producen los detectores, ocasionando errores en la medición. Por lo anterior, el equipo formado por el Dr. Rafael Castrejón, el Dr. Oscar Jaramillo y el Dr. Jorge Aguilar, se dieron a la tarea de diseñar de un radiómetro óptico lineal para la medición de altos flujos radiativos, el cual se encuentra en proceso de patente.



*Figura 3. Esquema básico de medición de un radiómetro VNIR. [3]*

## Agradecimientos

El Dr. J.O. Aguilar agradece al proyecto 271615 Red Temática de Energía Solar el apoyo otorgado para realizar una estancia de movilidad académica en el Instituto de Energías Renovables de la UNAM.

## REFERENCIAS

[1] <http://www.astrofiscayfisica.com/2012/06/que-es-el-espectro-electromagnetico.html>

[2] <https://espanol.epa.gov/espanol/efectos-de-la-radiacion-uv-en-la-salud>

[3] <http://www.mapfre.com/fundacion/html/revistas/seguridad/n128/es/articulo1.html>



# Nano-Películas delgadas por ALD

## Aplicaciones en la industria

*Jorge Adolfo Jurado González<sup>1,2</sup>, Nicola Radnev Nedev<sup>3</sup>, Hugo Tiznado Vázquez<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Posgrado en Nanociencias, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Carretera Tijuana-Ensenada 3918, Fraccionamiento Zona Playitas, 22860 Ensenada, Baja California, México.

<sup>2</sup>Centro de Nanociencias y Nanotecnología, Universidad Nacional Autónoma de México, Carretera Tijuana-Ensenada km107, Playitas, 22860 Ensenada, Baja California, México.

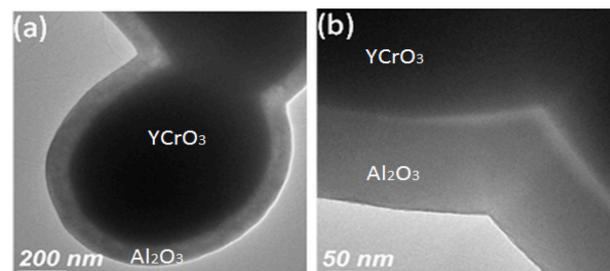
<sup>3</sup>Instituto de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California, Blvd. Benito Juárez y calle de la Normal s/n Col. Insurgentes Este, C. P. 21280 Mexicali, Baja California, México.

Haz escuchado el término “película delgada”, “ALD” y no tienes idea a que se refiere, ¡Este artículo es para ti! Desarrollaremos de una manera sencilla el concepto básico de película delgada, como se fabrica y sus aplicaciones.

### Películas delgadas

Una película delgada también, conocida como lámina delgada, película fina o laminado, es una capa de algún material con un espesor que puede variar desde fracciones hasta decenas de nanómetros. Entonces

con esta definición podemos describir una película delgada como un “nanorecubrimiento” que se crece sobre otro material normalmente llamado “sustrato” (**Figura 1.**)



**Figura 1.** Imagen SEM a) película delgada de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  sobre un sustrato de  $\text{YCrO}_3$ , b) Se observa que el recubrimiento sigue fielmente la estructura del sustrato (Tiznado et al., 2014).

Existen diferentes técnicas para fabricar este tipo nanomateriales, principalmente se dividen en métodos físicos y químicos. Entre los métodos físicos, destaca la técnica depósito por láser pulsado (PLD, por sus siglas en inglés) y pulverización catódica (“*Sputtering*”), mientras que en los métodos químicos existen técnicas como depósito químico de vapor (CVD, por sus siglas en inglés) y depósito por capa atómica (ALD, por sus siglas en inglés). Esta última se destaca por mantener un control preciso del espesor, uniformidad, calidad del material y además ofrece la posibilidad de recubrir una gran cantidad de sustratos a la vez, es decir, es fácilmente escalable.

Para comprender el fundamento de la técnica, se debe describir con mayor detalle el término: “**Ciclo ALD**” (*Figura 2.*) El crecimiento de la película se lleva a cabo a través de un procedimiento repetitivo, que consta de cuatro pasos principales:

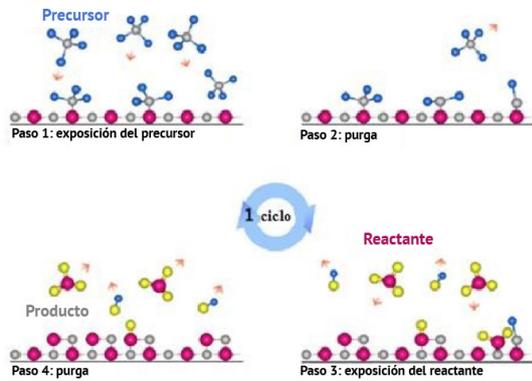
**1. Exposición del precursor.** En esta etapa se dosifica el reactor con una cantidad específica de precursor (compuesto químico que contiene el metal a depositar) en estado gaseoso. Aquí ocurre la quimisorción, es decir cuando

una molécula del precursor se aproxima e interacciona con las moléculas de la superficie del sustrato y dan lugar a una nueva especie química.

**2. Purga del precursor no adsorbido.** Durante esta etapa se lleva a cabo una purga del sistema por medio del arrastre con gas inerte y vacío para desechar el exceso de precursor (en fase gas) no adsorbido, evitando la contaminación con especies químicas no deseadas y permitiendo el crecimiento homogéneo de la película.

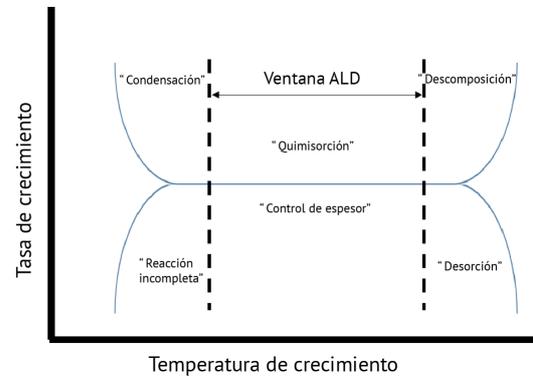
**3. Exposición del reactante.** En esta parte del ciclo se dosifica el reactante (agente oxidante en la *Figura 2.*) para inducir la reacción química con las moléculas del precursor que previamente interaccionaron y se adhirieron a la superficie del sustrato (paso 1).

**4. Purga del reactante en exceso y productos reacción (en fase gas).** Nuevamente se purga el reactor con gas inerte para desechar tanto el exceso de reactante como los productos secundarios de la reacción en la superficie. El producto principal permanece sobre el sustrato (fase sólida).



**Figura 2.** Esquema de los cuatro pasos principales que componen un Ciclo ALD (Kim, Lee, & Maeng, 2009).

ALD ofrece una amplia gama de materiales para depositar (óxidos, nitruros, sulfuros, etc.), Actualmente existen más de 300 precursores químicos estudiados y disponibles comercialmente para realizar nanorecubrimientos por ALD. Un problema que se presenta al momento de crecer una película por ALD con un nuevo precursor, es que no se conocen sus **parámetros** de depósito: tiempo de dosificación de precursor, purga, presión, temperatura. Estos parámetros se obtienen



**Figura 3.** Esquema de los cuatro pasos principales que componen un Ciclo ALD (Kim, Lee, & Maeng, 2009).

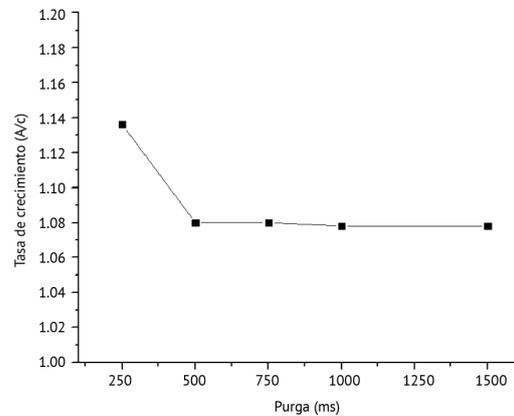
por medio de la “Ventana ALD” (**Figura 3.**) La Figura 3. muestra los diferentes procesos que se pueden llevar a cabo durante el depósito por ALD. Se le llama “ventana ALD” donde existe un control preciso del espesor debido a que los parámetros mencionados anteriormente son ideales para realizar el depósito. Si existen temperaturas por debajo de la ventana ALD, puede ocurrir que se tenga una reacción incompleta, o un proceso de condensación, por lo tanto, no se tiene un control del espesor. Por otra

parte, si se aumenta la temperatura en exceso, puede ocurrir un proceso de descomposición o desorción de precursor, perdiendo el control del espesor o aumentando el número de contaminantes en la película.

## Detrás de la curva de saturación

Una forma sencilla para encontrar el tiempo de purga de precursor es mediante un experimento denominado “Curva de saturación”. Este consiste en dosificar y purgar precursores a diferentes tiempos, determinando el espesor obtenido. Cuando el espesor sea independiente del tiempo de dosis y purga, se han encontrado los parámetros ideales.

Por ejemplo, para determinar el tiempo adecuado de purga para trimetilaluminio (TMA) y agua, precursores de óxido aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), se realizaron 100 ciclos ALD a  $100\text{ }^\circ\text{C}$  en un reactor Beneq TFS200 (equipo localizado en CNYN-UNAM, Ensenada). En cada depósito el **tiempo de purga** de TMA fue incrementando desde 300 hasta 1500 milisegundos (**Figura 4.**) El espesor de la película resultante se determinó mediante la técnica de elipsometría, utilizando un sistema M-2000 horizontal de J.A. Woolam Co. (equipo localizado en el Instituto de Ingeniería de la UABC, campus Mexicali).



**Figura 4.** Curva de saturación para TMA a  $100\text{ }^\circ\text{C}$ .

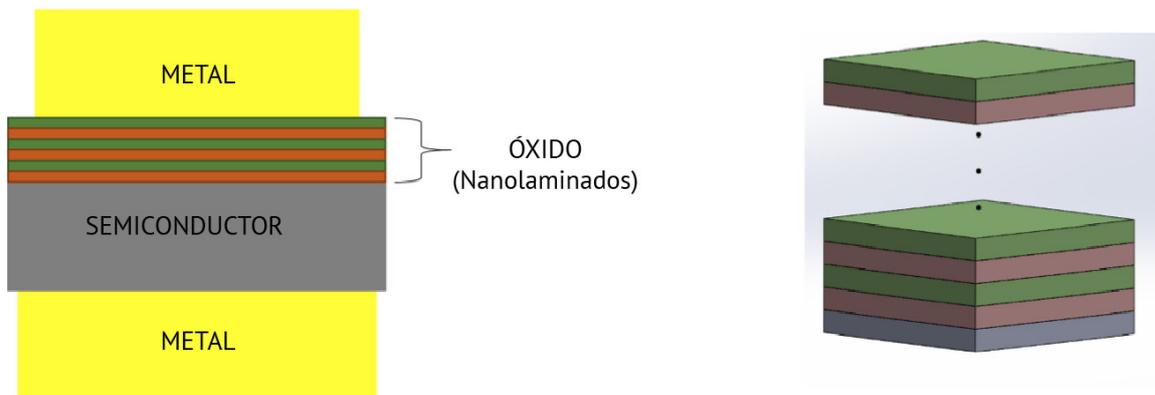
Se puede observar que el espesor es constante a partir de 500 ms de purga de TMA, con una tasa de crecimiento de  $1.08\text{ \AA/ciclo}$ .

## Fabricando celdas fotovoltaicas con películas delgadas

Hoy en día el campo de aplicación de películas delgadas es muy amplio, por ejemplo, en la fabricación de celdas fotovoltaicas, pantallas, sensores, componentes ópticos (lentes, espejos, vidrios), microelectrónica, herramientas de corte para aumentar su dureza y resistencia, entre muchas otras aplicaciones. En los últimos años, en el área de almacenamiento de energía se han utilizado películas delgadas para fabricar capacitores metal-óxido-semiconductor (MOS), donde

el óxido se reemplaza por nanoestructuras en forma de multicapas (nanolaminados), es decir capas de diferentes materiales apiladas una sobre otra (**Figura 5.**) La selección de estos materiales, se basa en materiales de una alta constante dieléctrica ( $k$ ), preferentemente, superior a la del óxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ). Un ejemplo claro es el óxido de zirconio ( $\text{ZrO}_2$ ) con una constante dieléctrica de 25. Sin embargo, uno de los problemas que

se presentan al trabajar con  $\text{ZrO}_2$ , este permite corrientes de fuga demasiado altas cuando el material se cristaliza. Para prevenir este problema, se ha propuesto que la combinación de este material con óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) disminuye la cristalización. Por lo tanto, una manera de aprovechar estas propiedades es fabricar nanolaminados ( $\text{ZrO}_2$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), variando la relación del espesor de las multicapas.



**Figura 5.** Esquema de un capacitor MOS con nanolaminados, sustrato de color gris, óxido A rojo, óxido B verde, donde A y B son óxidos diferentes.

## Agradecimientos

A la Red Temática de Energía Solar del CONACyT, por su financiamiento para la realización de la estancia de investigación en el Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California. A DGAPA-UNAM por el apoyo brindado en los proyectos IT100314, IN107715, IN112117, PE101517 y PE101317. Al Dr. Hugo Borbón Nuñez por su apoyo en los diferentes proyectos. Al Dr. Javier López Medina por su apoyo en la síntesis y caracterización de películas delgadas por ALD. Al M.C. David Domínguez por su apoyo para el desarrollo de este proyecto.

## REFERENCIAS

Kim, H., Lee, H., & Maeng, W. (2009). Applications of atomic layer deposition to nanofabrication and emerging nanodevices, *517*, 2563–2580. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2008.09.007>

Saleem, M. R., Ali, R., Khan, M. B., Honkanen, S., & Turunen, J. (2014). Impact of Atomic Layer Deposition to Nanophotonic Structures and Devices. *Frontiers in Materials*, *1*, 18. <https://doi.org/10.3389/fmats.2014.00018>

Tiznado, H., Domínguez, D., Muñoz-Muñoz, F., Romo-Herrera, J., Machorro, R., Contreras, O. E., & Soto, G. (2014). Pulsed-bed atomic layer deposition setup for powder coating. *Powder Technology*, *267*, 201–207. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.07.034>

## Desarrollo de la metodología de Depósito Atómico en Capas en México

*José Luis Cervantes<sup>1</sup>, Ricardo Rangel<sup>2</sup>, Juan José Alvarado<sup>3</sup>*

*<sup>1</sup>Estudiante del programa de Doctorado en Ciencias en Ingeniería Química, División de estudios de posgrado, Facultad de Ingeniería Química, Universidad Michoacana de S.N.H., Morelia, Michoacán, México.*

*<sup>2</sup>División de estudios de posgrado, Facultad de Ingeniería Química, Universidad Michoacana de S.N.H., Morelia, Michoacán, México.*

*<sup>3</sup>Departamento de Física Aplicada, CINVESTAV-Unidad Mérida, Mérida Yucatán, México.*

Existe una demanda creciente por el empleo de energías renovables, las cuales incluyen el desarrollo en áreas como la energía eólica, termoeléctrica, hidráulica, geotérmica, fotovoltaica, entre otras. La energía solar tiene ventajas sobre otras, pero para su aprovechamiento presenta varias dificultades. Entre sus atributos se destaca principalmente su naturaleza inagotable, renovable y su utilización libre de afectación al medio ambiente. Sin embargo, algunos

de los obstáculos que se presenta para su empleo son: su naturaleza intermitente, su variabilidad fuera de control y su baja densidad de potencia. Estas dificultades nos orillan a la transformación de la energía para su almacenamiento y posterior uso.

Para contrarrestar estas desventajas, se han encaminado esfuerzos para incrementar el empleo de metodologías basadas en estructuras diseñadas a escala nanométrica,

que involucran a la nanotecnología. Una de estas tecnologías son las celdas solares, las cuales son sistemas fotovoltaicos que convierten directamente parte de la luz solar en electricidad. Estas están compuestas de la misma clase de materiales semiconductores que se usan en la industria microe-

lectrónica [1]. Dentro de la construcción de las celdas solares existen diferentes estructuras de materiales para su síntesis, en las que podemos encontrar: a) óxido de silicio, b) sulfuro de cadmio, c) telurio de cadmio, d) híbridos que incluyan materiales amorfos y cristalinos, e) películas delgadas.



*Figura 1. Ejemplo de celda solar.*

Una de estas tecnologías son las celdas solares, las cuales son sistemas fotovoltaicos que convierten directamente parte de la luz solar en electricidad. Estas están compuestas de la misma clase de materiales semiconductores que se usan en la industria micro electrónica [1].

Dentro de la construcción de las celdas solares existen diferentes estructuras de materiales para su síntesis, en las que podemos encontrar: a) óxido de silicio, b) sulfuro de cadmio, c) telurio de cadmio, d) híbridos que incluyan materiales amorfos y cristalinos, e) películas delgadas.

Considerando el desarrollo en la fabricación de películas delgadas, existe un auge en la técnica denominada depósito atómico en capas (*ALD*, por sus siglas en inglés) debido al potencial de sus posibles aplicaciones. Ésta es una técnica de crecimiento, que de forma secuencial permite obtener materiales con un control preciso en cuanto a su espesor y composición química, además de garantizar la homogeneidad de la superficie y su autolimitación permite el ensamble de multicapas in situ, logrando acoplar capas individuales de diferentes materiales, pudiendo alternarlos entre sí, conservando

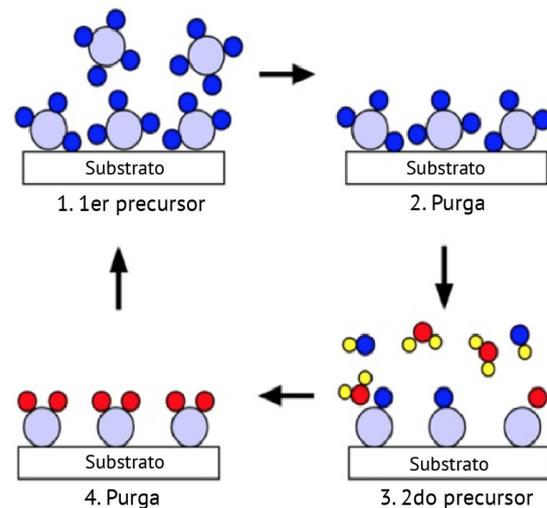
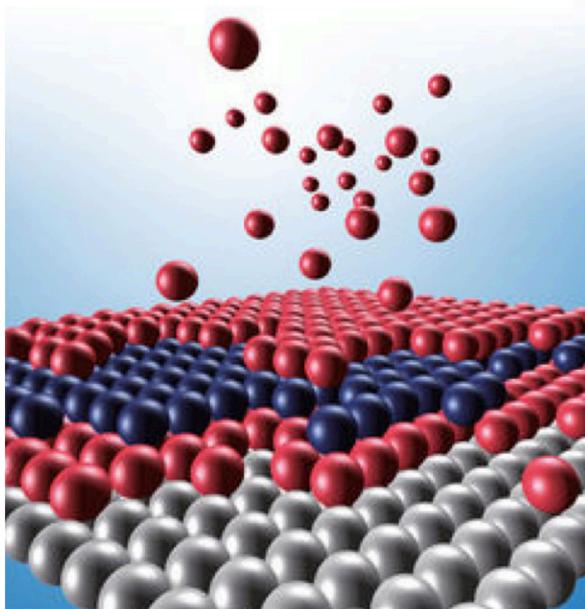


Figura 2. Etapas principales de ALD.

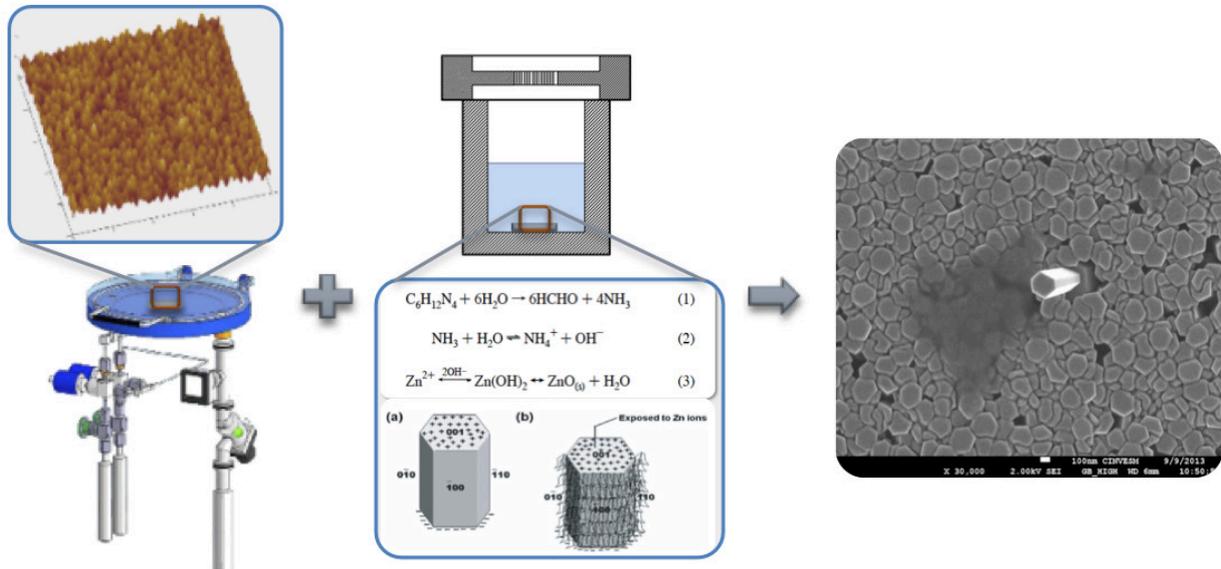
los espesores requeridos. La técnica consiste en una secuencia de ciclos que constan de cuatro pasos, en cada paso se expone el precursor hasta saturar la superficie con una capa mono-molecular del mismo. Los vapores de origen son pulsados en el reactor alternadamente, uno por uno, separados por periodos de purga y evacuación; lo cual da como resultado un sistema de auto-limitación para el crecimiento de cada película (ver **Figura 2.**) De esta forma se obtienen materiales con características ventajosas tales como uniformidad, crecimiento a bajas temperaturas, con un espesor pequeño y preciso.



*Figura 3. Capas individuales a través de ALD  
Figura tomada del libro: Atomic Layer Deposition of  
Nanostructured Materials.*

En México el desarrollo y aplicación de esta técnica es relativamente reciente. Sin embargo, existen varios grupos de trabajo que incluyen el Centro de Investigación en Materiales Avanzados unidad Monterrey (CIMAV-Monterrey), la Universidad

Autónoma de Nuevo León, el Centro de Nanociencias y Nanotecnología (CNyN-UNAM), la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, el Centro de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional en sus unidades de Querétaro, Querétaro y en Mérida, Yucatán. Así mismo, la Universidad de Sonora y la Universidad Michoacana. Consideramos que esta técnica se encuentra en etapas iniciales de su desarrollo en México; sin embargo, el ritmo de publicaciones a nivel internacional de los grupos mencionados, es un buen augurio de que esta técnica habrá de proveer un desarrollo científico maduro, pasando a las aplicaciones tecnológicas en un corto tiempo. En el caso particular de la Universidad Michoacana, se han realizado ahí estudios que incluyen el crecimiento de estructuras de óxido de zinc y de fases impurificadas del mismo,  $ZnInO$ ,  $ZnCeO$  con el propósito de desarrollar películas delgadas con espesores y composición específica con propiedades fotoluminiscentes o sensoras de gases.



*Figura 4. Método mixto ALD-Solvotérmico.*

En la **Figura 4.** se muestran las imágenes de las nanoestructuras en forma de barras, con una forma superior hemiesférica; las cuales se prepararon empleando un método mixto de depósito atómico en capas y un posterior tratamiento solvotérmico que promueve un crecimiento epitaxial. En este caso, se ha producido una semilla inicial compuesta por óxido de

zing (ZnO) y posteriormente, se ha llevado a cabo una impurificación con el elemento cerio, con la finalidad de lograr modificar sus propiedades fisicoquímicas y electrónicas. De manera paralela se logra modular, a su vez con la incorporación del cerio el valor energético de la banda prohibida (gap) del ZnO al preparar el compuesto  $\text{Zn}_{0.98}\text{Ce}_{0.02}\text{O}$ .

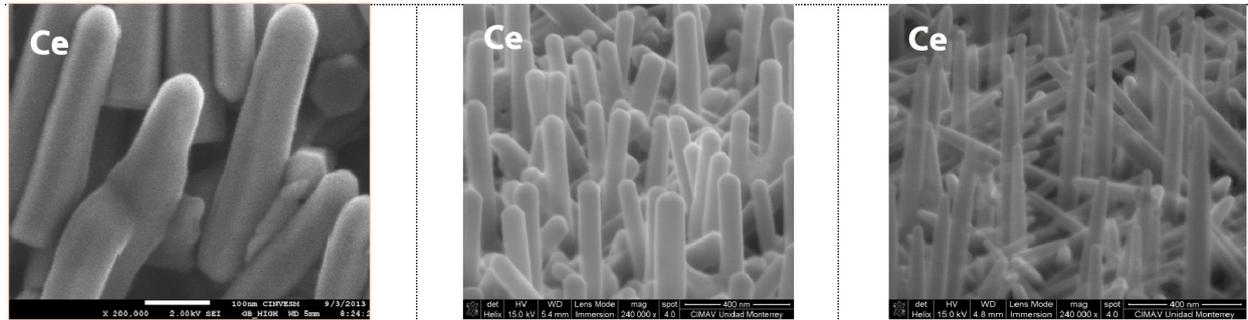


Figura 5. Método mixto ALD-Solvotérmico.

