



CRONOLOGÍA Y REVISIÓN DE TECNOLOGÍAS FOTOVOLTAICAS

Rafael Olvera Rivas

*Facultad de Química, Materiales-Energía, Universidad Autónoma de Querétaro
rolvera35@alumnos.uaq.mx*

Tania Mirelle Sánchez Mera

*Facultad de Química, Materiales-Energía, Universidad Autónoma de Querétaro
taniamirelle@gmail.com*

José Santos Cruz

*Facultad de Química, Materiales-Energía, Universidad Autónoma de Querétaro
jsantos@uaq.edu.mx*

Resumen

En el presente trabajo se hace una reseña de las cuatro generaciones tecnologías fotovoltaicas investigadas en la actualidad: las de primera generación compuestas por silicio cristalino y multicristalino; las de segunda generación llamadas Tandem en las que se utilizó una significativa menor cantidad de material y consisten en apilar de forma controlada diversos materiales para aprovechar todo el espectro de luz (estas celdas han alcanzado las mayores eficiencias registradas, sin embargo, su uso en las de más alta eficiencia se encuentra limitado a tecnologías espaciales por su alto costo de producción); las de tercera generación llamadas de película delgada y para las que su principal característica es que usan materiales de algunas micras de espesor y por último las de cuarta generación, las cuales son tecnologías emergentes algunas de ellas con recientes y muy importantes avances y que en poco tiempo han superado la eficiencia de las celdas de silicio (entre ellas se encuentran las de perovskita que han