Las estructuras resultantes en este caso son barras con diámetro y tamaño controlado de acuerdo a las condiciones del proceso particular las cuales involucran variables tales como temperatura, presión del sistema y concentraciones de los reactivos involucrados.

A través del procedimiento de crecimiento de estructuras mediante la técnica ALD, es posible obtener inicialmente estructuras con composiciones y espesores adecuados que poseen un espectro de aplicación amplio. También se obtiene la síntesis de

películas delgadas de gran calidad y con características adecuadas para aplicación en el campo de las celdas solares, sensores de gases. Así mismo, películas con propiedades ópticas específicas, buscando reducir los costos, fácilmente reproducibles; además de mejorar el rendimiento de las mismas. En México, esta técnica y sus posibles aplicaciones tecnológicas, se encuentran en una etapa de crecimiento sostenido, de lo cual se espera que en años próximos den lugar a la generación de patentes y procedimientos novedosos.

## Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo de la Red de Energía Solar. Por su apoyo y colaboración a los técnicos académicos Wilian Cahuich, Dora Huerta, Daniel Macías y Beatriz Heredia, adscritos al CINVESTAV-Unidad Mérida.

## REFERENCIAS

[1] Guozhong Cao, Ying Wang. Nanostructures and Nanomaterials: Synthesis, Properties, and Applications. World Scientific Publishing Co Pte Ltd. 04 Jun 2011. Singapore, Singapore. 2nd Revised Edition.

[2] Paul T. Craddock. Zinc in classical antiquity, 2000 years of zinc and brass. London British Museum. 1990. ISBN 0861591240

[3] J. S. Kharakwal and L. K. Gurjar. Zinc and Bass in Archeological Perspective. Ancient Asia. Vol 1, 2006. 139-159.

[4] S. K. Patra and P. Roy Chaudhuri. Pijus Kanti Samanta, "Green Photoluminescence from Chemically Synthesized Zinc Oxide Nanostructures.," *International Journal Of Materials Sciences.*, pp. 239-242, noviembre 2009.

[5] Rodolfo Zanela, "Metodologías para la síntesis de nanopartícula controlando forma y tamaño," *Mundo Nano*, vol. 5 no.1, Ene-Jun 2012.

[6] Sang Eun Park, Jung Chul Lee and Pung Keun Song. Se Hun Park, "Photoluminescence Characterization of Al-doped ZnO films Deposited by Using DC Sputtering.," *Journal Of The Korean Physical Society*, pp. 1344-1347, marzo 2009.

[7] R.Rangel, L.Chávez Chávez, E.Martinez, P. Bartolo-Pérez, Structural and transport properties study of nanostructured CeO<sub>2</sub>, Ce<sub>1-x</sub>RuxO<sub>2</sub> and Ce<sub>1-x</sub>InxO<sub>2</sub> thin films, *Phys. Status Solidi B*, Vol. 249, No. 6, 1199–1205, 2012.



## ¿En qué consiste la técnica de depósito atómico en capas?

*José Luis Cervantes<sup>1</sup>, Ricardo Rangel<sup>2</sup>, Juan José Alvarado<sup>3</sup>*

*<sup>1</sup> Estudiante del programa de Doctorado en Ciencias en Ingeniería Química, División de estudios de posgrado, Facultad de Ingeniería Química, Universidad Michoacana de S.N.H., Morelia, Michoacán, México.*

*<sup>2</sup> División de estudios de posgrado, Facultad de Ingeniería Química, Universidad Michoacana de S.N.H., Morelia, Michoacán, México.*

*<sup>3</sup> Departamento de Física Aplicada, CINVESTAV-Unidad Mérida, Mérida Yucatán, México.*

En nuestra vida cotidiana, nos encontramos en contacto con materiales y tecnología de las cuales, desconocemos su procedencia. Algunos de estos materiales son producidos en forma de películas delgadas y que están ligadas a un sin fin de aplicaciones, las cuales incluyen a las películas anti-reflejantes, en lentes y parabrisas de autos, paneles fotovoltaicos; también formando parte de microcircuitos, ya sea en computadoras, pantallas de teléfonos celulares, relojes digitales, pantallas de televisores, monitores. Estas películas delgadas están constituidas con materiales con espesores muy pe-

queños, cuyas dimensiones son incluso inferiores a los micrómetros y que han sido depositadas mediante diversas técnicas. Comprender a profundidad el comportamiento, bajo ciertas condiciones, y características que presenta una película delgada es de vital importancia debido a las diferentes aplicaciones que podrían tener. La tendencia actual en la industria electrónica y de materiales, es buscar miniaturizar los dispositivos, lo cual ha llevado al extremo la precisión en las técnicas de depósito empleadas y, con el propósito de lograr un control estricto, inclusive a nivel atómico al momento de depositar las películas delgadas.



*Figura 1. Aplicaciones de películas delgadas.*

Existe una gran cantidad de técnicas disponibles para obtener películas delgadas; dependiendo de la aplicación deseada así como del tipo de sustrato empleado para lograr el depósito. Estos métodos se pueden dividir en tres grupos: métodos físicos, métodos químicos y métodos fisicoquímicos [1]. Dentro de estos, la síntesis de películas delgadas mediante el depósito atómico en capas, se puede clasificar como un método químico en fase gas. El depósito atómico en capas (ALD, por sus siglas en inglés), permite tener un control muy exacto, a nivel atómico de una película, debido a las características secuenciales de su proceso. Esta técnica fue inventada

por Suntola y colaboradores en Finlandia en 1970 [2]. La motivación detrás del desarrollo de ALD fue el deseo de hacer películas delgadas electroluminiscentes. Este método que en un principio se le llamó crecimiento epitaxial de capas atómicas (ALE), permite que las películas delgadas se depositen teniendo un control atómico en el crecimiento y composición química.

El depósito de capa atómica, es un método alternativo al de películas en fase gaseosa, basado en la reacción sobre una superficie hasta lograr saturarla. A diferencia de las técnicas de depósito de vapor químico, en la técnica de ALD, los vapores de origen son pulsados en el reactor de forma alternada, uno por uno, separados por periodos de purga y evacuación (ver *Figura 2*.) Esto da como resultado características ventajosas como uniformidad en la película, crecimiento a bajas temperaturas, y producir un espesor pequeño y preciso [3]. En el método de ALD, el crecimiento de la película se lleva a cabo de una manera cíclica. En el caso más simple, un ciclo consta de cuatro pasos:

1. La exposición del primer precursor
2. Purga de la cámara de reacción
3. La exposición del segundo precursor
4. Purga o evacuación.

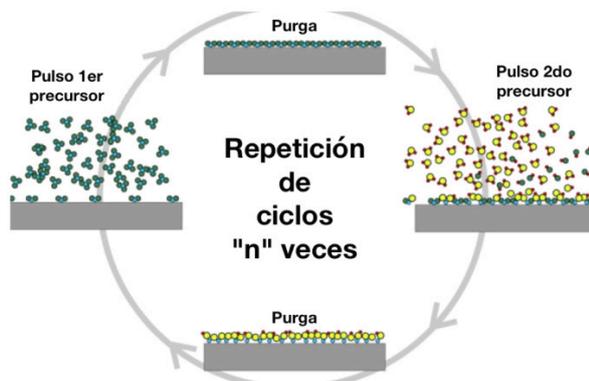


Figura 2. Etapas principales de ALD.

A medida que el crecimiento de la película procede de una manera espontánea, cada ciclo deposita la misma cantidad de material, y por lo tanto el espesor de la película puede ser controlado con precisión, simplemente por el número de ciclos de depósito. En régimen de ALD, las películas adoptan la forma de la superficie del sólido con el que reaccionan (conformalidad), esto se logra a través de la técnica de ALD con la cual es posible recubrir sustratos con características topográficas en su superficie, tales como relieves y vados que son propios de la naturaleza del material

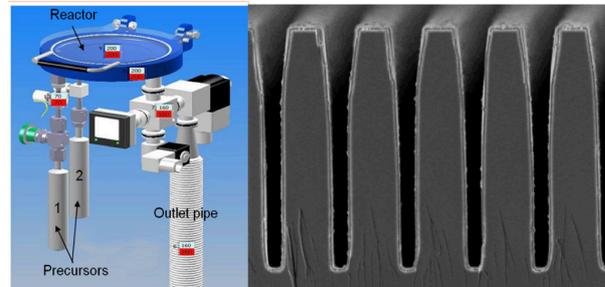


Figura 3. Reactor ALD y ejemplo de superficie recubierta.

recubierto. La química de los precursores utilizados en las reacciones de ALD juega un papel clave en la generación de la película. Los precursores deben de presentar las siguientes características: ser volátiles, reactivos y térmicamente estables; estos pueden ser gases, líquidos o sólidos. Éstos deben reaccionar rápidamente y agresivamente entre sí con los grupos superficiales. De esta manera, es posible alcanzar la etapa de saturación en un tiempo corto (menos de 1 s), asegurando una velocidad de depósito razonable [4]. Además de las tres características esenciales de un precursor de ALD, se debe considerar una serie de factores, tales como la disponibilidad, costo, facilidad de manejo, la presencia

de elementos no deseados y su impacto en la tasa de crecimiento de la película. Junto a lo anterior, es deseable que los reactivos utilizados no generen problemas de seguridad ambiental y de salud. El interés por ALD ha aumentado constantemente en las últimas dos décadas, tanto desde el punto de vista tecnológico como desde el punto de vista de las aplicaciones. La investigación activa que se está llevando a cabo actualmente es hacia el desarrollo de nuevos materiales que puedan ser aplicados en actividades relacionadas con la energía y el medio ambiente. El

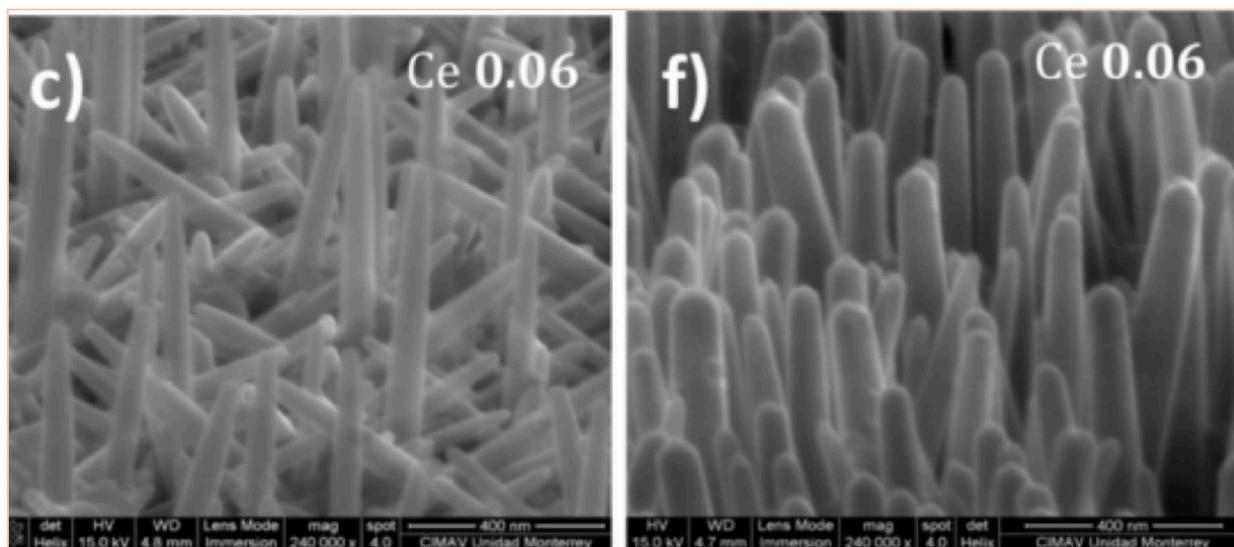
control del crecimiento de una capa de un material dado, a escala atómica es el desafío del futuro inmediato. El número creciente de estudios reportados en la fabricación de nanoestructuras con una forma definida controlando perfectamente sus dimensiones abre una puerta significativa para esta técnica [5]. La fabricación a escala industrial es un reto crucial que se plantea a la técnica ALD, y que podría ser superada mediante ampliación o aceleración de los procesos de síntesis; lo que puede dar lugar a nuevas áreas de investigación que podrían beneficiar a la humanidad.



*Figura 3. Aplicaciones de la técnica ALD.*

Otra vertiente de las aplicaciones de ALD es la utilización como platilla para sobre esta crecer estructuras con características específicas. Un ejemplo de ello, son los estudios realizados por Shin et al. [6] donde sintetizaron plantillas a través del método ALD para la síntesis de nanotubos de óxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ), donde las dimensiones correspondientes a longitud y diámetro se encuentran controladas durante el proceso de fabricación. Otro ejemplo del empleo de ALD

como una semilla promotora, se encuentra reportado en el trabajo realizado por nuestro grupo de trabajo (J. L. Cervantes et al.) [7] en el cual se reporta el crecimiento de estructuras uni-dimensionales empleando como semilla la síntesis por medio de ALD, la cual sirve como base para crecer nanobarras hexagonales de óxido de zinc ( $\text{ZnO}$ ), impurificadas con diversos elementos incluyendo al cerio, indio con lo que se mejora su intensidad fotoluminiscente (ver **Figura 4.**)



*Figura 5. Nanobarras de ZnO crecidas por medio de ALD e hidrotérmico.*

## Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo de la Red de Energía Solar. Por su apoyo y colaboración a los técnicos académicos Wilian Cahuich, Dora Huerta, José Bante, Daniel Macías y Beatriz Heredia, adscritos al CIN-VESTAV-Unidad Mérida.

## REFERENCIAS

- [1] E. Nieto, F. Fernandez, and P. D. C. Moure, "Cerámica y Vidrio Películas delgadas : fabricación y aplicaciones," vol. 258, pp. 245–258, 1994.
- [2] M. Ritala and M. Leskeld, *ATOMIC LAYER DEPOSITION*. 2002.
- [3] N. R. Yogamalar and A. C. Bose, "Synthesis , Dopant Study and Device Fabrication of Zinc Oxide Nanostructures : Mini Review," *Progresses Nanotechnol. Nanomater.*, vol. 2, pp. 25–44, 2013.
- [4] M. Ritala, "Atomic layer deposition ( ALD ) : from precursors to thin film structures," vol. 409, pp. 138–146, 2002.
- [5] J. S. Ponraj, G. Attolini, and M. Bosi, "Review on Atomic Layer Deposition and Applications of Oxide Thin Films," *Taylor Fr.*, vol. 32, no. 9, pp. 37–41, 2013.
- [6] B. H. Shin, D. K. Jeong, J. Lee, M. M. Sung, and J. Kim, "Formation of TiO<sub>2</sub> and ZrO<sub>2</sub> Nanotubes Using Atomic Layer Deposition with Ultraprecise Control of the Wall Thickness \*\*," vol. 3, no. 14, pp. 1197–1200, 2004.
- [7] J. L. Cervantes-López et al., "Photoluminescence on cerium-doped ZnO nanorods produced under sequential atomic layer deposition?hydrothermal processes," *Appl. Phys. A*, vol. 123, no. 1, p. 86, 2017.



## La importancia de la certificación de módulos fotovoltaicos: Normas y evaluación de la conformidad

*A Sánchez-Juárez, R Santos-Magdaleno, T Ruíz Sánchez, D Martínez Escobar,  
P A Sánchez-Pérez, J Ortega-Cruz*

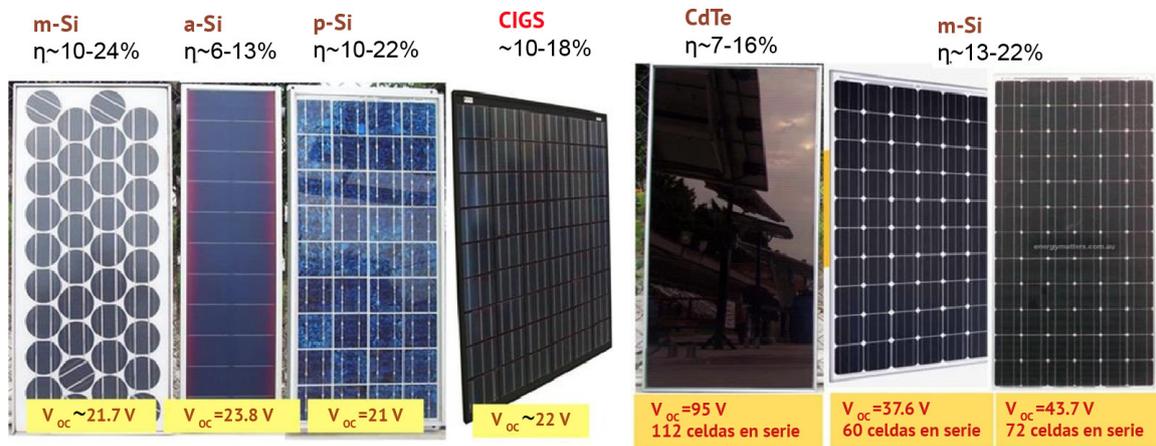
*<sup>1</sup>Unidad de Asistencia Fotovoltaica, Instituto de Energías Renovables,  
Universidad Nacional Autónoma de México  
Priv. de Xochicalco s/n, Col. Centro, CP 62580, Temixco, Morelos.*

Se considera al efecto fotovoltaico (EFV) como el proceso más limpio entre todas las tecnologías para producir electricidad. El tipo de electricidad es corriente continua y esta, se genera cuando los rayos de luz inciden sobre dispositivos optoelectrónicos citados como celdas solares, los cuales, son la unidad mínima de conversión del EFV.

Las celdas solares se construyen usando materiales semiconductores, los más comercializados en aplicaciones terrestres son: silicio mono cristalino (m-Si), silicio poli cristalino (p-Si), silicio amorfo (a-Si), telurio de cadmio (CdTe) y co-

bre-inidio-galio-selenio (CIGS). Dado que la potencia que generan las celdas solares es muy pequeña, estas se conectan en serie o en paralelo para integrar módulos fotovoltaicos (MFV), los cuales están destinados a producir energía eléctrica para abastecer las necesidades de un local, vivienda o recinto, sus características.

A continuación, se muestra la **Figura 1**, que contiene un conjunto de fotografías, a manera de ejemplo, de las diferentes tecnologías fotovoltaicas disponibles en el mercado abarcando eficiencias de conversión desde el 6% hasta el 22%.



**Figura 1.** Tecnologías fotovoltaicas disponibles en el mercado (silicio monocristalino, m-Si; silicio policristalino, p-Si; silicio amorfo, a-Si; Cobre-Indio-Galio-Selenio; CIGS; Telurio de cadmio; CdTe).

A raíz de los proyectos de promoción y fomento para implementar la tecnología fotovoltaica (TFV) para la electrificación rural que se han impulsado en nuestro país desde 1984 a la fecha, y derivado de una reducción considerable en el costo de ella, actualmente se ha observado que hay un gran incremento de instalaciones fotovoltaicas. Se pueden ver en las zonas urbanas, en luminarias de alumbrado público, en techos de estacionamiento de centros comerciales y parques recreativos, en casas habitación, en universidades, institutos y centros de investigación. Así mismo, en las zonas rurales se encuentran en aplicaciones para bombeo de agua con fines de abreviar ganado, agua potable y riego,

radio comunicación, repetidoras telefónicas, telesecundarias y señalamiento marino, entre otros...Por otra parte, como una consecuencia de que el gobierno ha implementado leyes a favor del uso de energías renovables, la nueva reforma energética y las subastas de energía realizadas en el año 2016, se han instalado en el país alrededor de 388.0 MW de potencia pico fotovoltaica, incluyendo los sistemas de pequeña, mediana escala (generación distribuida) y los sistemas de más de 0.5 MW (generadores). Según el reporte de avance de energías limpias de la SENER, la tendencia de crecimiento de las instalaciones fotovoltaicas es el que se muestra en la **Figura 2**.

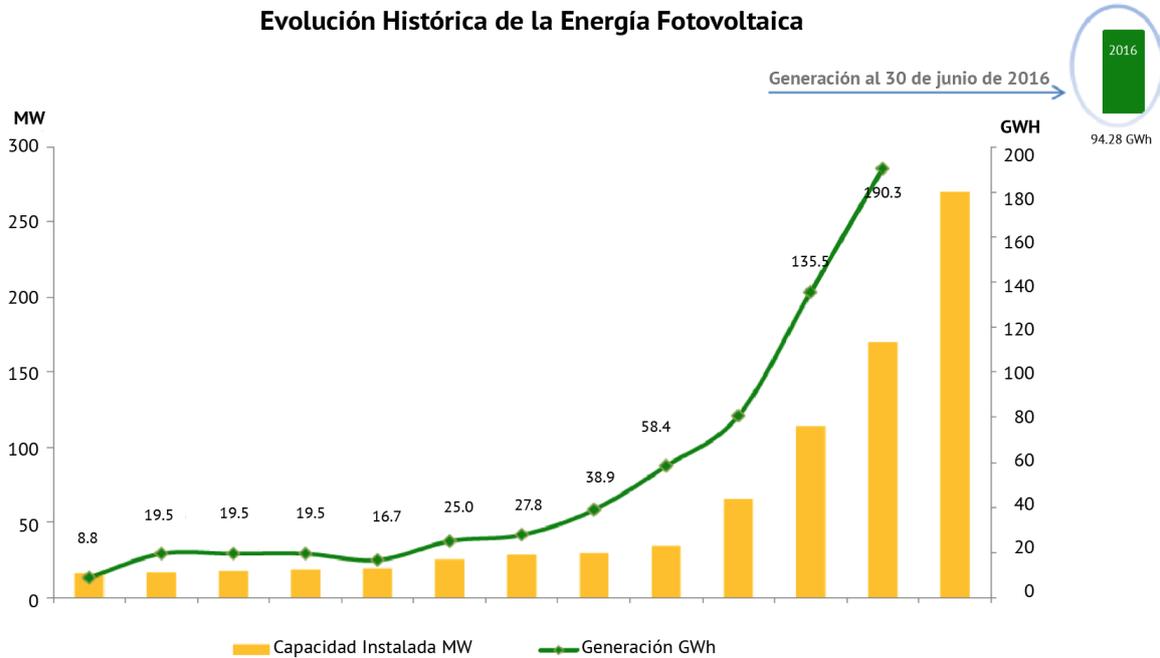


Figura 2. Evolución Histórica de la Energía Fotovoltaica. Reporte de avance de energías limpias primer semestre 2016. Pg. 19.

Sin embargo y como resultado de la 1ª. Y 2ª. Subasta Eléctrica, a inicios del 2017 se comenzaron a construir 7 grandes proyectos de Parques Solares con una potencia total de 1,739.6 MW (350 MW en El Llano, Ags.; 30.0 MW Cd. Juárez, Chih.; 231.4 en Villa Arreaga SLP; 136.2 en Hermosillo, Son.; Proyectos Villanueva con 754.0 MW en el Estado de Coahuila; y Proyecto Don José con 238.0 MW en el Estado de Guanajuato) lo cual significa que, a mediados de 2018, se tendrá una capacidad instalada superior a 2.0 GW. Además, según la Gaceta Ecológica de la SEMARNAT (2017), en el

transcurso de éste año, han sido sometidos 12 proyectos de Plantas Fotovoltaicas por un monto de 1,589 MW para su evaluación del impacto ambiental, que si son aprobadas, se tendrá para fines del 2020 una potencia instalada del orden de los 3.5 GW.

Así, encontramos que muchas empresas e Industrias mexicanas han valorado como una oportunidad de negocio este ramo, ingresando tanto en la fabricación, importación, comercialización, venta e instalación de módulos, como en los componentes complementarios del Sistema.

Según datos encontrados en la red electrónica, hay 8 empresas nacionales que fabrican módulos fotovoltaicos con una producción aproximada de 70.0 MW anuales y más de 190 comercializadores e instaladores de sistemas fotovoltaicos. De igual forma, vemos ya en los estantes de las grandes cadenas comerciales, diversos módulos fotovoltaicos disponibles a precios accesibles, de muy diversas marcas y países productores.

Los fabricantes de las tecnologías fotovoltaicas, promueven sus productos con las características de ser confiables, seguros y de larga duración, con garantías típicas de 20 a 25 años sobre su desempeño eléctrico al 80% de la potencia pico adquirida, lo que determina el concepto de ciclo de vida útil de la tecnología; y se comercializan o venden.

Sin embargo, aunque se tenga un certificado de garantía, las grandes preguntas que el usuario común se hace son: ¿Cómo saber si el MFV que se adquiere produce la potencia pico que se compra?; ¿Cómo saber si al pasar determinado tiempo de operación, el MFV produce la potencia pico esperada por la garantía?; ¿Cómo se estima la vida útil de un módulo fotovoltaico?; ¿Cuál es la

certeza sobre la seguridad eléctrica del producto? Todas estas preguntas están relacionadas con el concepto de “calidad”, por lo que ahora uno puede preguntarse lo siguiente: ¿Cómo saber si el módulo fotovoltaico que se instala es de reconocida calidad?; ¿Cómo se mide la calidad de un módulo fotovoltaico?; y para su contestación, debemos considerar el proceso de fabricación de un MFV, sus componentes, y como se debe elegir la calidad de ellas, ya que ello impactará en la calidad del producto fabricado. Independientemente de la tecnología, un MFV está integrado por un circuito eléctrico de celdas solares eléctricamente idénticas, conectadas en serie (caso común).

Como éstas son muy frágiles, debe proveérseles de un medio mecánico que les dé soporte y protegérseles del ambiente (humedad, polvo, salinidad, etc.). Para esto, se usa un vidrio templado y polímeros que permiten armar un “laminado” el que se encapsula al vacío. Dicho “laminado” se monta en un marco metálico, usualmente aluminio anodizado, que provee el medio mecánico de manejo e instalación en una estructura para su respectiva orientación e inclinación. **La Figura 3.** muestra un corte transversal de las componentes de un MFV.

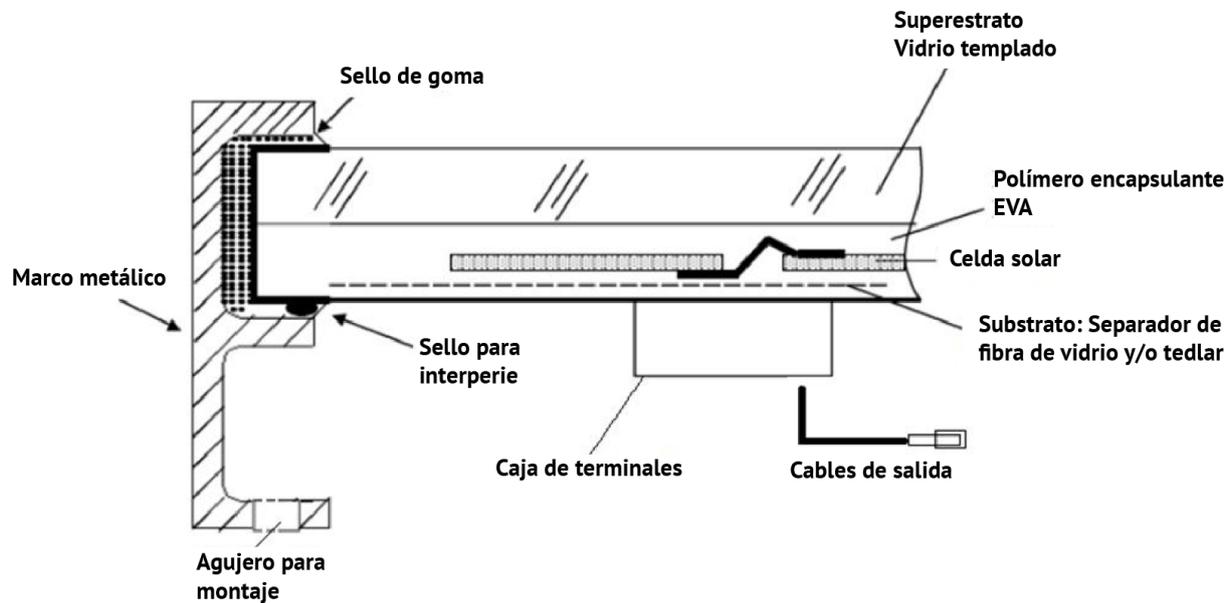
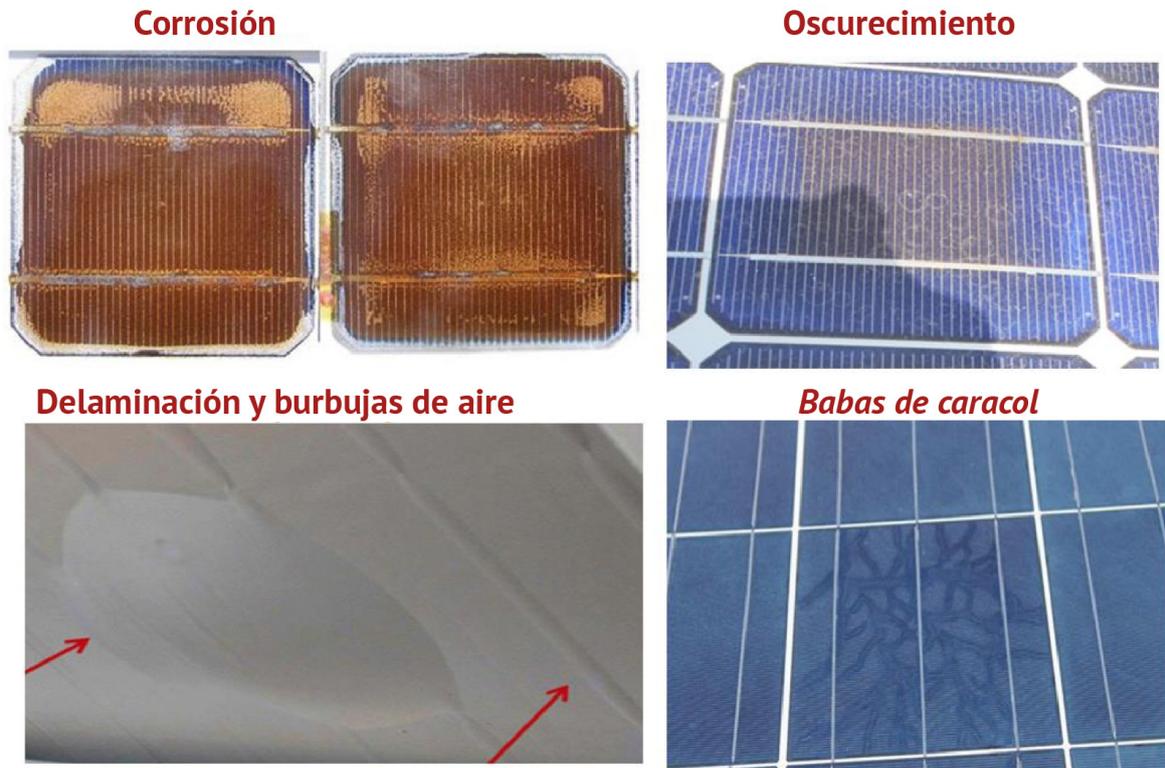


Figura 3. Corte transversal de un MFV mostrando sus componentes.

El desempeño eléctrico del MFV depende de las celdas solares que lo integran: celdas de alta eficiencia de conversión crearán un MFV de alta eficiencia; pero la práctica de dicho producto, a lo largo del tiempo, dependerá de la manera en que las componentes que integran al MFV aíslan a las celdas del ambiente, y esto depende de la calidad de los materiales que proveen el aislamiento, así como el cuidado y manera en que se realiza el encapsulado<sup>1</sup>. Burbujas

de aire y moléculas de agua dentro del encapsulado aunado a temperaturas típicas de operación mayores de 45°C, desencadenan mecanismos de degradación como lo son corrosión, delaminación, oscurecimiento del polímero encapsulante, babas de caracol, y otros fenómenos que afectan el desempeño eléctrico del MFV. **La Figura 4.** muestra fotografías de varios de los fenómenos típicos asociados a una mala calidad del MFV.

1 STC: Standard Test Conditions.- Se hace incidir una densidad de potencia de la radiación solar de 1,000 W/m<sup>2</sup>, manteniendo la temperatura de las celdas solares a 25°C.



*Figura 4. Fotografías de mecanismos de degradación más comunes en los MFV's.*

Por otra parte, se debe considerar que la TFV genera electricidad y, en consecuencia, su uso conlleva riesgos para la salud, principalmente los asociados a la electricidad, por lo cual, las instalaciones fotovoltaicas deben satisfacer las regulaciones normativas nacionales relacionadas con dicho proceso, en concreto, la Norma NOM 001 SEDE 2012 Instalaciones eléctricas (uti-

lización). Además, en el caso de los sistemas fotovoltaicos interconectados a la red, sus componentes y el diseño mismo, deben satisfacer las regulaciones vigentes emitidas por la Comisión Reguladora de Energía para tener un sistema que sea seguro y confiable tanto para el usuario como para la Red eléctrica de distribución del sistema eléctrico nacional.

## ¿Se puede certificar la seguridad eléctrica?

Como respuesta a esta inquietud, organismos nacionales e internacionales relacionados con la calidad de productos eléctricos, en este caso, de productos fotovoltaicos, han emitido normas para la fabricación de módulos fotovoltaicos y de evaluación sobre el desempeño eléctrico y durabilidad con el objeto de tener productos comerciales que sean durables, confiables y seguros. El organismo internacional facultado para la emisión de dichas normas es la Comisión Electrotécnica Internacional, por sus siglas en inglés IEC; mientras que en México, corresponde a la Asociación de Normalización y Certificación, ANCE.

Las normas internacionales que rigen la construcción de los módulos fotovoltaicos así como los métodos de prueba son las siguientes:

- IEC 61730, Photovoltaic module safety qualification.- Part 1: Requirements for construction.
- IEC 61730, Photovoltaic module safety qualification.- Part 2: Require-

ments for testing.

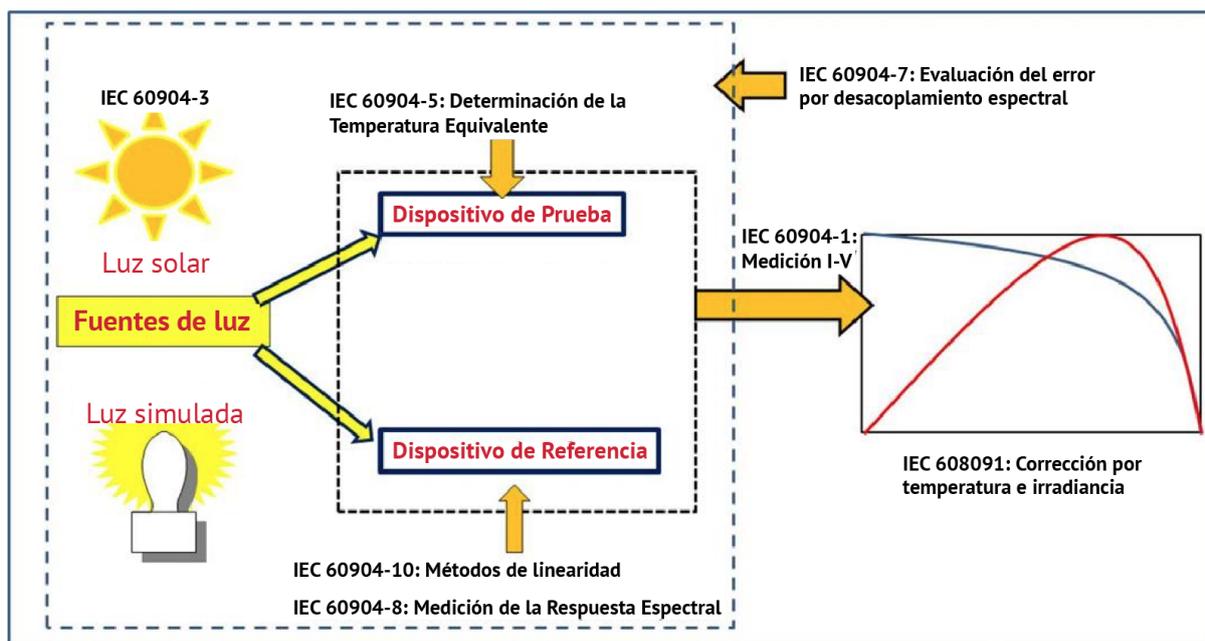
- IEC 61215, Crystalline Silicon Terrestrial Photovoltaic (PV) Modules- Design Qualification and Type Approval.
- IEC 61646, Thin-film terrestrial photovoltaic (PV) modules- Design qualification and type approval.
- IEC 60904-X, PV Devices – Measurement procedures and requirements.

La norma IEC 61730-1, proporciona el método de construcción que deben seguir los fabricantes para elaborar módulos fotovoltaicos, así como los requerimientos que deben satisfacer los materiales y componentes que lo integran y las pruebas respectivas a las que éstos deben sujetarse para ser considerados de calidad. La norma IEC 61730-2, proporciona los métodos de prueba para evaluar el riesgo de choque eléctrico y su resistencia mecánica. La norma IEC 61215 y la IEC 61646 proporcionan los métodos para evaluar el desempeño eléctrico y durabilidad bajo diferentes pruebas ambientales.

Así mismo, la serie IEC 60904, proporciona el método de caracterización eléctrica, los requisitos para los equipos de prueba, los métodos de corrección para realizar la medida de las característi-

cas eléctricas o desempeño eléctrico de los MFV's, y la manera en que debe determinarse la máxima Potencia, que es el parámetro testigo para la deter-

minación de la durabilidad, confiabilidad y seguridad a través del desempeño eléctrico. La **Figura 5.** muestra un esquema de la aplicación de dicha norma.

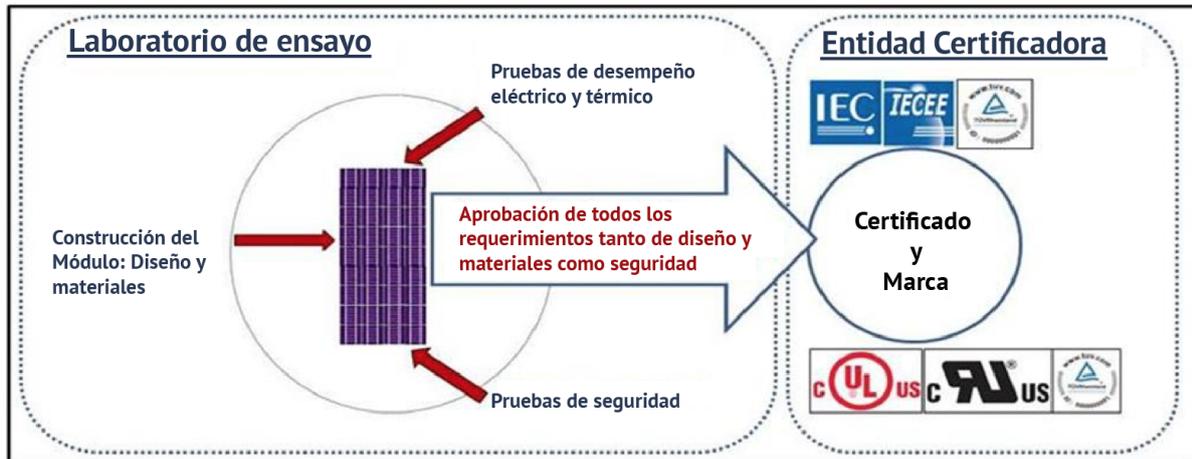


Adaptado de: Guidelines for PV Power measurement in Industry; JRC, Institute of Energy European Commission, 2010.

**Figura 5.** Esquema de aplicación de la norma IEC 60904 para medir el desempeño eléctrico de los módulos fotovoltaicos.

En los Estados Unidos de América, el organismo facultado para emitir normas y certificación de producto es *Underwriters Laboratories Inc.*, UL, que ha emitido la Norma UL 1703 *Standard for Flat-Plate Photovoltaic Modules and Panels*, que describe los requerimientos fundamentales de construcción y prueba que garantizan la operación segura de los módulos foto-

voltaicos, así como los riesgos de choque eléctrico, resistencia y propagación de fuego y resistencia mecánica durante su operación; es decir, es una norma de seguridad. La siguiente figura muestra el esquema de pruebas a las que deben someterse los módulos fotovoltaicos para demostrar su desempeño eléctrico, durabilidad y seguridad durante su ciclo de vida útil.



Elaboración propia basado en las formas IEC

Pruebas mecánicas	Pruebas ambientales	Pruebas eléctricas
Carga viento 2400 Pa, carga estática 5200 Pa	Ciclos térmicos: 50 and 200	Aislamiento, corriente de fuga
Impacto de granizo	Prueba calor-húmedo: 100 h	Continuidad
Robustez en las terminales	Ciclos humedad-congelación: 50	Accesibilidad
Robustez en las cajas de conexión	Resistencia a radiación UV	Diodos de paso
	Resistencia a Puntos calientes	Propagación de fuego

Figura 6. Pruebas para la certificación de módulos fotovoltaicos.

En nuestro país, las normas IEC mencionadas anteriormente han sido homologadas como Normas Mexicanas NMX, y se han clasificado como sigue:

- NMX-J-618/1-ANCE-2010(IEC 61730-1)-Evaluación de la seguridad en módulos fotovoltaicos (FV)-Parte 1: Requisitos generales para construcción.
- NMX-J-618/2-ANCE-2011(IEC 61730-2)-Evaluación de la seguridad

en módulos fotovoltaicos (FV)-Parte 2: Requisitos para pruebas.

- NMX-J-618/3-ANCE-2011(IEC 61646)-Evaluación de la seguridad en módulos fotovoltaicos (FV)-Parte 3: Requisitos para módulos fotovoltaicos de película delgada-Calificación del diseño.
- NMX-J-618/4-ANCE-2011(IEC 61215)-Evaluación de la seguridad en módulos fotovoltaicos (FV)-Parte 4: Requisitos para módulos fotovoltaicos

de silicio cristalino-Calificación del diseño.

- NMX-J-643/1-ANCE-2011(IEC 60904-1)-Dispositivos fotovoltaicos-Parte 1: Medición de la característica corriente-tensión de los dispositivos fotovoltaicos.
- NMX-J-643/2-ANCE-2011(IEC 60904-2)-Dispositivos fotovoltaicos-Parte 2: Requisitos para dispositivos solares de referencia.
- NMX-J-643/3-ANCE-2011(IEC 60904-3)-Dispositivos fotovoltaicos-Parte 3: Principios de medición para dispositivos solares fotovoltaicos terrestres (FV) con datos de referencia para radiación.
- NMX-J-643/5-ANCE-2011(IEC 60904-5)-Dispositivos fotovoltaicos-Parte 5: Determinación de la temperatura equivalente de la celda (ECT) de dispositivos fotovoltaicos (FV) por el método de tensión de circuito abierto.
- NMX-J-643/7-ANCE-2011(IEC 60904-7)-Dispositivos fotovoltaicos-Parte 7: Cálculo de la corrección del desajuste espectral en las mediciones de dispositivos fotovoltaicos.
- NMX-J-643/9-ANCE-2011(IEC 60904-9)-Dispositivos fotovoltaicos-Parte 9: Requisitos para la realización del simulador solar.

- NMX-J-643/10-ANCE-2011(IEC 60904-10)-Dispositivos fotovoltaicos Parte 10: Métodos de mediciones lineales.

Pero no basta tener dichos instrumentos normativos; para que el usuario pueda confiar en las bondades de la TFV, los fabricantes y comercializadores del producto FV deben demostrar su calidad con un certificado de conformidad; en consecuencia, ellos deben someter sus productos, de manera voluntaria, a una serie de pruebas de laboratorio basadas en las normas nacionales o internacionales a través de las cuales se verifica el desempeño eléctrico, la seguridad y la durabilidad del producto FV. Dichas pruebas las debe realizar organismos de tercera parte facultado para dicha actividad, llamados Laboratorio de Ensayo, y el dictamen ser avalado por una entidad certificadora que acredita la veracidad del dictamen.

Por tal motivo, en diferentes países se ha impulsado la creación y consolidación de Laboratorios de Ensayo acreditados, que evalúen la conformidad de los productos y componentes fotovoltaicos, así como de entidades de certificación, que acrediten el cumplimiento de las normas. A la fecha, en nuestro país, no existe un Laboratorio

de Ensayo acreditado que realice dichas evaluaciones y **El Laboratorio Nacional de Evaluación Fotovoltaica, LANEFV**, que se está implementando en el Instituto de Energías Renovables de la Universidad Nacional Autónoma de México, IER-UNAM, dentro del marco de proyectos del CeMIE-Sol, está llenando el vacío actual que se tiene para la evaluación de la conformidad de módulos fotovoltaicos y proporcionará el servicio que los fabricantes, comercializadores y usuarios de la TFV están demandando y requiriendo. Para su comercialización, los MFV deben tener

una etiqueta de identificación, tal y como se contempla en la Norma EN 50380 Datasheet and nameplate information of photovoltaic module, la que debe contener referencias o datos respecto de su desempeño eléctrico, seguridad, confiabilidad y durabilidad. Además, la etiqueta debe incluir el logotipo del organismo de certificación que ha constatado, mediante las pruebas de aceptación, el cumplimiento de las normas, y en consecuencia, ha emitido el certificado de calidad o certificado de la conformidad. Logos de dichas organizaciones se muestran en la **Figura 6**.

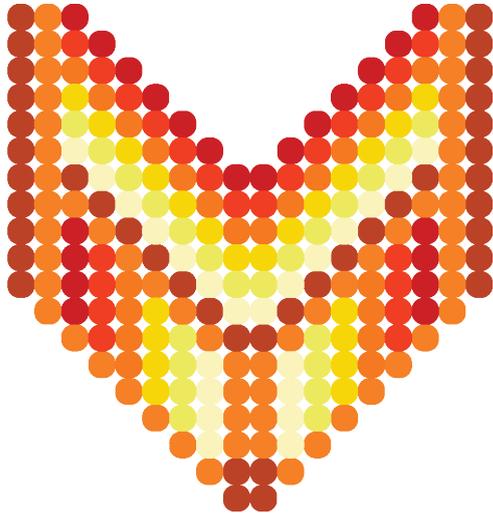


*Figura 7. Logos de entidades de certificación de módulos fotovoltaicos.*

Si bien, la certificación conlleva a costos adicionales al producto, en una fábrica con niveles típicos de producción de 24.0 MW al año, el precio de la certificación para un lote de ese tipo puede ser del orden de usd\$0.05/Watt.

En conclusión, la finalidad del proceso de la certificación es garantizar a los usuarios que el producto fotovoltaico cuente no sólo con la calidad y durabilidad requeridas por ellos, sino que también posean características de seguridad y confiabilidad tanto para la prevención de accidentes como la ocurrencia de fallas en el sistema o daños a la propiedad. De esta manera, el significado de la certificación se debe entender de la siguiente manera: Un *módulo certificado*, es aquél que ha superado con éxito las pruebas específicas en materia de seguridad y calidad. El *certificado*, hace referencia a las características comprobadas del producto y enumera las normas conforme a las cuales se han desarrollado las pruebas. Para el comprador, este certificado crea una confianza a la hora de la toma de decisión para adquirir el producto. Con el *certificado*, el comprador ya no depende sólo de la información suministrada por el fabricante sino que se puede fiar del dictamen de una entidad de certificación neutral. Para el fabricante

significa que su producto ha sido fabricado con componentes de calidad y que su línea de producción fabrica productos confiables, seguros y durables. Adicionalmente, la certificación de producto promueve que el mercado de la industria Fotovoltaica se desarrolle de una manera confiable y sustentable, así mismo impulsa la competitividad nacional e internacional de las empresas nacionales que fabrican o comercializan estos productos. Dado que el mercado actual fotovoltaico está constituido por un número muy grande de fabricantes que ofertan una gran variedad de modelos y pese a que se tiene un marco de referencia normativo, se puede encontrar módulos fotovoltaicos con etiquetas de identificación carentes del sello de certificación. Se estima que sólo el 40% del producto FV que se comercializa está certificado. Dado que los Sistemas Fotovoltaicos interconectados a la red se diseñan con tensiones superiores a los 220 VDC, el riesgo de fugas de corriente o tensión de las instalaciones realizadas con módulos fotovoltaicos no certificados, es alto. Por tal motivo, para garantizar la seguridad eléctrica de los usuarios de sistemas fotovoltaicos, se emite una exhortación para que los fabricantes nacionales certifiquen su producto, y a los integradores de dichos sistemas, que usen módulos certificados.



# CAPÍTULO

# 2

1. Perovskitas y kesteritas: El futuro para la fabricación de celdas solares de bajo costo.
2. Comparación de las propiedades ópticas y morfológicas de las películas delgadas de CdS y CdS:O depositadas por RF-Sputtering.
3. Activación de celda solar de películas delgadas de CdS/CdTe con mezcla de gases que contiene cloro.
4. “Perovskitas”, el material que llevara a la proxima generación de celdas solares.
5. Fabricación de escalón para películas delgadas de  $Al_2O_3$  y curva de calibración para Trimetilaluminio (TMA) en sistema ALD térmico.
6. Crecimiento de películas delgadas de ZnO mediante la técnica de depósito atómico en capas.
7. Diseño de un sistema electrónico para amplificación y enfriamiento del detector de un radiómetro óptico.

## Perovskitas y Kesteristas: El futuro para la fabricación de celdas solares de bajo costo

*Marcos Alan Cota Leal<sup>1</sup>, Diego Bouttier Figueroa<sup>2</sup>, Merida Sotelo Lerma<sup>3</sup>*

*<sup>1</sup>Departamento de polímeros y materiales, Universidad de Sonora, Blvd Luis Encinas y Rosales SN, Centro, 83000 Hermosillo, Son.*

La situación ambiental global ha orillado a la sociedad al uso de energías renovables, siendo las celdas solares las primordiales al ser las más accesibles para las personas.

La tecnología solar fotovoltaica sigue siendo un reto para los investigadores quienes buscan la mayor eficiencia de conversión de energía a bajo costo, obligándolos a desarrollar nuevos procesos y materiales, más accesible para sociedad.

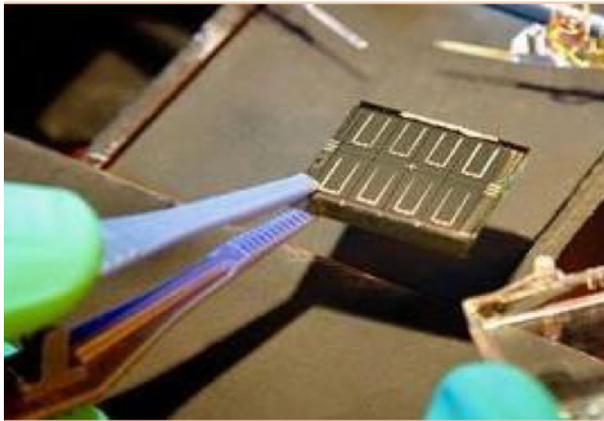
En comparación con el silicio, el uso de materiales que absorben la luz solar fuertemente permite que se utilice menos material, lo que reduce el costo y abre más posibilidades de integrar la energía solar a las edificaciones. Sólo un pequeño número de tecnologías comerciales de

película delgada han alcanzado eficiencias de conversión de energía superiores al 20%: CdTe y Cu(In,Ga)-(S,Se)<sub>2</sub> (CIGS). La toxicidad del cadmio y la competencia en el suministro de indio son factores limitantes para la utilización a gran escala de estas tecnologías. [2].

En la actualidad, gran parte de la investigación sobre materiales para aplicaciones fotovoltaicas, se ha enfocado principalmente en los minerales perovskita y kesterita, los cuales han permitido la fabricación de celdas solares eficientes y económicas.

La kesterita es un compuesto semiconductor cuaternario, formado por elementos no tóxicos abundantes en la corteza terrestre como es el cobre, zinc, estaño y

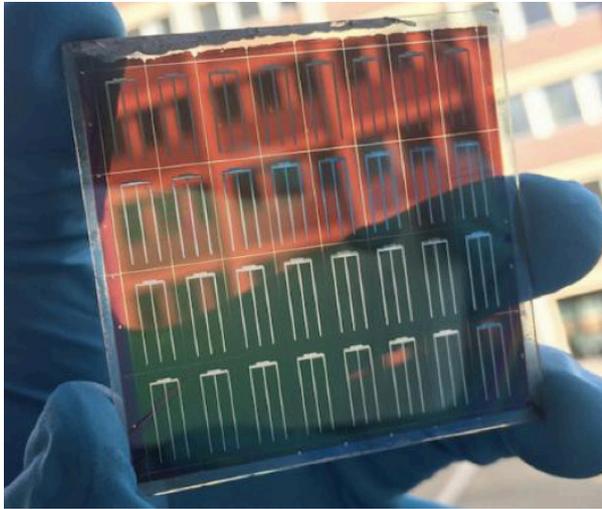
azufre con la fórmula ( $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  (CZTS)). Su utilización surge ante la necesidad de sustituir al material semiconductor compuesto de cobre, indio, galio y selenio CIGS, debido a los altos costos de los elementos que lo componen. La kesterita al presentar excelentes propiedades como material absorbente de luz [3,4] se convierte en la candidato ideal para la fabricación de celdas solares.



*Figura 1. Celda solar de kesterita.*

La primera celda solar de kesterita fue fabricada en 1997, y la eficiencia en conversión de energía del dispositivo campeón ha aumentado de 0.66% [5] al récord certificado actual de 12.6% establecido en 2013

[6], con un 13.8% para un dispositivo de área pequeña reportado a fines de 2016 [7]. Estas eficiencias caen muy por debajo del 28% previsto para esta tecnología según su límite teórico por su bajo voltaje en circuito abierto ( $V_{oc}$ ). Por otro lado, tenemos a los materiales semiconductores con una estructura tipo perovskita híbrida, los cuales se representan por la fórmula  $\text{ABX}_3$ , representando al sitio A por un catión orgánico, que generalmente es metilamonio ( $\text{CH}_3\text{NH}_3^+$ ) o formamidinio ( $\text{NH}_2\text{-CH}_2\text{=NH}_2^+$ ), el B es usualmente  $\text{Pb}^{2+}$ , y X son aniones  $\text{I}^-$ ,  $\text{Cl}^-$  o  $\text{Br}^-$ . Su aplicación comenzó en 2009 con reportes de Miyazaka sobre su aplicación en celdas solares sensibilizadas, demostrando en un inicio baja eficiencia de 3.8% [8]. No fue hasta el 2013 cuando Snaith y colaboradores asombraron a la comunidad científica con su gran avance en celdas solares basadas en perovskita híbridas (tipo plumbato de trihalogenuro de alquilamonio) demostrando una eficiencia del 15% [9]. El gran avance sobre celdas solares basadas en perovskitas marcó la pauta para el desarrollo de esta tecnología, logrando alcanzar actualmente una eficiencia del 22.1% [10].



*Figura 2. Celda solar de perovskita.*

El incremento exponencial en la eficiencia de celdas solares tipo perovskita se debe a sus excelentes propiedades físicas y químicas intrínsecas del material, demostrando ser un gran absorbedor de luz en el espectro

visible, alto coeficiente de absorción, larga difusión de carga, propiedades de transporte ambipolar y capaz de ser fabricado a partir de procesos sencillos de bajo costo. Sin embargo, aún queda por resolver un gran problema que es su inestabilidad a la humedad lo cual ha obstaculizado su progreso hacia la comercialización delimitando el tiempo de vida de las celdas solares a no más de un año [11].

Se podría decir que las investigaciones sobre estos materiales aún siguen en una etapa inicial, lo que sugiere que hay más espacio para la innovación y avance tecnológico. Tanto los materiales tipo kesterita y perovskita son compuestos muy prometedores que podrían llegar en un futuro a desplazar tecnologías como la del silicio, reduciendo de esta manera el costo directo sobre celdas solares.

## Agradecimientos

Se agradece a la Red Temática de Energía Solar del CONACyT- proyecto número 282309 y al proyecto de problemas nacionales del CONACyT, 2015-01-1739, por el apoyo económico para realizar una estancia de investigación en el IER-UNAM. Así mismo a la doctora Hailin Zhao Hu por permitirme realizar la estancia en su grupo de investigación y a sus alumnos por las facilidades brindadas.

## REFERENCIAS

[1] Olman, A.; Knight, M.; Garnett, E. C.; Ehrler, B.; Sinke, W. C. Photovoltaic materials – present efficiencies and future challenges. *Science* 2016, 352, aad4424.

[2] Green, M. A.; Emery, K.; Hishikawa, Y.; Warta, W.; Dunlop, E. D. Solar Cell Efficiency Tables (Version 49). *Prog. Photovoltaics* 2016, 24, 3.

[3] Ramasamy, K.; Malik, M.A.; O'Brien, P.; (2012): Routes to copper zinc tin sulfide Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> a potential material for solar cells, *Chem. Commun.*, 48:5703-5714. <http://dx.doi.org/10.1039/c2cc30792h>

[4] Mitzi, D.B.; Gunawan, O.; Todorov, T.K.; Wang, K.; Guha, S.; (2011): The path towards a high-performance solution-processed kesterite solar cell, *Sol. Energ. Mat.*

*Sol. C.*, 95: 1421-1436. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2010.11.028>

[5] Katagiri, H.; Sasaguchi, N.; Hando, S.; Hoshino, S.; Ohashi, J.; Yokota, T. Preparation and evaluation of Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> thin films by sulfurization of E-B evaporated precursors. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 1997, 49, 407.

[6] Wang, W.; Winkler, M. T.; Gunawan, O.; Gokmen, T.; Todorov, T. K.; Zhu, Y.; Mitzi, D. B. Device Characteristics of CZTSSe Thin-Film Solar Cells with 12.6% Efficiency. *Adv. Energy Mater.* 2014, 4, 1301465.

[7] Reported at PVSEC-36 by a research team led at DGIST in South Korea. A 0.181 cm<sup>2</sup> solar cell was certified at 13.80% by KIER.

[8] A. Kojima, K. Teshima, Y. Shirai, T. Miyasaka, Organometal halide perovskites as visible-light.

[9] Liu, M.; Johnston, M. B.; Snaith, H. J. Efficient Planar Heterojunction Perovskite Solar Cells by Vapour Deposition. *Nature* 2013, 501, 395–398.

[10] [http://www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency\\_chart.jpg](http://www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency_chart.jpg).

[11] Shida Yang, Weifei Fu, Zhongqiang Zhang, Hongzheng Chen and Chang-Zhi Li\*. Recent advances in perovskite solar cells: efficiency, stability. *J. Mater. Chem. A*, 2017, 5, 11462.



# Comparación de las propiedades ópticas y morfológicas de las películas delgadas de CdS y CdS:O depositadas por RF-Sputtering

*M. Loeza-Poot<sup>1\*</sup>, J. L. Peña<sup>1</sup>, M. H. Farías<sup>2</sup>, R. Mis-Fernández<sup>1</sup>*

*<sup>1</sup>Centro de investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional  
Unidad Mérida Km. 6 carretera antigua a Progreso Mérida, Yucatán, México C. P. 97310.*

*<sup>2</sup>Centro de Nanociencia y Nanotecnología de la UNAM  
Km. 107 Carretera Tijuana-Ensenada, B. C., México, C. P. 22860.*

*e-mail: mariely\_lop@hotmail.com*

## Palabras Clave

CdS, CdS:O, RF-Sputtering.

## Resumen

En este trabajo se presentan los resultados del análisis de las propiedades ópticas y morfológicas de las películas delgadas de CdS y CdS:O depositadas por la técnica de RF-Sputtering en una atmósfera de Ar+O<sub>2</sub>. Para este estudio se utilizaron porcentajes de oxígeno de 0% (CdS) y 1.1% (CdS:O). Después del depósito de las películas se realizó un tratamiento térmico (TT) en una atmósfera de Ar+O<sub>2</sub> a 530°C. Los resultados muestran que la introducción de oxígeno durante el depósito produce un incremento en la transmitancia y el bandgap, sin embargo el TT genera que las muestras de CdS y CdS:O permanezcan con propiedades similares.

## 1. Introducción

Con el desarrollo de la tecnología y las necesidades que se crean a raíz de esta, se ha tomado un gran interés en el estudio de los materiales semiconductores, debido a que son los principales componentes utilizados en la fabricación de los dispositivos electrónicos. Uno de los semiconductores que ha sido objeto de estudio en las últimas décadas es el sulfuro de cadmio (CdS). Este compuesto inorgánico de color amarillo-naranja, se encuentra en la naturaleza como un mineral presenta múltiples aplicaciones como por ejemplo: su uso para la elaboración de fotorresistencias, en transistores de película delgada, filtros ópticos, y en la conversión fotovoltaica de energía solar [1, 2], entre otros. En esta última aplicación se encuentra su aplicación en las celdas solares de película delgada, materiales cuyo espesor se encuentra en el orden de nanómetros (nm) hasta unas cuantas micras ( $\mu\text{m}$ ). Dentro de la celda solar, el CdS se emplea como capa ventana, cuya función es dejar pasar la mayor cantidad de luz hacia la capa absorbidora, por lo que el material debe poseer una alta transmitancia óptica. Sin embargo una de sus desventajas es que posee una brecha de energía prohibida

(bandgap) de 2.42eV lo que provoca una absorción en la región azul del espectro. Trabajos anteriores han demostrado que es posible incrementar la transmitancia óptica del CdS cuando se deposita en presencia de oxígeno [3, 4]. Por lo anterior, este trabajo tiene como objetivo comparar las propiedades ópticas y morfológicas de las películas delgadas de CdS y CdS:O depositadas por la técnica de RF-Sputtering antes y después del tratamiento térmico.

### Metodología experimental

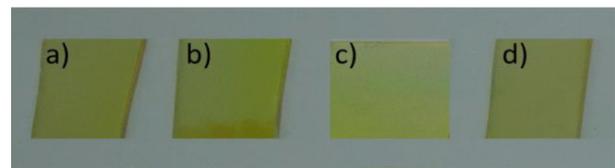
Las películas delgadas de CdS y CdS:O fueron depositadas sobre sustratos de vidrio (Corning 2947) con un área de pulgada cuadrada, usando un blanco de CdS de 3 pulgadas de diámetro y 99.99% de pureza. Para el depósito de las muestras se utilizó la técnica de RF-Sputtering reactivo, el proceso se llevó a cabo en una cámara de vacío evacuada a una presión base de  $1 \times 10^{-5}$  Torr. Durante el depósito se utilizó una mezcla de gases de Ar + O<sub>2</sub>, usando un porcentaje de oxígeno de 0% para el CdS y de 1.1% para el CdS:O. La presión de trabajo fue de 25 mTorr y una potencia de 35 W, manteniendo un espesor de 80 nm. Con el fin de conocer el comportamiento de

estos dos materiales cuando son incorporados en las celdas solares de CdTe, se realizó un tratamiento térmico (TT) a ambas estructuras en una atmosfera de Ar + O<sub>2</sub>, donde se simularon las condiciones depósito de la película delgada de CdTe, que es la capa que le prosigue a la capa ventana. Ambas estructuras CdS/vidrio y CdS:O/vidrio fueron caracterizadas óptica y morfológicamente, antes y después del TT. La caracterización óptica se efectuó en un espectrómetro Varian Cary 50 con lámpara de Xenón, donde se determinó los espectros de transmitancia y absorbancia. Las propiedades morfológicas fueron obtenidas mediante la técnica de AFM usando el microscopio Park System modelo XE-70.

## 2. Análisis de resultados

Es importante destacar que las películas delgadas de CdS y CdS:O fueron depositadas en el laboratorio de Celdas Solares del CINVESTAV-IPN Unidad Mérida, mientras que la caracterización se realizó en el CNyN- UNAM en Ensenada, B. C. En la **Figura 1**, se presentan las imágenes de las muestras de CdS y CdS:O sin TT (**Figura 1-a y 1c**) y con TT (**Figura 1-b y 1-d**). En ellas, se puede observar que todas las muestras presentan un color amarillo, sin embargo, para el caso del CdS:O se

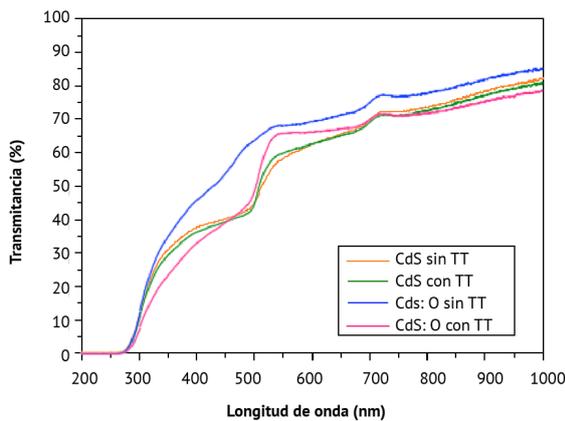
tiene un tono más claro. Esto es similar a lo reportado por Kaminski y colaboradores, donde se tiene que a altos contenidos de oxígeno las películas delgadas de CdS:O llegan a ser transparentes [5]. Las muestras con TT poseen la misma coloración por lo que se esperaría que sus propiedades ópticas sean muy similares.



**Figura 1.** Muestras de a) CdS sin TT, b) CdS con TT, c) CdS:O sin TT y d) CdS:O con TT, depositadas por RF-Sputtering.

Los espectros de transmitancia óptica con un intervalo de longitud de onda ( $\lambda$ ) de 200 a 1000 nm son presentados en la **Figura 2**. En ellos se puede observar que el espectro de transmitancia del CdS permanece sin cambios significativo cuando se realiza el TT, manteniendo una transmitancia promedio mayor al 60% para  $\lambda > 500$  nm, esto concuerda con la imagen de la figura 1 al no variar la coloración. En el caso del CdS:O la muestra sin TT posee mayor transmitancia que el CdS, lo que demuestra que la incorporación de oxígeno durante el depósito permite ampliar el rango de transmisión del CdS; sin embargo después del TT la transmitancia de la muestra de CdS:O tiende

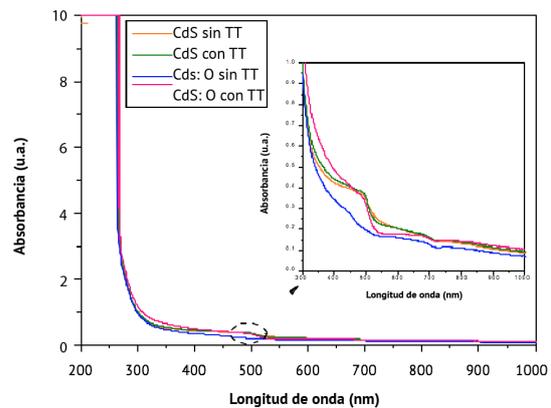
a ser la misma que para las muestras con 0% de oxígeno, esto podría deberse a una reducción de cantidad de oxígeno presente en la muestra y es uno de los motivos por el cual la imagen de la **Figura 1-d** se torna amarilla.



**Figura 2.** Espectros de transmittancia de las películas delgadas de CdS y CdS:O depositadas por Sputtering.

El incremento de la transmittancia para la película de CdS:O sin TT produce un corrimiento en el borde de absorción hacia la región azul del espectro, lo anterior se puede observar en la **Figura 3**, donde se presentan los espectros de absorción. Después del TT la absorción para ambas muestras tiene la misma tendencia, sin embargo para la película de CdS:O es

ligeramente menor en comparación con la de CdS. Por lo tanto, los valores de la brecha de energía prohibida (bandgap) fueron obtenidos por extrapolación de la parte lineal de la gráfica  $(\alpha h\nu)^2$  vs  $h\nu$  la cual se presenta en la **Figura 4**. En las muestras sin TT se pudo observar un incremento en el valor del bandgap de 2.23 a 2.48 eV, cuando el oxígeno es introducido durante el depósito de la película. Después del TT los valores del bandgap por el TT concuerda con los resultados obtenidos por otros grupos [3-6]. Los cambios producidos por el TT nos podrían indicar cambios en las composiciones químicas de las películas analizadas.



**Figura 3.** Espectro de absorción del CdS y CdS:O antes y después del TT. La imagen insertada muestra una ampliación del cambio de absorción en la región azul del espectro.

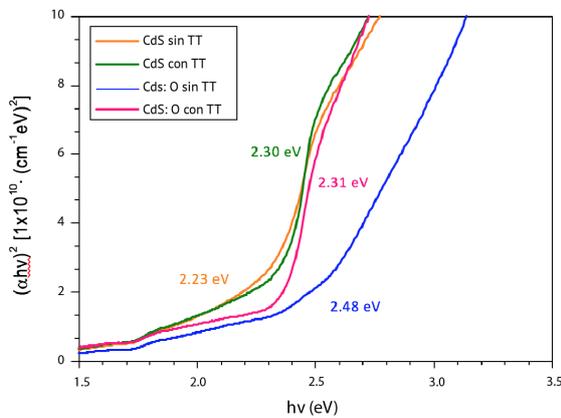


Figura 4. Bandgap de las muestras de CdS y CdS:O sin y con TT.

En la **Figura 5**, se presenta el análisis morfológico de la superficie mediante imágenes de AFM, las cuales fueron procesadas usando el programa XElmaging software, con el que se obtuvo la rugosidad promedio y el tamaño de grano. Las muestras sin TT presentan una superficie con granos de forma esférica, cuyos diámetros varían de 0.02 a 0.1  $\mu\text{m}$ , siendo menores en la muestra que contiene oxígeno. La rugosidad promedio para el CdS y CdS:O es de 2.89 y 5.5 nm, respectivamente. Después del TT se puede observar un incremento en el tamaño de grano de ambas muestras, así como la presencia de unos cúmulos de entre 0.3 y 0.4  $\mu\text{m}$ , dando como resultado una mayor rugosidad en las muestras las cuales son de aproximadamente 22.9 y 15.3 nm para el CdS y CdS:O con TT, respectivamente. La presencia de oxígeno en el CdS in

fluye en el tamaño de grano y la densidad de las películas, lo cual también ha sido observado por otros autores [7, 8]. En cuanto al TT, el hecho de que el tamaño de grano aumente se encuentra relacionado con el incremento de la cristalinidad de las muestras analizadas.

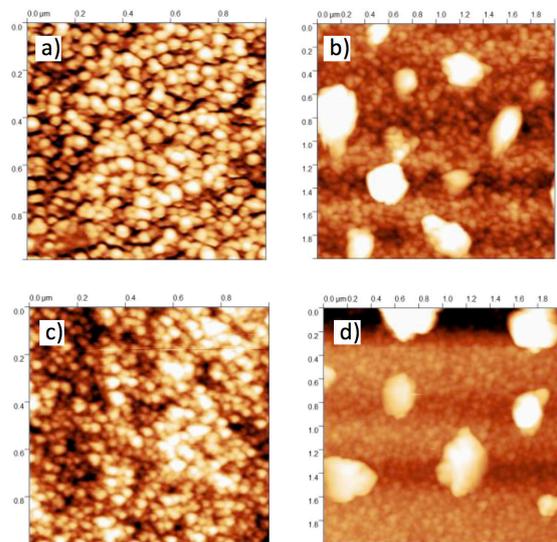


Figura 5. Imágenes de AFM para las muestras de a) CdS sin TT, b) CdS con TT, c) CdS:O sin TT y d) CdS:O con TT.

### 3. Conclusiones

Fue posible obtener películas delgadas de CdS y CdS:O por la técnica de RF-Sputtering. La introducción de oxígeno durante el depósito produce que un incremento en la transmitancia óptica y el valor del bandgap del CdS. El tratamiento térmico a 530°C en atmósfera de Ar+O<sub>2</sub> provoca que la película delgada de

CdS:O posea propiedades ópticas y morfológicas similares al CdS. Las muestras obtenidas son uniformes y no presentan huecos por lo que son candidatas a ser utilizadas en las celdas solares de película delgada.

### Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por la Red de Energía Solar del CONACYT, así como por CONACYT-SENER (México) bajo el proyecto CEMIE-Sol 207450/P25. Loeza-Poot, M. agradece el financiamiento otorgado por CONACYT-México por la beca (número 556332) en el departamento de Física aplicada del CINVESTAV- Mérida. Los autores agradecen a M.C. Eduardo Murillo y Dr. Hugo Borbon por el soporte técnico, y a L. Pinelo y S. Rodríguez por el apoyo secretarial.

## REFERENCIAS

- [1] Senthil, K., Mangalaraj, D., Narayandass, Sa. K., Adachi, Sadao. *Materials Science and Engineering B*, 53–58, 2000.
- [2] Oumous, H., Hadiri, H. *Thin Solid Films*, 87–90, 2001.
- [3] X. Wu, Y. Yan, R. G. Dhere, Y. Zhang, J. Zhou, C. Perkins and B. To. *Physics state solid*, vol. 1, no. 4, pp. 1062-1066, 2004.
- [4] J. M. Kephart, R. M. Geisthardt and W. S. Sampath, *Progress in photovoltaics: research and applications*, 2015.
- [5] P.M. Kaminski, F. Lisco, A. Abbas, J.W. Bowers, G. Claudio, J.M. Walls. 43th IEEE, 2014, pp.1626-1631.
- [6] Hernández-Rodríguez, E., Loeza-Poot, M., Riech, I., Rejón, V., Peña, J.L. *Journal of Physics D: Applied Physics* 48, pp. 255102, 2015.
- [7] N. R. Paudel, C. R. Grice, C. Xiao and Y. Yan. *Journal of applied physics*, vol. 116, p. 044506, 2014.
- [8] Ipsita Chinmay, K. Poutray, Udai P. Singh. *Thin solid film*, Vol.527, pp. 147-150, 2013.

# Activación de celda solar de películas delgadas de CdS/CdTe, con mezcla de gases que contiene cloro

*A. López-Sánchez<sup>1</sup>, J.L. Peña<sup>1</sup>, Mario H. Farías<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup>C 1Centro de Investigación y de Estudios Avanzados Unidad Mérida, Km. 6 Antigua carretera a Progreso, Apdo Postal 73, Cordemx, 97310, Mérida, Yuc., México.*

*<sup>2</sup>Universidad Nacional de México-Centro de Nanociencias y Nanotecnología, Km. 107 Carretera Tijuana-Ensenada, Ensenada, B.C. 22860, México .*

*e-mail: adolfo-ls@hotmail.com*

## Palabras Clave

Película delgada, Activación de CdS/CdTe, Límites de granos, Celda solar.

## Resumen

En este trabajo se presentan los resultados del efecto de activación en celda solar de películas delgadas CdS/CdTe. Después del proceso de activación, se produjeron cambios morfológicos sobre la superficie de CdTe debido a la presencia del cloro. Los cambios en la superficie son principalmente por erosiones en los límites de granos, esto se determinó mediante un análisis SEM. El contacto posterior es una película delgada de molibdeno con espesor de 200 nm que se obtuvo con AFM. La celda solar preparada se caracterizó mediante las curvas de densidad de corriente-voltaje (J -V) en oscuridad e iluminada a temperatura ambiente. El resultado de la medición de la curva J-V bajo iluminación muestra una eficiencia de 9.13%.

## 1. Introducción

El desarrollo tecnológico y bienestar social son las causas principales de mayor consumo energético, y nuestra fuente principal de energía, el petróleo, ha causado problemas ambientales. Una de las alternativas para contrarrestar la problemática, es generar energía por fuentes renovables. La energía solar es una de las alternativas para la generación de electricidad por medio de dispositivos fotovoltaicos, también llamadas celdas solares fabricadas con semiconductores que son capaces de absorber la luz solar y generar electricidad.

El telurio de cadmio (CdTe) se ha convertido en el material base para producir celdas solares de películas delgadas de alta eficiencia a bajo costo [1]. Debido a sus propiedades ópticas, eléctricas y químicas ha sido objeto de estudio para su aplicación en celdas solares, sin embargo, para obtener conversión fotovoltaica altas es necesario someterlo a un proceso de activación que consiste en un tratamiento térmico a 400°C en una atmósfera que contiene cloro. Típicamente, la activación se realiza con  $\text{CdCl}_2$  como fuente de cloro, pero debido que es altamente tóxico se ha buscado otras alternativas;

una de ellas son los clorofluorometano, CF's. Estudios realizados sobre los compuestos de Freón, indican que son de los más estables entre los compuestos orgánicos. Se ha demostrado que el gas Freón 22 ( $\text{CHClF}_2$ ), se puede descomponer catalíticamente a una temperatura de 400°C en presencia de un óxido de metal, oxígeno, nitrógeno y vapor de agua [2]. El uso de una mezcla de gases que contiene  $\text{CHClF}_2$  en la metodología de este trabajo nos permite tener un proceso de activación reproducible por el control de los gases. La celda solar sin proceso de activación produce baja eficiencia de conversión fotovoltaica debido a la alta densidad de defectos en la interfaz. La activación produce la recristalización, crecimiento de los granos de CdTe y disminuya la densidad de defectos en las fronteras de grano y genera la interdifusión del CdS y CdTe [3], es en la activación cuando se genera la unión pn, y este genera un campo eléctrico que es capaz de separar los pares electrón-hueco generados por la absorción de la luz solar. La etapa final en el proceso de fabricación de una celda solar es el contacto posterior (contacto metálico). Un contacto posterior debe tener baja resistencia laminar y ser estable. En este estudio la metalización de la celda fue hecha con Molibdeno.

## 2. Desarrollo experimental

La celda solar fue fabricada utilizando ZnO/CdS/CdTe depositadas sobre el contacto frontal de ITO en un sustrato de vidrio. Las películas delgadas de ZnO y CdS se depositaron por la técnica RF-Sputtering. La capa de CdTe se depositó por la técnica de CSS. La celda solar tiene como contacto posterior Cu/Mo ambos depositados por RF-sputtering.

La estructura Vidrio/ITO/ZnO/CdS/CdTe fue sometida al tratamiento de activación a una temperatura de 400°C por 15 minutos en una atmósfera de gases que contiene  $\text{CHClF}_2$  a 150 Torr de presión total.

La caracterización morfológica de la película delgada de CdTe fue realizada por microscopía electrónica de barrido (SEM) JOEL JIB 2400, el espesor de la película delgada de Mo, fue medido con AFM con el equipo XE-70 Parks System y la medición de la curva I-V en oscuras con equipo KEITHLEY, 2460 SourceMeter. Estas técnicas de caracterizaciones fueron realizadas en el Centro de Nanociencias y Nanotecnologías (CNyN) de la UNAM

campus Ensenada. El depósito de las películas delgadas y la medición de la curva J-V bajo iluminación fueron realizados en el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV-IPN) unidad Mérida.

## 3. Análisis y discusión de resultados

### 3.1. Análisis morfológico del CdTe

En la **Figura 1**, se muestra la superficie del CdTe antes de la activación, se puede observar que la superficie del CdTe es homogénea, sin grietas o agujeros y los límites de granos son muy marcados. En la **Figura 2**, se observa que la superficie de la película delgada de CdTe presenta cambios morfológicos cuando es sometida a un proceso de activación a 400°C en una atmósfera que contiene  $\text{CHClF}_2$ . Los cambios morfológicos consisten principalmente en coalescencia y erosiones en las fronteras de grano. Una superficie con coalescencia nos permite tener un mejor precontacto con el cobre (Cu) para una mejor extracción de los huecos.

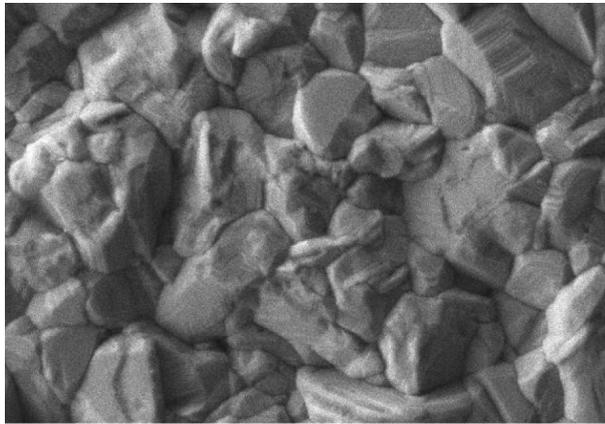


Figura 1. Micrografía SEM de CdTe antes de la activación.

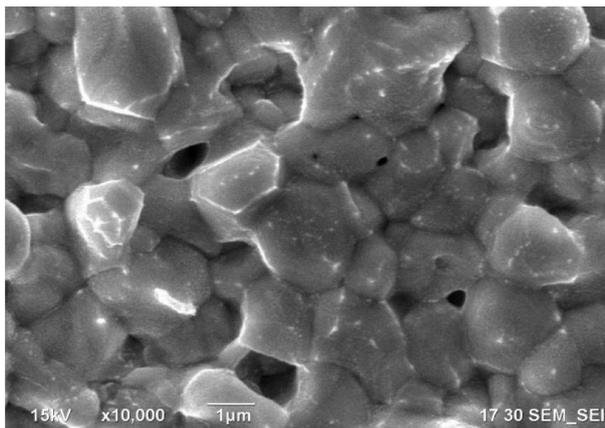


Figura 2. Micrografía SEM de CdTe después de la activación.

### 3.2 Medición de espesor de Molibdeno

La película de Mo fue depositada dejando un escalón para poder medir el espesor, como se muestra en la **Figura 3**. De acuerdo con la medición del escalón, el espesor de la muestra es de 200 nm. En la **Figura 4**, se muestra la imagen en 3D

y se puede observar que la superficie es uniforme y homogénea. Una superficie uniforme es apropiada para formar un buen contacto óhmico, sin embargo, el espesor obtenido es delgada lo que genera mayor resistencia serie.

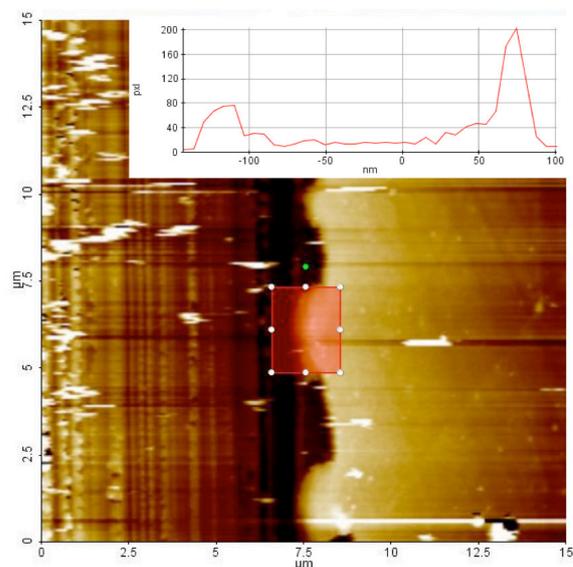


Figura 3. Imagen AFM de una película delgada de Molibdeno (Mo) sobre vidrio vista frontal.

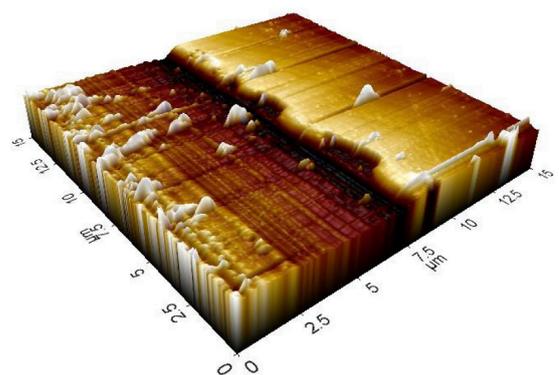


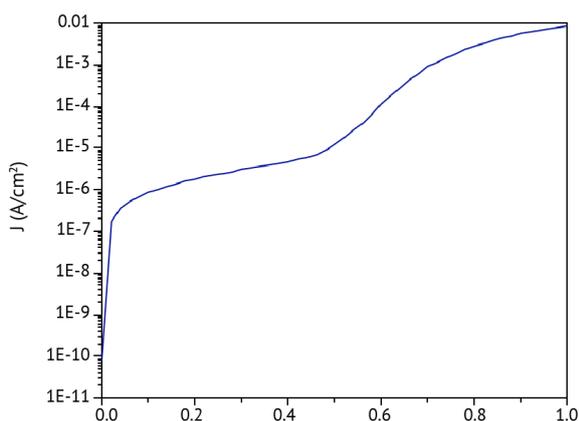
Figura 4. Imagen AFM de una película delgada de molibdeno (Mo) sobre vidrio en 3D.

### 3.3 Característica Corriente-Voltaje

En la **Figura 5**, se muestra la característica J-V de la celda solar de CdS/CdTe bajo oscuridad. De esta figura podemos ver en la parte superior de la curva que tiene una distorsión que influye en una resistencia serie relativamente alta y resistencia shunt alta, este último se puede observar en la pendiente de la curva de la parte inferior. La corriente de saturación  $I_0$  es un mecanismo de conducción intrínseco de la unión pn que se puede calcular con la ecuación del diodo.

$$J = J_s \left( \exp\left(\frac{qV}{nKT}\right) - 1 \right)$$

Donde J es la corriente,  $J_s$  es la corriente de saturación, q la carga elemental, V el voltaje, n el factor de idealidad, K la constante de Boltzman y T la temperatura.

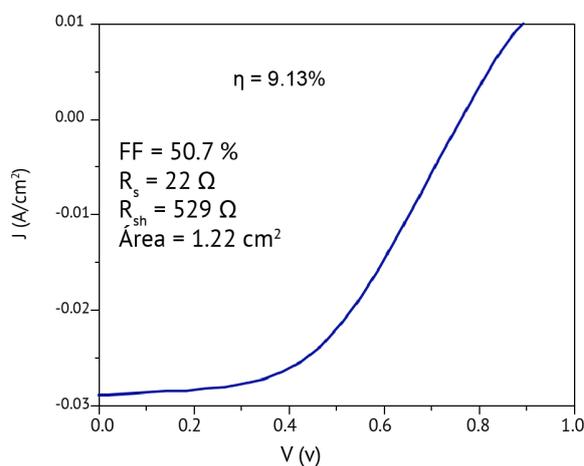


**Figura 5.** Caracterización eléctrica en oscuridad de la celda solar de CdS/CdTe.

Los parámetros eléctricos de una celda solar bajo iluminación, nos permiten determinar si el proceso de activación ha tenido una influencia en mejora de las propiedades eléctricas.

Como se mencionó anteriormente, si no se realiza un tratamiento de activación a la celda solar, los valores de los parámetros eléctricos de la celda solar son bajos, y como consecuencia la eficiencia también lo es.

De acuerdo con la medición de J-V bajo iluminación como se muestra en la **Figura 6**, se obtiene una corriente de 23.7 mA/cm<sup>2</sup> y un voltaje de 0.761 V de la celda solar con área de 1.22 cm<sup>2</sup>. La corriente record alcanzado es de 30.94 mA/cm<sup>2</sup> con un voltaje de 877 mV [4]. Este record fue obtenido por la empresa *First Solar*.



**Figura 6.** Caracterización eléctrica bajo iluminación de la celda solar CdS/CdTe.

Además de la mejora de los parámetros eléctricos después del proceso de activación, otro aspecto importante a considerar, es el contacto posterior. De acuerdo con la medición J-V, en la curva se puede ver que tiene roll-over, debido al contacto posterior con alta resistencia serie. La existencia del roll-over, se le atribuye a las propiedades eléctricas del CdTe, por la presencia de una barrera Schottky (CdTe/Cu/Mo), que afecta principalmente el transporte de huecos, por el aumento de la energía en la barrera potencial del contacto posterior [5, 6]. Por lo tanto, un buen contacto óhmico no debe presentar roll-over. En relación

con el resultado obtenido, la película delgada de Mo requiere mayor espesor para disminuir la resistencia serie.

#### **4. Conclusiones**

Los cambios morfológicos en la superficie del CdTe, consisten principalmente en erosiones en las fronteras de los granos de CdTe por la presencia del cloro. La película del molibdeno, requiere de mayor espesor para no tener una resistencia serie alta. La activación de las celdas requiere de mayor estudio para tener una mezcla óptima, así generar una mejor pasivación en la interface CdS/CdTe.

## Agradecimientos

Este trabajo fue apoyado por la Red de Energía Solar, al CONACYT, al proyecto CONACYT-SENER CeMIE-Sol 207450/25, al CNyN y a la UNAM. Los autores agradecen a Ricardo Mis, Hugo Borbón, Eduardo A. Murillo, David A. Domínguez y Eduardo Gradilla por su apoyo técnico.

## REFERENCIAS

- [1] D. Bonnet y P. Meyers, «Cadmium-telluride, Material for thin film solar cells,» *Journal of Material Research*, vol. 13, nº 10, pp. 2740-2753, 1998.
- [2] L. Gong-Liang, T. Ishihara, Y. Moro-oka y Y. Takita, «Catalytic decomposition of HCFC22 (CHClF<sub>2</sub>),» *Applied Catalysis*, vol. 9, pp. 239-249, 1996.
- [3] R. W. Miles, G. Zoppi, K. T. Ramakrishna Reddy y I. Forbes, «Thin Film solar cells based on the use of polycrystalline thin film materials,» de *Organic Nanostructured Thin Film Devices and Coatings for Clean Energy*, New York, CRC Press, 2010, pp. 1-56.
- [4] M. A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa, W. Warta, E. D. Dunlop, D. H. Levi y A. W. Y. Ho-Baillie, «Solar cell efficiency tables (version 49),» *Progress in photovoltaics*, pp. 3-13, 2016.
- [5] A. Salavei, I. Rimmaudo, F. Piccinelli, P. Zabierowski y A. Romeo, «Study of difluorochloromethane activation treatment on low substrate temperature deposited CdTe solar cells,» *Solar Energy Materials & Solar Cells*, pp. 190-195, 2013.
- [6] S. H. Demtsu y J. R. Sites, «Effect of back-contact barrier on thin-film CdTe solar cells,» *Thin Solid Films*, nº 510, pp. 320-324, 2006.

## “Perovskitas” El material que llevará a la próxima generación de celdas solares

*Diego Carlos Bouttier Figueroa<sup>1</sup> Marcos Alan Cota Leal<sup>2</sup> Mérida Sotelo Lerma<sup>3</sup>*

*<sup>1,2,3</sup> Departamento de Investigación en Polímeros y Materiales, Universidad de Sonora, Calle Rosales y Blvd. Luis Encinas S/N, Col. Centro, C.P. 83000 Hermosillo, Sonora, México.*

La perovskita es un mineral de la corteza terrestre, también es el nombre más general de cristales; sintetizado puede convertir la luz del sol de manera más eficiente y económica, que permite reducir los costos de producción de la energía solar, por lo que se utiliza en celdas solares, autos, ventanas y muros, entre otros. Este material 100% novedoso busca impactar de manera positiva las vidas de miles de personas que están interesadas en el desarrollo sustentable y la energía solar. La perovskita con fórmula  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ , es creada por la combinación de una parte inorgánica ( $\text{PbI}_2$ ) y una parte orgánica ( $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$ ) y al unirse forman este material tan prometedor capaz de aprovechar un alto porcentaje de la energía solar.

**El costo de una celda solar basada en perovskitas está por abajo del de sus competidores y tiene un nivel de desarrollo que está a la par de las grandes empresas tecnológicas dedicadas a la fabricación de celdas solares.**

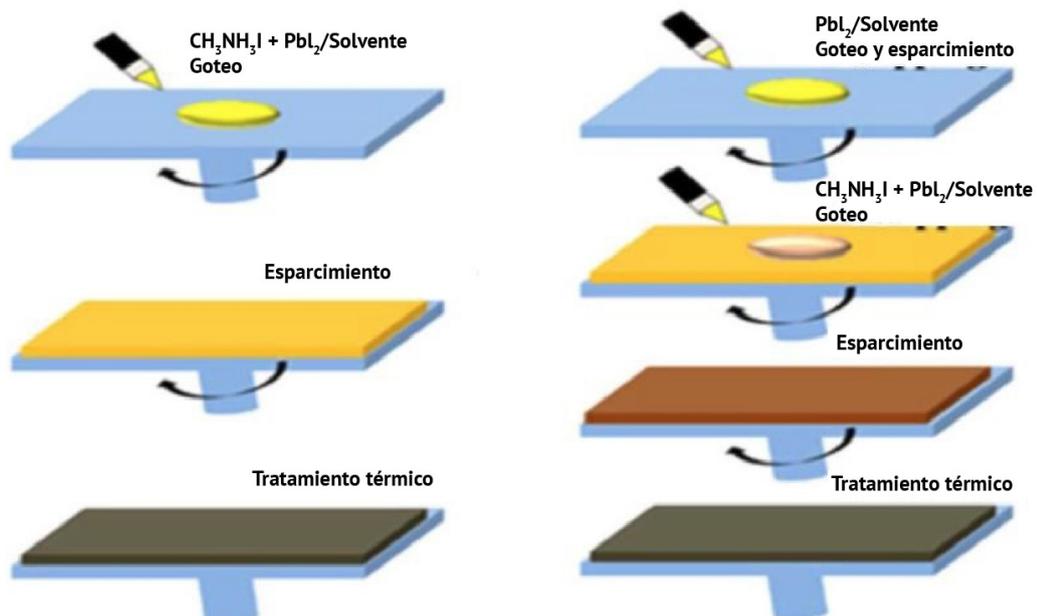
La primer gran ventaja que tiene las perovskitas comparadas con otro tipo de celdas solares es que tienen una mayor absorbanza dentro del espectro electromagnético, en el rango completo desde el visible hasta el infrarrojo cercano. Esta ventaja permite a las perovskitas absorber por completo la luz en películas cuyo espesor puede es-

tar entre los 500 – 600 nm superando las limitaciones del grosor de otro tipo de celdas que necesitan alrededor de  $2\ \mu\text{m}$  para tener resultados comparables.

**Tendrá un costo de cerca de 0.102 US\$/W a 0.127 US\$/W dependiendo de la estructura empleada.**

**La elaboración de perovskita se puede llevar a cabo por métodos de 1 o 2 pasos.**

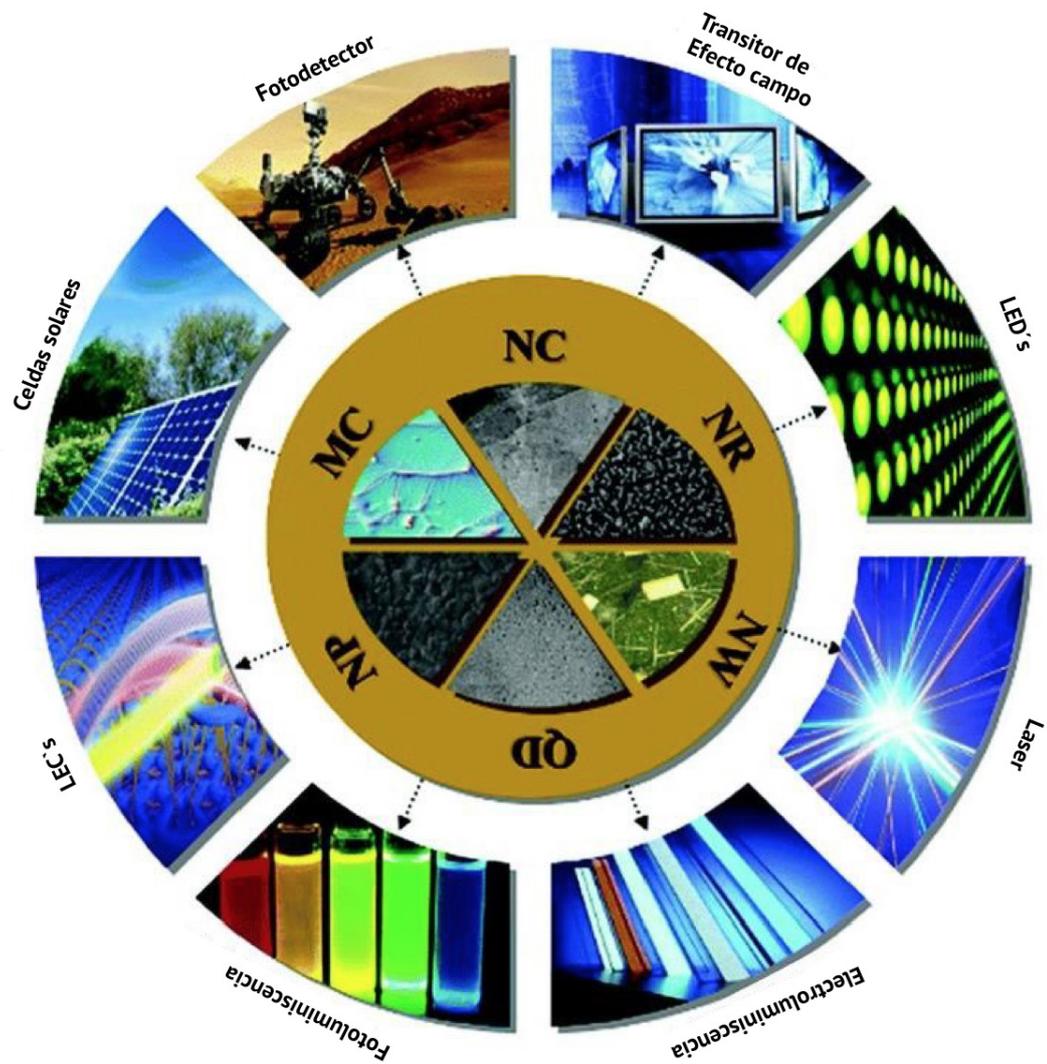
La fabricación de perovskitas puede realizarse por 2 vías empleando spin coating, en donde una solución de  $\text{PbI}_2$  se deposita sobre un sustrato, seguida de una deposición de  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$  o viceversa, este es el método por 2 pasos. El método por



*Imagen 1. Los métodos para fabricación de celdas solares fabricadas con perovskita son de 1 o 2 pasos antes del tratamiento térmico.*

un paso el cual es un proceso usualmente preferido, se disuelve ambos reactivos en un solvente y se somete al proceso de spin coating, sin embargo, proceso suele tener las dificultades de obtener películas con huecos. A pesar de que la eficiencia de este tipo de celdas solares tiene muchas expectativas a la comunidad científica, el material tiene una rápida degradación, la cual es una oportunidad de investigación, pues esto limita sus aplicaciones fotovoltaicas para usos prolongados. Para mejorar la estabilidad de las perovskitas es necesario comprender los mecanismos de degradación, causado por humedad, luz y calor. A pesar de esta limitación la amplia gama de posibilidades en la que el material puede

emplearse, sigue llamando la atención de nuevas investigaciones. Considerando el progreso alcanzado, las perovskitas son excelentes candidatos para celdas solares, LED's, laser, FET's y fotodetectores. La mejora continua en las perovskitas y sus aplicaciones optoelectrónicas, sin duda serán excitantes y altamente gratificantes. No hay dudas de que aún existen muchos retos en el camino a seguir para su integración práctica a una producción industrial, por lo que es necesario lograr una estabilidad adecuada del material, y en esta área donde las investigaciones actuales se están desarrollando y el mercado comercial se encuentra al pendiente del progreso alcanzado.



**Imagen 2.** Desde su reporte inicial en celdas solares en estado sólido con una eficiencia del 10% en 2012, ha habido un incremento en el número de investigaciones en esta área. El récord certificado de acuerdo con el laboratorio nacional de energías renovables (por sus siglas en inglés nrel), localizado en el golden, colorado, estados unidos, excede el 22%.

# Fabricación de escalón para películas delgadas de $\text{Al}_2\text{O}_3$ y curva calibración para Trimetilaluminio (TMA) en sistema ALD térmico

*Jorge Adolfo Jurado González<sup>1,2</sup>, Nicola Radnev Nedev<sup>3</sup>, Eduardo Murillo Bracamontes<sup>2</sup>, Hugo Borbón Nuñez<sup>2</sup>, Hugo Tiznado<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup>Posgrado en Nanociencias, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Carretera Tijuana-Ensenada 3918, Fraccionamiento Zona Playitas, 22860 Ensenada, Baja California, México. Km. 107 Carretera Tijuana-Ensenada, B. C., México, C. P. 22860.*

*<sup>2</sup>Centro de Nanociencias y Nanotecnología, Universidad Nacional Autónoma de México, Carretera Tijuana-Ensenada km107, Playitas, 22860 Ensenada, Baja California, México.*

*<sup>3</sup>Instituto de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California, Blvd. Benito Juárez y calle de la Normal s/n Col. Insurgentes Este, C. P. 21280 Mexicali, Baja California, México.*

*Correo electrónico: [jjurado@uabc.edu.mx](mailto:jjurado@uabc.edu.mx)*

## Palabras Clave

Depósito por capa atómica, ALD, TMA, escalón AFM, elipsometría.

## Resumen

En este proyecto se fabricaron diferentes escalones en películas delgadas de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  depositadas por la técnica de depósito por capa atómica (ALD, por sus siglas en inglés), utilizando como mascarilla diferentes diluciones de pintura cerámica resistente a altas temperaturas, se midió la altura del escalón por elipsometría y AFM. También se realizaron curvas de saturación para conocer los tiempos ideales de dosis y purga para Trimetilaluminio (TMA), obteniendo una tasa de crecimiento de 1.08 Å/ciclo.

## 1. Introducción

La técnica de depósito por capa atómica (ALD, por sus siglas en inglés) permite crecer películas delgadas manteniendo un control preciso del espesor, manteniendo la geometría nanométrica del sustrato ya sea en forma lisa, rugosa, porosa o en forma de polvo [1]. Actualmente existen más de 300 precursores metálicos estudiados para depositar por medio de ALD [2]. Un problema que se enfrenta al trabajar con un nuevo precursor es que no se conocen sus parámetros de depósito (tiempo de dosificación del precursor, purga, presión y temperatura).

La denominada “ventana ALD” es un conjunto de condiciones que, una vez conocidas, permiten controlar la tasa de crecimiento del material de elección. Para crear una ventana ALD, el parámetro clave es el espesor de la película de prueba [3].

Una manera que permite determinar el espesor de una película es mediante la fabricación de un escalón, es decir, una diferencia de altura. Para esto, se protege el sustrato con una máscara removible

que evite que el material se deposite en una sección del sustrato durante el proceso ALD. Una buena máscara es aquella donde el cambio de altura sea abrupto, lo cual permite una lectura de un perfilómetro o un microscopio de fuerza atómica (AFM). Es importante tomar en cuenta que en ALD, los recubrimientos son en tres dimensiones, esto quiere decir, que no dependen de la línea de vista. Lo anterior implica que la máscara debe sellar la entrada de los gases de reacción por debajo de ella, y así evitar depósitos. Además, la máscara deberá soportar temperaturas entre 100-400 C, y poder ser removida completamente con procesos químicos y mecánicos suaves, de manera que no se dañe el material depositado.

## 2. Metodología

### *Fabricación de escalón de $Al_2O_3$ para AFM*

Se realizaron 3 diluciones con agua de pintura cerámica resistente a altas temperaturas (máscara), cada dilución se aplicó con un pincel de punta hebra fina sobre la superficie de un sustrato de silicio tipo-p (100) (**Figura 1.**)



**Figura 1.** Sustrato de silicio con máscara removible de pintura cerámica resistente a altas temperaturas.

Cada muestra fue sometida a 100 ciclos ALD de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  en un reactor Beneq TFS-200 (equipo localizado en CNYN-UNAM, Ensenada), todo a 100 C, utilizando nitrógeno ( $\text{N}_2$ ) como gas de arrastre. Una vez depositadas las películas se procedió a remover la máscara con acetona en un hisopo de algodón (Q-tips).

La medición del espesor se realizó mediante elipsometría espectroscópica utilizando un sistema M-2000 J.A. Woollam Co. (equipo localizado en el Instituto de Ingeniería de la UABC, campus Mexicali) utilizando un modelo Si-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Cody-Lorentz) (**Figura 2**). Se compararon los resultados con los espesores obtenidos en el microscopio de

fuerza atómica (AFM, por sus siglas en inglés) Park System modelo XE-70 (equipo localizado en CNYN-UNAM, Ensenada).

### **Curva de saturación-dosis para TMA**

Para determinar el tiempo adecuado de dosis para Trimetilaluminio (TMA) en cada depósito el tiempo de dosis del precursor fue incrementando desde 20 hasta 100 milisegundos (**Tabla 1**). El espesor de la película resultante determinó mediante la técnica de elipsometría.

Muestra	Ciclos	Dosis TMA (ms)	Purga TMA (ms)	Dosis H <sub>2</sub> O (ms)	Purga H <sub>2</sub> O (ms)
D1 TMA	100	20	750	150	750
D2 TMA	100	30	750	150	750
D3 TMA	100	50	750	150	750
D4 TMA	100	75	750	150	750
D5 TMA	100	100	750	150	750

**Tabla 1.** Parámetros de depósito para curva de saturación-dosis.

### Curva de saturación-purga para TMA

Similar a la curva de saturación-dosis se determinó el tiempo adecuado de purga para TMA. En cada depósito el tiempo de purga TMA fue incrementando desde 250 hasta 1500 milisegundos (**Tabla 2.**) El espesor de la película resultante se determinó mediante la técnica de elipsometría.

Muestra	Ciclos	Dosis TMA (ms)	Purga TMA (ms)	Dosis H <sub>2</sub> O (ms)	Purga H <sub>2</sub> O (ms)
P1 TMA	100	30	250	150	750
P2 TMA	100	30	500	150	750
P3 TMA	100	30	750	150	750
P4 TMA	100	30	1000	150	750
P5 TMA	100	30	1500	150	750

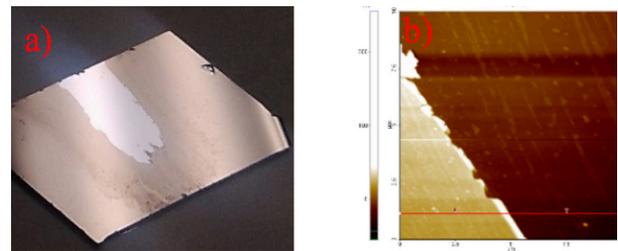
**Tabla 2.** Parámetros de depósito para curva de saturación-purga.

## 3. Resultados y Discusiones

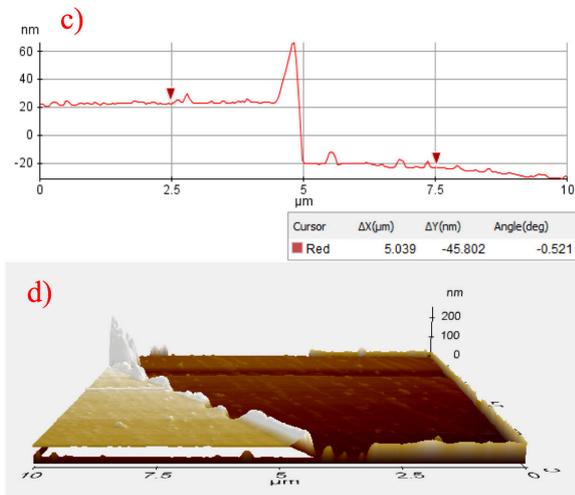
### Escalón AFM

Dilución 1:1

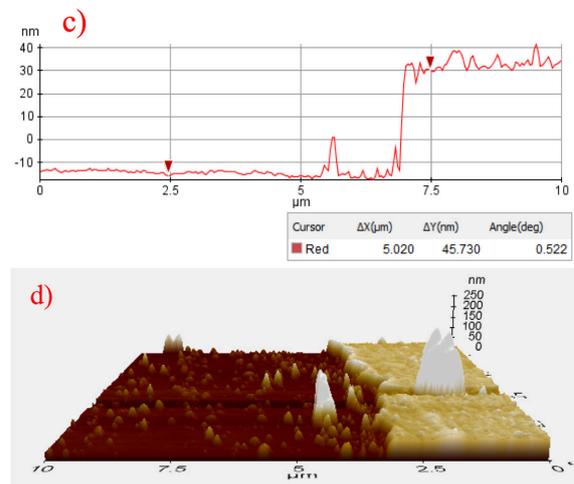
Para la disolución 1:1 (**Figura 3.**) se obtuvo un escalón con un espesor de ~45 nm por AFM, este resultado se comparó con elipsometría en donde se obtuvo un espesor de 42.6 nm. Esta disolución fue la más difícil de remover de manera mecánica debido a que la pintura tiene una consistencia espesa.



**Figura 3.** Escalón para la disolución 1:1. a) Fotografía de la película y escalón, b) imagen 2D AFM, c) gráfica de diferencia de alturas y d) imagen 3d AFM.



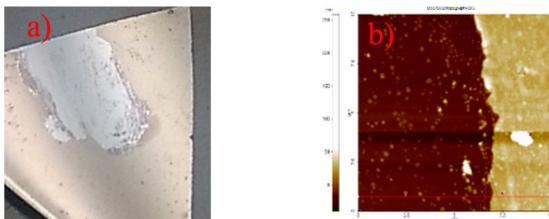
**Figura 3.** Escalón para la disolución 1:1. a) Fotografía de la película y escalón, b) imagen 2D AFM, c) gráfica de diferencia de alturas y d) imagen 3d AFM.



**Figura 4.** Escalón para la disolución 1:3. a) Fotografía de la película y escalón, b) imagen 2D AFM, c) gráfica de diferencia de alturas y d) imagen 3d AFM.

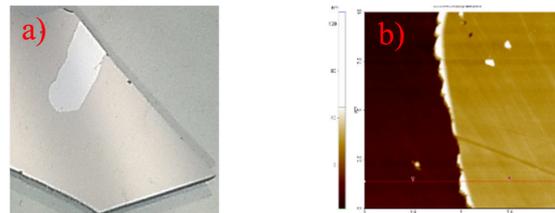
Dilución 1:3

Para la disolución 1:3 (**Figura 4.**) se obtuvo un escalón similar a la muestra anterior con un espesor de ~45 nm por AFM, este resultado se comparó con elipsometría en donde se obtuvo un espesor de 42.34 nm. Se observa que en la parte del sustrato quedaron residuos de pintura, por ello, la rugosidad de la muestra aumento.



Dilución 1:5

Para la disolución 1:5 (**Figura 5.**) se obtuvo un escalón con un espesor de ~47 nm por AFM, este resultado se comparó con elipsometría en donde se obtuvo un espesor de 41.3 nm. Esta dilución fue la más fácil de remover debido a la menor concentración de pintura, además la rugosidad tanto en el sustrato como en el depósito no se vieron afectadas.



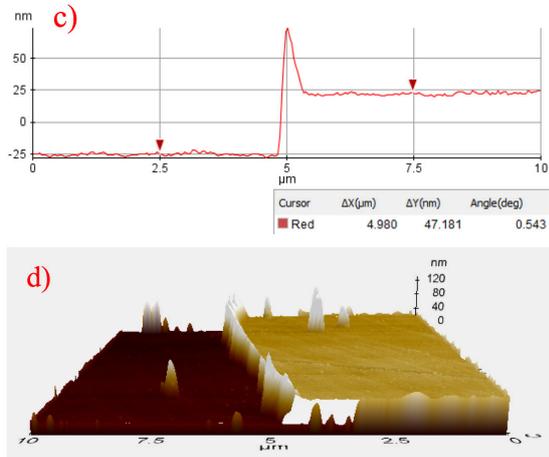


Figura 5. Escalón para la disolución 1:5. a) Fotografía de la película y escalón, b) imagen 2D AFM, c) gráfica de diferencia de alturas y d) imagen 3d AFM

Muestra	Dilución	Espesor escalón Elipsómetro (nm)	Espesor escalón AFM (nm)
Dilución 1	1:1	42.6	~45
Dilución 3	1:3	42.3	~45
Dilución 5	1:5	41.3	~47

Tabla 3. Resultados de espesor para las diferentes diluciones.

### Curva de saturación-dosis

Se obtuvo una tasa de crecimiento para cada muestra dividiendo el espesor entre el número de ciclos, en la **Tabla 4.** se observan las tasas de crecimiento para las diferentes muestras. Se observa un con-

trol del espesor a 50 ms de dosis de TMA (**Figura 6.**) con una tasa de crecimiento de 1.08 (Å/c) (**Tabla 4.**)

Muestra	Tasa de crecimiento (Å/c)
D1 TMA	1.03
D2 TMA	1.05
D3 TMA	1.08
D4 TMA	1.08
D5 TMA	1.09

Tabla 4. Tasa de crecimiento obtenidas en las diferentes muestras.

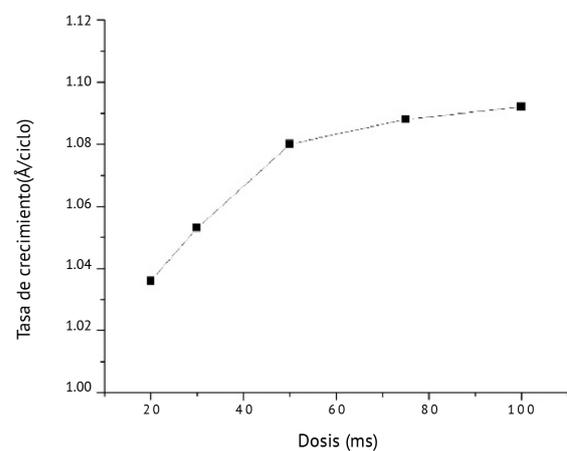


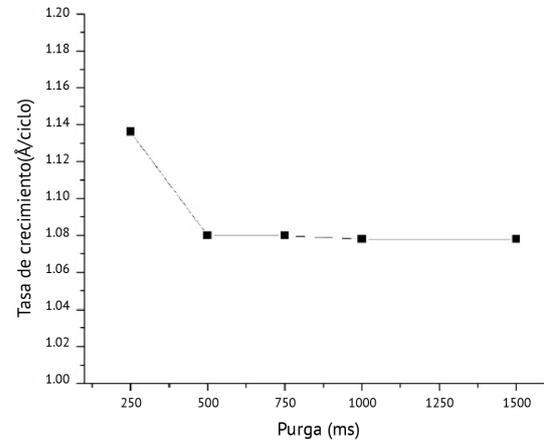
Figura 6. Curva de dosis para TMA a 100 °C.

### Curva de saturación-purga

Se observa un control del espesor con 500 ms de purga para TMA (*Figura 7.*) con una tasa de crecimiento de 1.08 (Å/c) (*Tabla 5.*)

Muestra	Tasa de crecimiento (Å/c)
P1 TMA	1.13
P2 TMA	1.08
P3 TMA	1.08
P4 TMA	1.07
P5 TMA	1.07

*Tabla 5.* Tasa de crecimiento obtenidas en las diferentes muestras.



*Figura 7.* Curva de saturación-purga para TMA a 100 °C.

## 4. Conclusiones

Todas las diluciones de la pintura cerámica resistente a alta temperatura, son buenos candidatos para fabricar escalones. Cabe destacar que la dilución 1:5 resulta más fácil de remover en comparación con las demás disoluciones. En la “Curva de saturación”

se obtuvo un control del espesor con 50 ms dosis de precursor y una tasa de crecimiento de 1.08 Å/ciclo. En la “Curva de purga” se obtuvo un control del espesor con una purga de 500 ms y una tasa de crecimiento de 1.08 Å/ciclo.

### Agradecimientos

A la Red Temática de Energía Solar del CONACyT, por su financiamiento para la realización de la estancia de investigación en el Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California.

A DGAPA-UNAM por el apoyo brindado en los proyectos IT100314, IN107715, IN112117, PE101517 y PE101317. Al Dr. Javier López Medina por su apoyo en la síntesis y caracterización de películas delgadas por ALD.

Al Dr. Roberto Machorro por su apoyo en la caracterización elipsométrica de las películas delgadas. Al M.C. David Domínguez por su apoyo para el desarrollo de este proyecto.

## REFERENCIAS

- [1] M. Ritala, “Atomic layer deposition (ALD) : from precursors to thin film structures,” vol. 409, pp. 138–146, 2002.
- [2] L. M, N. J, and R. M, “Atomic Layer Deposition,” in *Comprehensive Materials Processing*, vol. 4, Finland: Elsevier, 2014, pp. 101–123.
- [3] M. R. Saleem, R. Ali, M. B. Khan, S. Honkanen, and J. Turunen, “Impact of Atomic Layer Deposition to Nanophotonic Structures and Devices,” *Front. Mater.*, vol. 1, p. 18, Oct. 2014.

## Crecimiento de películas delgadas de ZnO mediante la técnica de depósito atómico en capas

*Ricardo Rangel<sup>1</sup>, José Luis Cervantes<sup>2</sup>, Juan José Alvarado<sup>3</sup>*

*<sup>1</sup>División de estudios de posgrado, Facultad de Ingeniería Química, Universidad Michoacana de S.N.H., Morelia, Michoacán, México.*

*<sup>2</sup>Estudiante del programa de Doctorado en Ciencias en Ingeniería Química, División de estudios de posgrado, Facultad de Ingeniería Química, Universidad Michoacana de S.N.H., Morelia, Michoacán, México.*

*<sup>3</sup>Departamento de Física Aplicada, CINVESTAV-Unidad Mérida, Mérida Yucatán, México.*

Las propiedades que presenta el óxido de zinc ZnO, se deben a la peculiaridad que posee su estructura cristalina, en la cual la diferencia de electronegatividad entre el zinc y el oxígeno produce un alto grado de ionicidad en su enlace; esto provoca una repulsión considerable entre sus nubes de carga, haciendo que sus átomos se encuentren suficientemente alejados [1]. Estas vacancias permiten transiciones electrónicas y recombinaciones que generan emisiones en el material, otorgándole excelentes propiedades electrónicas.

En la actualidad existen varias técnicas (métodos físicos y químicos) para preparar nanoestructuras, por ejemplo: el método de alta temperatura vapor-líquido-sólido, depósito por láser pulsado (PLD), depósito electroquímico en membranas porosas, crecimiento químico acuoso, depósito atómico en capas (ALD). Estos procedimientos son empleadas en la fabricación de películas, nanotubos, nanoprismas y demás configuraciones a nivel nanométrico, con el propósito de modular el crecimiento y las propiedades

del material. Las síntesis que han destacado sobre las demás, son aquellas que permitan la construcción de un material muy preciso y reproducible. Los métodos mixtos permiten tener esta versatilidad, dentro de los

cuales podemos mencionar al depósito atómico en capas, combinado posteriormente con la síntesis solvotérmica; técnica que posibilita obtener películas homogéneas, de dimensiones precisas y altamente reproducibles [2-4].

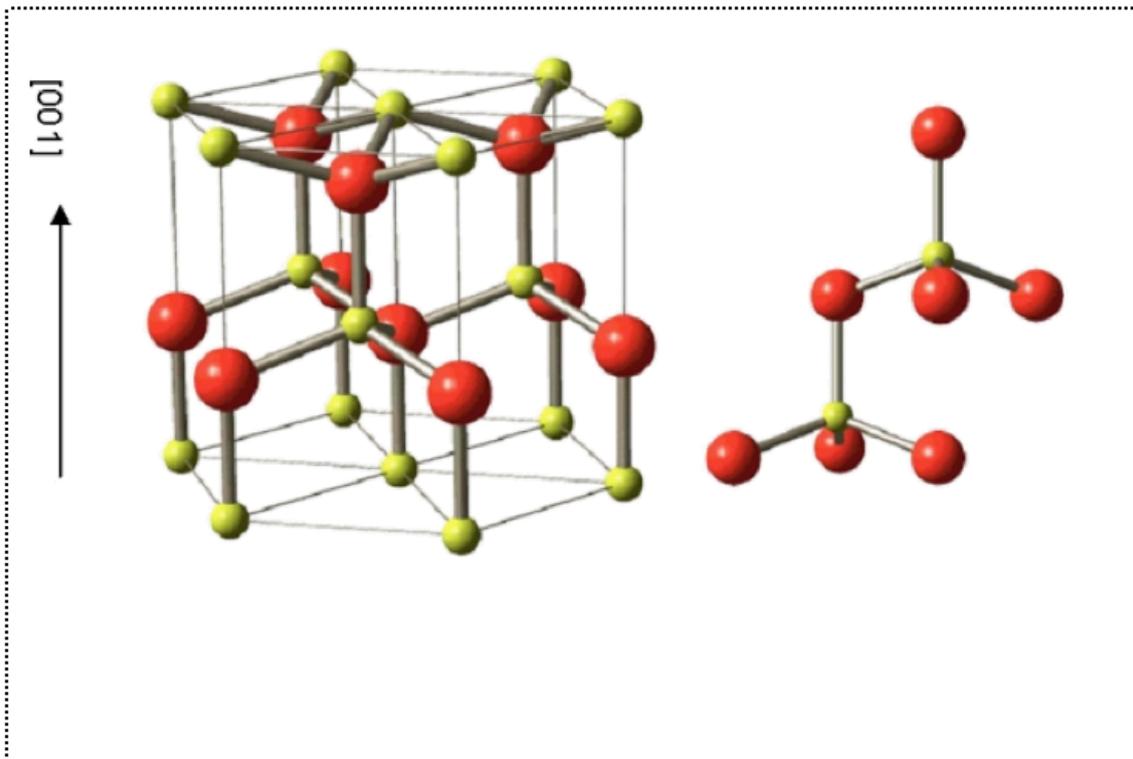


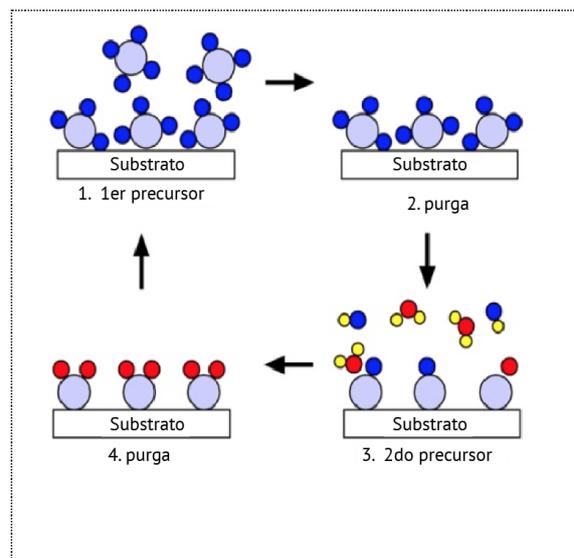
Figura 1. Estructura cristalina ZnO.

## Depósito por Capas Atómicas (ALD)

El depósito por capas atómicas o ALD (Atomic Layer Deposition), por sus siglas en inglés, es un método alternativo del depósito de películas en fase gaseosa, basado en la reacción de la superficie hasta saturarla. A diferencia de las técnicas de depósito de vapor químico, en ALD los vapores de origen son pulsados en el reactor alternadamente, de uno en uno, separados por periodos de purga y evacuación. En cada paso se expone el precursor hasta saturar la superficie con una capa mono-molecular del mismo. Esto da como resultado un sistema de auto-limitación para el crecimiento de la película. Obteniendo características ventajosas como uniformidad, crecimiento a bajas temperaturas, con un espesor pequeño y preciso [5-7].

En el método de ALD, el crecimiento de la película se lleva a cabo de una manera cíclica dentro del reactor; donde tienen lugar miles de ciclos, lo cual es programando mediante un sistema de cómputo, automatizando esta metodología. En el caso más simple, un ciclo consta de las etapas siguientes y que se esquematiza en la **Figura 2**.

1. Exposición del primer precursor
2. Purga de la cámara de reacción
3. Exposición del segundo precursor
4. Purga o evacuación.



**Figura 2.** Etapas del ciclo del depósito atómico en capas.

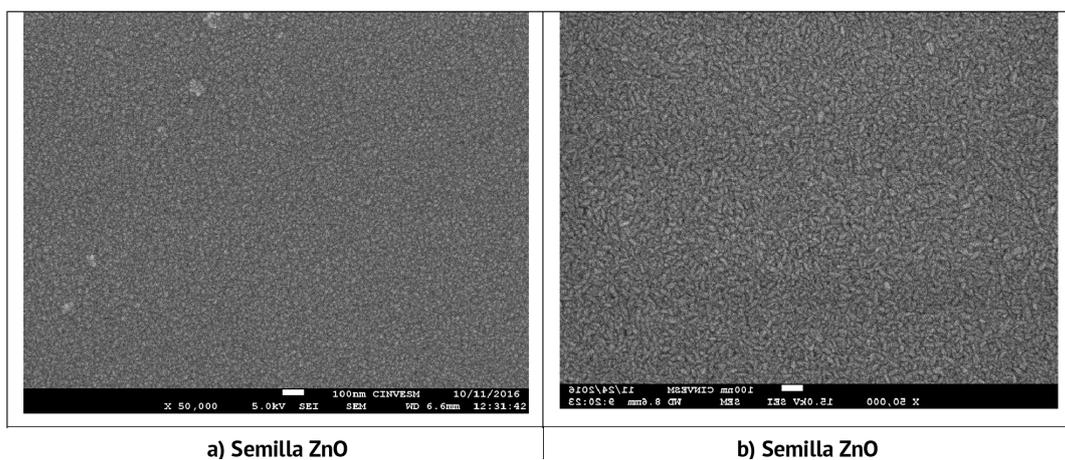
Este ciclo se repite tantas veces, como sea necesario hasta obtener el espesor deseado de la película. El equipo empleado para el crecimiento de la semilla de ZnO fue un reactor de ALD “BENEQ-TFS200” (*Atomic Layer Deposition System*), con un flujo de 250 sccm (centímetro cúbico por minuto estándar) como gas inerte de acarreo de precursores, para el flujo de la purga de los materiales que no reaccionaron fue de 300 sccm. El vacío alcanzado dentro de la cámara del reactor fue de 10

mbar (.0098 atm). La temperatura dentro de la cámara del reactor fue de  $190^{\circ}\text{C}$ . El tiempo de exposición de los precursores fue de 30 ms para el dietilzinc y de 30 ms para el agua, seguidos de 500 ms de tiempo

de purga. Como resultado obtendremos estructuras como las mostradas en las **Figuras 4 a) y 4 b)**. En estas imágenes se muestra un patrón de crecimiento en forma de semillas con orientación diversa.



*Figura 3. Esquema del reactor de ALD BENEQ.*



**a) Semilla ZnO**

**b) Semilla ZnO**

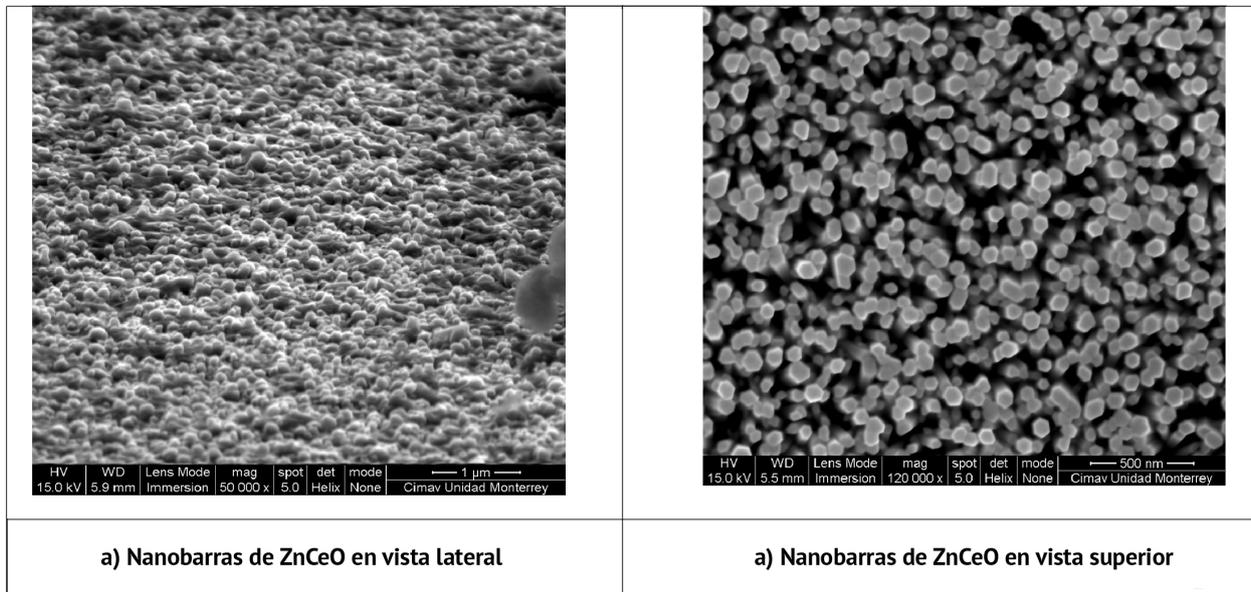
*Figura 4. Imágenes de microscopía de barrido de la semilla inicial de ZnO.*

Para promover el crecimiento de las estructuras en forma de barras, se empleó horno de micro ondas. Esta síntesis de las nanoestructuras de ZnO se realizó en un horno de microondas Shytos 3000 de la marca Anton Para, empleando una potencia de trabajo de 600W. La rampa de calentamiento en cada uno de los experimentos fue de 5°C/min.

Mientras que en las **Figuras 6 a) y 6 b)** se presentan detalles del crecimiento de estas estructuras una vez que se someten a un crecimiento en un horno de microondas especial, el cual es consta de un recipiente cerrado y bajo condiciones de temperatura y de presión controladas en contacto con una solución de  $\text{Ce}(\text{NO}_3)_2$ .



*Figura 5. Equipo de microondas utilizado en la síntesis solvotérmica.*



*Figura 6. Imágenes de microscopía de barrido de estructuras hexagonales de ZnO y de ZnCeO.*

Como resultado de este procedimiento mixto es posible obtener películas delgadas de unos nanómetros de espesor. Ya sea como compuestos puros de ZnO; o bien, en una etapa posterior impurificarlos para

producir compuestos con una composición tan precisa como  $\text{Zn}_{0.98}\text{CeO}_{0.02}$ . Estas estructuras están siendo investigadas en nuestro grupo de trabajo como películas fotoluminiscentes y como películas sensoras de gases.

## Conclusiones

Es posible fabricar estructuras nanométricas crecidas epitaxialmente a través del método mixto ALD– Solvotérmico; con el que es posible obtener estructuras hexagonales tipo wurtzita con buena calidad cristalina, y si es requerido, pueden impurificarse con algunos elementos. También es posible lograr la síntesis de películas delgadas de gran calidad y con características adecuadas para aplicación en el campo de las celdas solares, sensores de gases. Así mismo, películas con propiedades ópticas específicas, buscando reducir los costos, fácilmente reproducibles; así como mejorar el rendimiento de las mismas.

## Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo de la Red de Energía Solar. Por su apoyo y colaboración a los técnicos académicos Wilian Cahuich, Dora Huerta, José Bante, Daniel Macías y Beatriz Heredia, adscritos al CINVESTAV-Unidad Mérida.

## REFERENCIAS

- [1] Guozhong Cao, Ying Wang. Nanostructures and Nanomaterials: Synthesis, Properties, and Applications. World Scientific Publishing Co Pte Ltd. 04 Jun 2011. Singapore, Singapore. 2nd Revised Edition.
- [2] Paul T. Craddock. Zinc in classical antiquity, 2000 years of zinc and brass. London British Museum. 1990. ISBN 0861591240.
- [3] J. S. Kharakwal and L. K. Gurjar. Zinc and Brass in Archeological Perspective. *Ancient Asia*. Vol 1, 2006. 139-159.
- [4] S. K. Patra and P. Roy Chaudhuri. Pijus Kanti Samanta, "Green Photoluminescence from Chemically Synthesized Zinc Oxide Nanostructures.," *International Journal Of Materials Sciences.*, pp. 239-242, noviembre 2009.
- [5] Rodolfo Zanela, "Metodologías para la síntesis de nanopartículas controlando forma y tamaño," *Mundo Nano*", vol. 5 no.1, Ene-Jun 2012.
- [6] Sang Eun Park, Jung Chul Lee and Pung Keun Song. Se Hun Park, "Photoluminescence Characterization of Al-doped ZnO films Deposited by Using DC Sputtering.," *Journal Of The Korean Physical Society*, pp. 1344-1347, marzo 2009.
- [7] R.Rangel, L.Chávez Chávez, E.Martinez, P. Bartolo-Pérez, Structural and transport properties study of nanostructured  $CeO_2$ ,  $Ce_{1-x}Ru_xO_2$  and  $Ce_{1-x}In_xO_2$  thin films, *Phys. Status Solidi B*, Vol. 249, No. 6, 1199–1205, 2012.



# Diseño de un sistema electrónico para amplificación y enfriamiento del detector de un radiómetro óptico

*J. O. Aguilar<sup>1</sup>, R. Castrejón-García<sup>2</sup> y O. A. Jaramillo<sup>3</sup>*

*<sup>1</sup>Universidad de Quintana Roo, Boulevard Bahía s/n esq. Ignacio Comonfort Col. Del Bosque. C.P. 77019 Chetumal, Quintana Roo, México Tel:(983) 8350300 ext. 224.*

*<sup>2</sup>Dirección de Desarrollo Tecnológico, Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, Luis Enrique Erro # 1, Tonantzintla, Puebla, 72840, México.*

*<sup>3</sup>Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México, Privada Xochicalco s/n, Temixco, Morelos 62580, Mexico.*

## 1. Introducción

En el Instituto de Energías Renovables de la Universidad Nacional Autónoma de México, se ha estado utilizando un radiómetro unidireccional de amplio espectro de radiación y de lectura directa [1] para determinar el flujo radiativo de diferentes cuerpos y superficies a alta temperatura, así como el valor de variables radiativas como la emisividad y la transmitividad. El instrumento ha funcionado

razonablemente bien, sin embargo, se ha encontrado que la temperatura a la que se encuentra el detector influye en la exactitud de las mediciones que se realizan con el radiómetro. Por otra parte, se van a incorporar nuevos circuitos para amplificar con una mejor resolución y fidelidad la señal proporcionada por el detector.

Por las razones expuestas anteriormente, en el marco de un proyecto [2] se ha planteado como objetivo el desarrollo de

un nuevo radiómetro óptico con mejores prestaciones, con el fin de apoyar las investigaciones relacionadas con la colección, uso y aprovechamiento de la energía solar.

El radiómetro de nueva generación, tendrá entre sus innovaciones un sistema de enfriamiento para mantener el detector termopila a una temperatura constante ligeramente inferior a la temperatura ambiente. De esta forma, el error en las lecturas de flujo radiativo del nuevo radiómetro, causadas por variaciones en la temperatura del detector podrá ser eliminado; como consecuencia de ello, el nuevo radiómetro tendrá una mejor estabilidad y una mayor precisión. El enfriamiento del detector, se llevará a cabo con un dispositivo termoeléctrico conocido como celda Peltier, la cual consiste en la unión de dos metales distintos, de tal forma que si se hace pasar una corriente eléctrica a través de dicha unión, se establece una diferencia de temperatura  $\Delta T$  entre los dos metales. Si uno de los metales, por mencionar, el que esté más caliente, se serena artificialmente, entonces el metal que está frío se templará aún más para seguir manteniendo esa  $\Delta T$ . Para lograr el enfriamiento del detector del radiómetro, el lado frío de la celda Peltier estará en contacto con el detector, mientras que el lado caliente estará en contacto con un disipador, que disipará el calor al aire ambiente.

El control de la temperatura del detector lo realizará un sistema electrónico que suministrará la corriente necesaria a la celda Peltier para mantener al detector a una temperatura constante.

## 2. Desarrollo

En la **Figura 1**, se muestra el circuito electrónico del radiómetro antiguo. El circuito se puede dividir en dos partes principales. Estas son: la de la rectificación de señal de 120 VCA y la de amplificación de la señal. La parte de rectificación de señal tiene dos salidas de  $\pm 4.5$  Vdc para alimentar el convertidor analógico digital (CAD) y la pantalla; y otra para alimentar los amplificadores operacionales (OpAmps), que se utilizan en el acondicionamiento de la señal del detector, que es el componente encargado de sensar la energía radiada por el objeto a medir. El acondicionamiento de señal se realiza a través de un arreglo de amplificadores operacionales colocados en cascada, empezando por un amplificador diferencial. El offset debe ser capaz de producir una f.e.m artificial equivalente a la radiación ambiental producida por los cuerpos a temperatura ambiente (incluyendo el cuerpo del radiómetro y termopila misma). Puede ser offset interno, o externo mediante una derivación de las fuentes de 4.5 V.

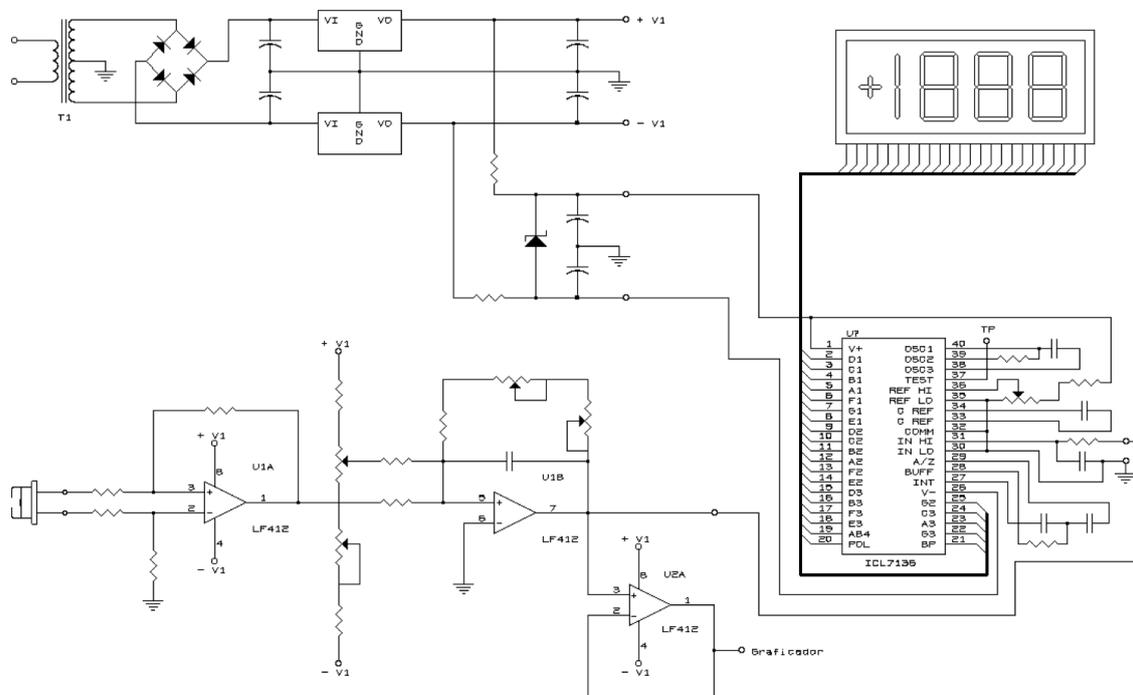


Figura 1. Sistema electrónico del radiómetro antiguo.

### 3. Circuito de rectificación

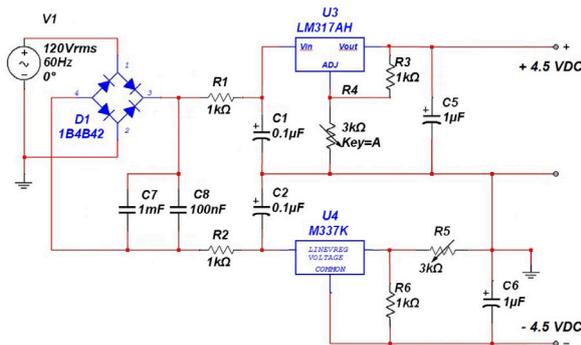
El circuito de rectificación de señal fue reproducido en Multisim-13, pero se encontraron dificultades al simular la regulación utilizando los diodos Zener. Al simular el circuito propuesto, no había regulación por parte de los diodos, por lo que fue corregido utilizando reguladores variables de voltaje (LM317 para +V y LM337 para -V). Para obtener una salida de  $\pm 15$  Vdc y mantener los 4.5 VCD habrá que cambiar los reguladores

LM7812 y LM7912 por LM7815 y LM7915 respectivamente, modificando también las resistencias de salida de los reguladores variables por 290  $\Omega$  en positivo y 210  $\Omega$  en negativo (se mantienen las de 750  $\Omega$  y 550  $\Omega$ ). Se propone no utilizar la salida de 12 VCD, pues al utilizar los amplificadores LM324, éstos pueden ser alimentados por los mismos 4.5 VCD que utiliza el CAD. Al hacer esto se podría reducir costos de diseño, pues se reduce la cantidad de componentes a utilizar. Estos amplificadores

tienen un rango variable de alimentación proporcionando estabilidad en sus características de amplificación a pesar de los cambios. Los valores de los capacitores fueron elegidos a través de las hojas de datos de los reguladores de voltaje. Se añadieron dos capacitores para reducir el voltaje de rizo a la salida del puente de diodos que funciona como rectificador. Las resistencias en los reguladores variables son las encargadas de definir el voltaje regulado de salida. El cual está dado por la siguiente fórmula:

$$V_{\text{out}} = 1.25 V_{\text{ref}} \left( 1 + \frac{R_3}{R_4} \right) + i_{\text{ref}} R_3$$

A continuación, se muestra en la **Figura 2**, el nuevo circuito de rectificación que incluye únicamente las salidas de 4.5 VCD, tanto la positiva como la negativa.



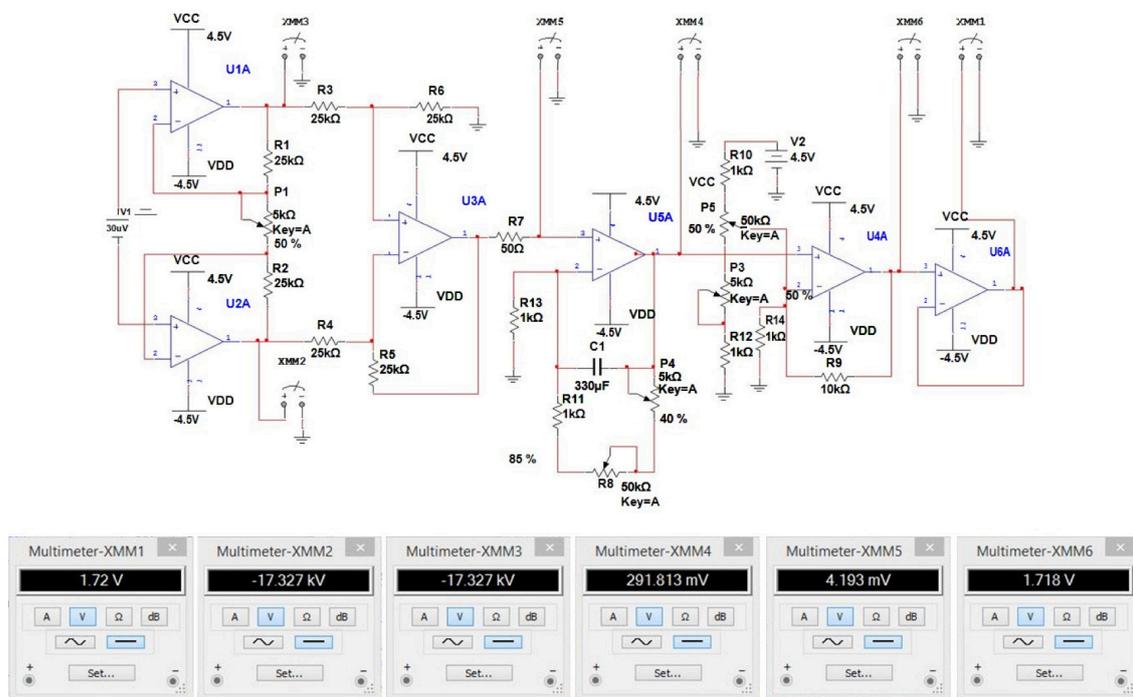
**Figura 2.** Circuito de rectificación y regulación propuesto, incluyendo únicamente las salidas de  $\pm 4.5$  Vdc.

## 4. Circuito de Acondicionamiento de la señal del detector

Al realizar la simulación del circuito de acondicionamiento de señal, se encontró que funciona mejor para señales en el rango de los mili-volts. Al utilizar micro-volts como señal de entrada, el circuito presentaba un comportamiento inadecuado, entregando voltajes negativos a la salida del circuito y mostrando un mayor error en la medición. Los mejores resultados fueron obtenidos utilizando resistencias de 20k en la entrada del amplificador diferencial. Uno de los cambios propuestos en este diseño es la utilización de amplificadores. En la **Figura 3**, se demuestra cómo puede tener un funcionamiento apropiado este circuito de acondicionamiento de señal. A través de pruebas se observó cómo, mientras más baja la señal de entrada, mayor es el error que presenta el circuito. Por esta razón, se propone utilizar un amplificador de instrumentación en lugar del amplificador diferencial. Con ello, se le da mayor sensibilidad al amplificador diferencial, un generador de instrumentación compuesto por dos amplificadores y un arreglo de resistencias a la entrada de un amplificador diferencial, como el que se muestra a continuación. En la **Figura 4**, se presenta la adición del amplificador de

instrumentación al circuito de acondicionamiento de señal, alimentado por las salidas de  $\pm 4.5$  VCD del circuito de rectificación. Este amplificador de instrumentación puede encontrarse como circuito integrado en las pastillas AD8426 e INA114, así como en muchas otras. Estas presentan diferentes voltajes de offset, así como dif-

erentes características de amplificación. Generalmente, como único componente externo a la pastilla, uno puede controlar la ganancia agregando el potenciómetro que se encuentra entre R1 y R2 en la **Figura 5**. Las resistencias de 25 k $\Omega$  fueron seleccionadas con base en los circuitos internos de los amplificadores antes mencionados.



**Figura 4.** Amplificador de instrumentación a la entrada del circuito de acondicionamiento de señal.

## 5. Circuito de Enfriamiento del detector

Para el circuito de enfriamiento se requiere la utilización de una celda Peltier, la cual estará en contacto con la termopila para poder mantenerla a una temperatura estable y asegurar su funcionamiento adecuado. La utilización de un micro-controlador no es deseable debido a la gran cantidad de componentes que utiliza (memoria, reloj, etc.). La alternativa es entonces, utilizar un circuito para controlar la dirección de la corriente que se suministra a la celda Peltier. La dirección de la corriente es la que determina si el lado de la celda que se utiliza se va a calentar o a enfriar. Una de las soluciones encontradas es un circuito integrado que tiene como propósito es-

pecífico el control de la temperatura de dichas celdas, conocido como Controlador de enfriador termoeléctrico, por sus siglas en inglés TEC. Uno de ellos es el LTC1923, el cual, con la utilización de un termistor, permite mantener una temperatura estable de la celda. Una de sus aplicaciones típicas, ejemplificadas en su hoja de datos, es en el control de temperatura de diodos láser. El problema con este circuito es que también presenta una gran cantidad de componentes externos. Una solución alternativa es el circuito integrado MAX1978, el cual permite establecer la temperatura de la celda a través de un potenciómetro o un CDA (lo que no está especificado en el caso del LTC1923), y requiere además una menor cantidad de componentes. Este circuito es mostrado en la **Figura 5**.

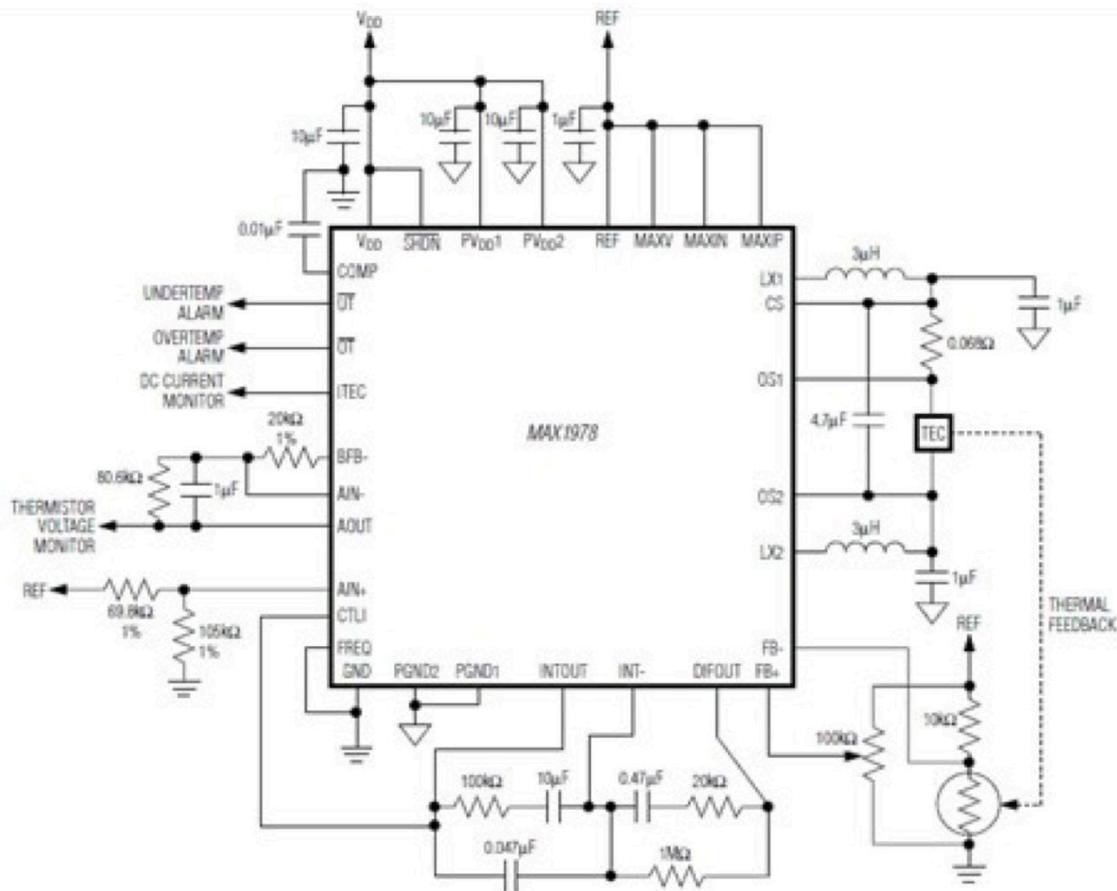


Figura 5. Controlador TEC MAX1978, configurado para enfriamiento y calentamiento mediante celda Peltier.

Para la utilización de este controlador se propone, además, el uso de una termopila en la cual, en su mismo encapsillado, se contenga un termistor. Como es el caso de la familia de componentes MLX90247, de Melexis, que cuentan con un termistor tipo PTC. Esto permitirá un acceso directo a los componentes sensibles al calor de la termopila, dándonos una lectura más precisa

de la temperatura en la termopila. Además, en la hoja de datos es posible encontrar un circuito de aplicación. El sensor y la termopila se pueden utilizar de manera independiente si esto es deseado. Aportando versatilidad al probar el funcionamiento de cada uno de los componentes. El encapsillado cuenta con 4 pines, dos para la termopila y dos para el termistor. La termopila tiene

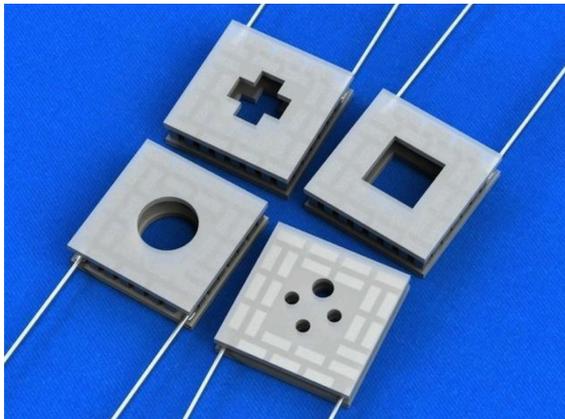
un voltaje de salida que circunda los 50  $\mu\text{V}$  ( $\pm 25\%$ ). Se deberá tomar en cuenta que el voltaje de salida será positivo siempre y cuando el objeto a medir esté a una temperatura más alta que el sensor. De lo contrario el voltaje será negativo. Esto puede requerir la utilización de un amplificador diferencial que acepte voltajes tanto positivos como negativos. Una solución propuesta se encuentra en la hoja de datos de este componente. Aquí también se propone la utilización de ciertos amplificadores para acondicionar la señal de salida. Debido a que el nuevo radiómetro va a utilizar una termopila con un tipo específico de encapsulado, se propone la utilización de celdas Peltier con perforaciones, para permitir la salida de sus conexiones y a su vez lograr un mayor contacto con la termopila y, por lo tanto, mayor efectividad en el control de su temperatura. Dichas celdas se pueden encontrar a través del distribuidor TEC Microsystems, el cual cuenta con una

gran variedad de componentes con diferentes perforaciones para ser utilizados en una gran gama de productos. En la sección *Thermoelectric coolers with holes*, se puede apreciar la flexibilidad de sus componentes, con opciones para encasillados específicos o para encasillados con un rango variable de tamaños, como se muestra en la **Figura 6**.

Un aspecto a considerar en estas celdas es la disipación de calor. Mientras un lado de la celda enfría, el otro lado genera una magnitud considerablemente mayor de calor. Por esta razón la utilización de disipadores de calor (en conjunto con un ventilador y otros materiales con propiedades de conducción térmica) puede ser necesaria. Otro podría ser la condensación generada en la celda, ya que estas pueden llegar a enfriar a temperaturas inferiores a la temperatura ambiente. La presencia de agua en los componentes puede ser un gran problema.

## 6. Conclusiones

Se lograron simular los circuitos propuestos en un simulador basado en SPICE llamado Multisim, de Texas Instruments. Además, se propusieron cambios que podrán brindar mayor precisión y una menor cantidad de componentes en los diferentes circuitos. Para el circuito de enfriamiento se encontró una pastilla de Maxim Integrated, que proporciona una forma de controlar la celda Peltier. Utilizando una termopila con un termistor integrado se puede lograr una mayor precisión en la temperatura y un diseño más sencillo del circuito. A través de esta investigación, se ha logrado una comprensión del proyecto y una modernización del circuito, que servirá de base para el desarrollo de un producto de vanguardia.



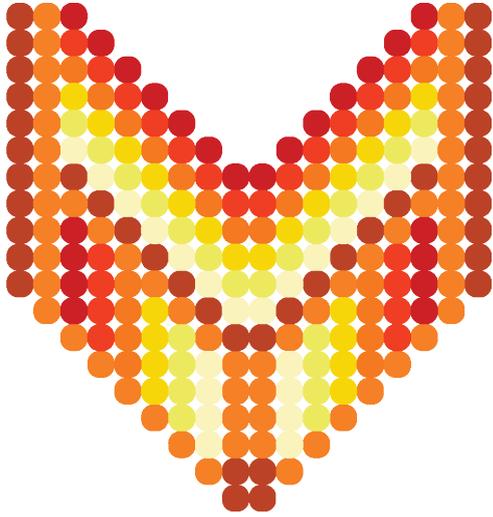
*Figura 6. Celdas Peltier con perforaciones de TEC Microsystems*

## REFERENCIAS

- [1] Castrejón-García, R., Radiómetro Unidireccional de Amplio Espectro de Radiación y de Lectura Directa, Título de Patente de Invención Número 196176, Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial, 2000.
- [2] Jaramillo Salgado, O. A., Proyecto PAPIIT, Instituto de Energías Renovables, UNAM, 2014.







# 3

## CAPÍTULO

1. Influencia de la potencia y la temperatura en películas delgadas de ITO.

# Influencia de la potencia y la temperatura en películas delgadas de ITO

*F.J. Ceh<sup>1</sup>, J.L. Peña<sup>1</sup>, Mario H. Farias<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup>Centro de investigación y de estudios avanzados del IPN-Unidad Mérida, Km. 6 Antigua carretera a Progreso. Apdo. Postal 73, Cordemex, 97310, Mérida, Yuc., México.*

*<sup>2</sup>Centro de Nanociencia y Nanotecnología, Km. 107 Carretera Tijuana-Ensenada Apdo. Postal 14, 22860, Ensenada, B.C., México.*

*e-mail: frank\_27\_javier@hotmail.com*

## Palabras Clave

RF-Sputtering, Contacto frontal, Película delgada ITO.

## Resumen

En el presente trabajo se realiza un estudio de películas delgadas de ITO depositadas por RF- Sputtering, con el objetivo de obtener los parámetros de depósito para una aplicación enfocada a celdas solares de  $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$  (CZTSe), específicamente como contacto frontal. Las películas delgadas se depositaron bajo diferentes parámetros de potencia y temperatura de sustrato, posteriormente se caracterizaron mediante espectroscopia UV-Vis, efecto Hall y Microscopia de Fuerza Atómica (AFM). La caracterización óptica mostró espectros con puntos máximos de transmitancia por encima del 90% y valores de band-gap en un intervalo de 3.21 a 3.5 eV, se obtuvo una disminución en los valores de resistividad para películas delgadas depositadas con mayor potencia y temperatura de sustrato, así como para muestras tratadas térmicamente, y las imágenes de AFM mostraron un cambio en la forma y tamaño de los granos del material con la variación de las condiciones de depósito.

## 1. Introducción

Los óxidos conductores transparentes (TCO), por sus siglas en inglés, (*Transparent Conductive Oxide*) son materiales que tienen la propiedad de conducir electricidad y simultáneamente presentar una transparencia superior al 80% en la región visible del espectro electromagnético (400-800 nm). Estos materiales están compuestos de oxígeno y uno o dos elementos metálicos como por ejemplo aluminio (Al), indio (In) o estaño (Sn), y las propiedades del material son altamente dependientes de los elementos utilizados y del método de deposición.

El ITO se obtiene dopando al  $\text{In}_2\text{O}_3$  con Sn, el cual reemplaza los átomos de  $\text{In}^{3+}$  de la estructura del óxido de indio. El estaño forma un enlace con el oxígeno, lo que resulta en  $\text{SnO}$  y  $\text{SnO}_2$  los cuales cuentan con valencia de  $2+$  y  $4+$ , respectivamente. Este estado de valencia está directamente relacionado con las propiedades eléctricas del material. Si predomina el  $\text{SnO}$  se produce una reducción en la concentración de portadores, debido a que se crean huecos (vacancias de electrones) y estos actúan como una trampa reduciendo la conductividad; mientras que, si predomina el  $\text{SnO}_2$ , el estaño actuará como donante de tipo  $n$  lo que liberará electrones de la banda de valencia produciendo que la con-

ductividad sea alta. Las películas delgadas de ITO cuentan con un band-gap óptico directo que generalmente se encuentra con valores entre 3.0 a 4.0 eV. La alta transmitancia óptica de estas películas es una consecuencia directa del valor de ancho de band-gap que presentan estos semiconductores. El borde de absorción se encuentra generalmente en el intervalo de energía correspondiente al ultravioleta del espectro solar y se desplaza a longitudes de onda más cortas con el aumento de la concentración de portadores,  $N$ .

Debido a las propiedades eléctricas y ópticas que presenta el ITO, es aplicable en diversas áreas, como por ejemplo en la variación de la transparencia en ventanas, paneles de pantallas [1], espejos reflectantes de calor, revestimiento antirreflectante y sensores de alta temperatura. El ITO se utiliza también en la estructura de celdas solares de película delgada [2], además de fungir como electrodo en la estructura de la celda solar, esta es la primera película que interactúa con el haz de luz incidente, por tal motivo esta película delgada debe ser transparente para permitir la iluminación máxima de la capa absorbente; además debe contar con una buena conductividad eléctrica y proporcionar un buen contacto óhmico con las siguientes capas de la estructura para tener una mejor recolección de las cargas producidas por la

celda solar, evitando que se tengan bajos porcentajes de eficiencia. Por lo cual este trabajo tiene como objetivo obtener películas delgadas de ITO con las propiedades ópticas y eléctricas óptimas mediante la variación de las condiciones de depósito y a través de un posterior tratamiento térmico.

## 2. Desarrollo experimental

Para realizar el estudio de los cambios en las propiedades se depositaron películas delgadas mediante un blanco de ITO (10 wt.% SnO<sub>2</sub> and 90% In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) con potencias de 80 y 90W, manteniendo la temperatura de sustrato fija en 200°C, posteriormente

para realizar la comparación de muestras depositadas a diferentes temperaturas se depositó una película a 90W y 300°C. Los parámetros presión, tiempo y flujo de gas inerte se fijan en un mismo valor como se muestra en la **Tabla 1**. Posterior al depósito las películas fueron sometidas a un tratamiento térmico a una presión constante de 800 mbar y una temperatura de 200°C en dos diferentes atmósferas, aire y nitrógeno, durante un tiempo de 35 minutos. Las propiedades ópticas, morfológicas y eléctricas de las películas delgadas fueron caracterizadas mediante espectroscopia UV-Vis, efecto Hall y microscopia de fuerza atómica (AFM), respectivamente.

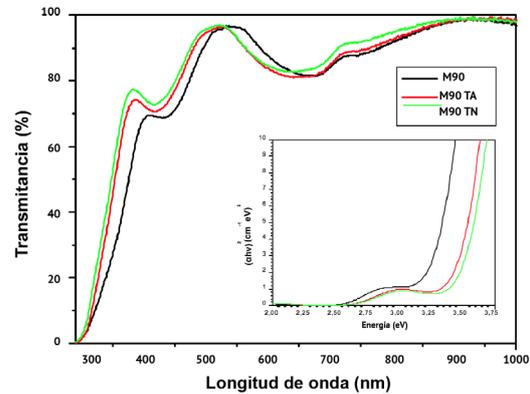
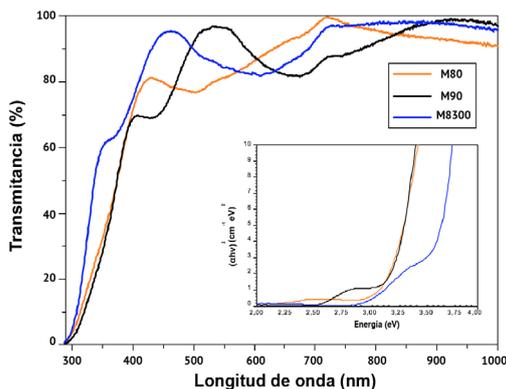
Muestra	Temperatura (°C)	Potencia (Watts)	Presión (mTorr)	Tiempo (min)	Ar (sccm)
M80	200	80			
M90	200	90	20	30	30
M300	300	90			

*Tabla 1. Parámetros de depósito para películas delgadas de ITO.*

### 3. Resultados y Discusiones

#### 3.1. Caracterización Óptica

Los espectros de transmitancia y la relación contra de películas delgadas de ITO depositadas a diferentes potencias y temperaturas (a) y su posterior tratamiento térmico (b) se presentan en la **Figura 1**. en el intervalo de longitud de onda de 290 a 1000 nm. En general, todas las muestras presentan un máximo de transmitancia por encima del 90%. Se observa que con el aumento de la potencia resultan muestras con un menor porcentaje de transmitancia. Por otro lado el incremento de la temperatura durante el depósito influye en el corrimiento de los espectros hacia longitudes de onda menores y en la disminución del borde de absorción debido al efecto Burstein-Moss [3].



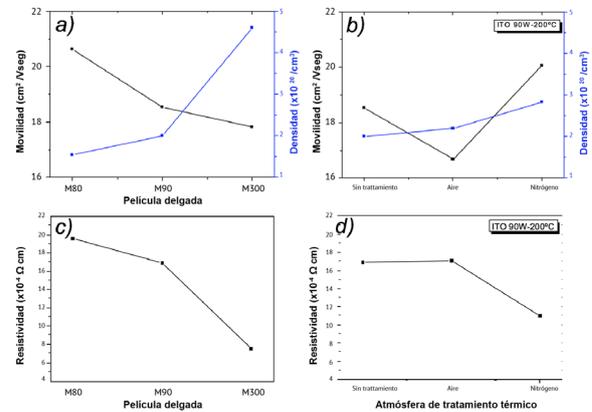
**Figura 1.** Espectros de transmitancia y relación  $(\alpha h\nu)^2$  contra  $h\nu$  de películas a a) diferentes potencias y temperaturas y b) con tratamiento térmico.

Todas las muestras con tratamiento térmico mantienen la forma del espectro de transmitancia de su correspondiente muestra sin tratamiento, pero las longitudes de onda a la cual las películas transmiten se ven influidas por este, debido a que los espectros sufren un corrimiento hacia longitudes de onda menores, misma variación observada en las películas depositadas con diferentes temperaturas de sustrato, lo cual posiblemente se deba al incremento de portadores libres por la incorporación de Sn y al incremento de cristalinidad en la estructura. La influencia de la atmósfera durante el tratamiento térmico se presenta con un espectro con un mayor corrimiento en las muestras

tratadas en atmósfera de nitrógeno, en comparación con las muestras tratadas en aire. Las muestras **M80 y M90** presentaron valores similares de band-gap, por otro lado, un aumento en la temperatura de sustrato causa un incremento en este valor, debido a que la muestra depositada a 90W pasa de 3.26 eV al utilizar 200°C a 3.60 eV para un depósito realizado a 300°C. Las películas delgadas con tratamiento térmico sufren variaciones significativas en su valor de band-gap, las muestras presentaron un incremento posterior al calentamiento, mostrando un mayor cambio la película delgada tratada en atmósfera de aire (3.45 eV).

### 3.2. Caracterización Eléctrica

De acuerdo con el fenómeno de Burstein-Moss, una de las razones para el cambio del borde de absorción, es la alta concentración de portadores de carga. Por lo tanto, en estas muestras debería aumentar con el cambio de las condiciones de depósito y con el posterior tratamiento térmico, esto se confirma por la concentración de portadores que se muestra en la **Figura 2**.



**Figura 2.** Movilidad, concentración de portadores y valor de resistividad eléctrica de muestras a (a,c) diferentes potencias y temperaturas y (b,d) con tratamiento térmico.

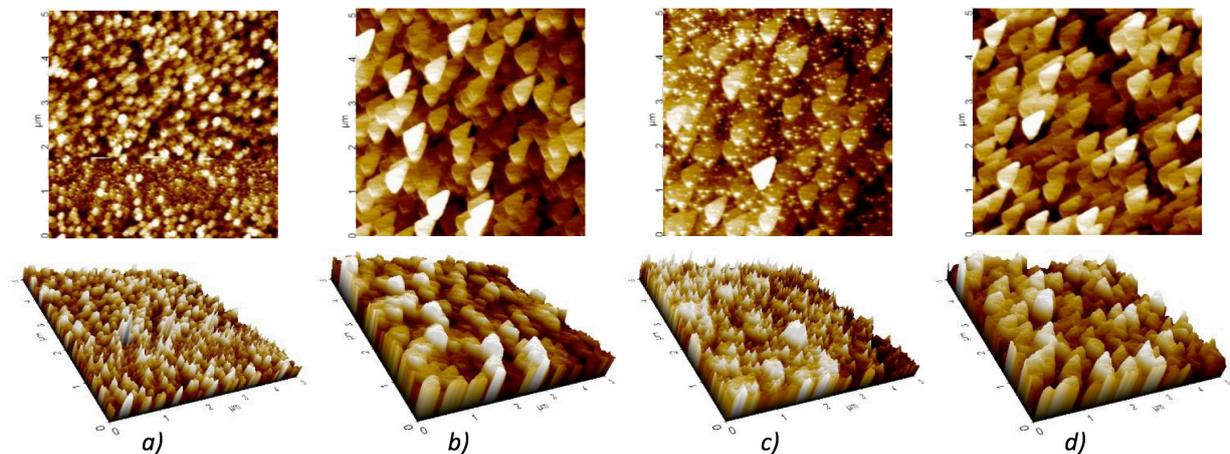
Se tiene que para películas delgadas depositadas con una mayor potencia y temperatura de sustrato la densidad de portadores tiene un aumento, por el contrario, la movilidad tiende a disminuir. El cambio en los portadores es debido a que con la variación de potencia se logra tener una mayor cantidad de material depositado, al utilizar una potencia de 90W la tasa de depósito será mayor a la que se obtiene con un depósito a 80W, esto resulta en películas delgadas con una mayor cantidad de material y estructuras con una mejor cristalinidad. El incremento en

la densidad de portadores al incrementar la temperatura se debe a la cantidad de energía que reciben los átomos cuando se encuentran en el sustrato, una mayor temperatura proporciona la energía suficiente para que el Sn pueda incorporarse en la estructura. Los valores de movilidad, densidad de portadores y resistividad para muestras con tratamiento térmico en atmósferas de aire y nitrógeno se presentan en la **Figura 2. (b,d)**; se observa que las muestras disminuyen su valor de resistividad después del calentamiento. La resistividad está relacionada con la concentración de corriente y de la movilidad de cargas, en las películas de ITO la principal fuente de portadores de carga es de los dopantes de Sn y de las vacancias de oxígeno, cuando se realiza el tratamiento térmico con aire como atmósfera el oxígeno libre reaccionará con las películas, la reacción reducirá las vacancias de oxígeno y la concentración de portadores que da lugar a un aumento en el valor de resistividad. Al realizar el tratamiento térmico en una

atmósfera de nitrógeno las vacancias de O no se ocupan, lo que mejora los valores de resistividad debido a que las muestras logran una estructura más cristalina [4].

### 3.3. Caracterización Morfológica

Las imágenes AFM de las películas delgadas depositadas con diferentes potencias y temperaturas de sustrato, así como la tratadas térmicamente se obtuvieron de un área de  $5 \times 5 \mu\text{m}$  y en la **Figura 3.** se presentan la vista superior y lateral de su morfología. Un incremento en la potencia genera un cambio en la geometría de los granos en la superficie del material, pasando de granos en forma circular (**Figura 3a**) a granos con forma triangular (**Figura 3b**), además por encima de estos se observan pequeños granos en forma alargada, esta variación es debido a que a altas potencias se tiene una mayor cantidad de material a causa de una alta tasa de depósito, así como de cambios estructurales como una mejor cristalinidad.



**Figura 3.** Imágenes AFM con vista superior y lateral correspondientes a las muestras a) M80, b) M90, c) M300 y d) M90TA.

Al incrementar la temperatura de sustrato se observan los mismos granos bases en forma de triangular (**Figura 3c**), sin embargo, los pequeños granos que se encuentran en la superficie de estos adquieren una nueva geometría, triángulos con una terminación en punta, esto sucede posiblemente a un cambio en las características estructurales del material, *Meng, et al.* [5] ha reportado que, a altas temperaturas, el ITO sufre modificaciones debido al cambio de orientación preferencial de sus celdas unitarias, resultando en una nueva morfología.

Posterior al tratamiento térmico se presenta una superficie más uniforme, resultado de una estructura con mayor cristalinidad, lo cual es debido a la energía que se le proporciona a la muestra en forma de

calor, esto logra que los átomos puedan reacomodarse y enlazarse a la estructura. La **Tabla 2.** presenta los valores de rugosidad obtenidas de las imágenes AFM presentadas en la **Figura 3.**, con el incremento de la potencia (**a y b**) se tiene una disminución en el valor de la rugosidad, esto debido a que tiene una menor cantidad de granos pero de un mayor tamaño, lo que hace a la superficie más homogénea; al incrementar la temperatura de sustrato (**b y c**) se tiene un incremento en el valor de rugosidad, debido a que la forma actual de los granos genera una gran cantidad de desniveles a causa de que los granos cuentan con forma de pico; finalmente el tratamiento térmico en atmósfera de aire (**b y d**) incrementa el valor de la rugosidad, esto puede ser cau

sado por el incremento en el tamaño de los granos, el cual es debido a que su estructura adquirió una mejor cristalinidad.

Muestra	Rugosidad (nm)
ITO80	3.607
ITO90	2.560
ITO300	3.116
ITO90TA	2.741

*Tabla 2. Valores de rugosidad de películas delgadas de ITO.*

## 4. Conclusiones

Se obtuvieron películas delgadas de ITO depositadas con diferentes potencias y temperaturas de sustrato con puntos máximos de transmitancia por encima del 90%, se encontró que la variación de potencias no genera un cambio significativo en el valor de band-gap, por otro lado, una mayor temperatura de sustrato resulta en un incremento, comportamiento que se observa de igual manera al realizar un tratamiento térmico, en donde dependiendo de la atmósfera utilizada se obtiene una mayor variación (nitrógeno>aire). Una mayor potencia y temperatura de sustrato proporcionan al material una cantidad superior de portadores, menor valor de movilidad y menor valor de resistividad, por su parte el

tratamiento térmico en atmósfera de aire aumenta la resistividad debido a una disminución en la movilidad de los portadores, mientras que la atmósfera de nitrógeno la disminuye a causa del incremento de la cantidad de portadores y de su movilidad. Las condiciones de depósito generan cambios en la morfología del material, modificando la forma y tamaño de los granos con el incremento de la potencia y temperatura de sustrato, se encontró que el tratamiento térmico mejora la superficie de las películas, haciéndolas más uniformes y compactas.

De lo anterior se concluye que la película delgada depositada con 90W y 300°C (M300) presentó las mejores propiedades ópticas y eléctricas, sin embargo cuenta con una morfología con un alto valor de rugosidad, lo que afectaría la interacción y acoplamiento con otras películas delgadas al momento de ser utilizada en una estructura de celda solar, por tal motivo se propone a la muestra depositada con 90W y 200°C (M200) para su posible aplicación como contacto frontal dentro de la estructura de celdas solares de película delgada. El tratamiento térmico en atmósfera de nitrógeno presentó los mejores resultados por lo que puede ser utilizado para el mejoramiento de las propiedades del material.

## Agradecimientos

A la Red de energía Solar por el apoyo económico aportado para la realización de la estancia de investigación. Al CINVESTAV unidad Mérida, al proyecto CONACYT SEN-ER CeMIE-Sol 207450/25 y al Centro de Nanociencias y Nanotecnología (CNyN) por las instalaciones y materiales proporcionados. A los doctores: Ricardo Mis Fernández, Hugo Borbón, David Domínguez, Eduardo Murillo y Wensel de la Cruz por su apoyo técnico y ayuda en la realización de este trabajo.

## REFERENCIAS

- [1] U. Betz, M. K. Olsson, J. Marthy, M. Escolá y F. Atamny, «Thin films engineering of indium tin oxide: Large area flat panel displays application,» *Surface & Coatings Technology*, vol. 200, pp. 5751-5759, 2006.
- [2] D. Cozza, C. M. Ruiz, D. Duché, S. Giraldo, E. Saucedo, J.J. Simon y L. Escoubas, «Optical modeling and optimizations of  $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$  solar cells using the modified transfer matrix method,» *Optics Express*, vol. 24, pp. 1201-1209, 2016.
- [3] P. Chakraborty, G. Dattab y K. Ghatak, «The simple analysis of the Burstein–Moss shift in degenerate n-type semiconductors,» *Physica B*, vol. 339, pp. 198-203, 2003.
- [4] A. Chen, K. Zhu, H. Zhong, Q. Shao y G. Ge, «A new investigation of oxygen flow influence on ITO thin films by magnetron sputtering,» *Solar Energy Materials & Solar Cells*, vol. 120, pp. 157-162, 2014.
- [5] L.-j. Meng y M. D. Santos, «Properties of indium tin oxide films prepared by rf reactive magnetron sputtering at different substrate temperature,» *Thin Solid Films*, vol. 322, pp. 56-62, 1998.



**CONACYT**

*Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología*



**IER**

Instituto de Energías  
Renovables



**Red de Energía Solar**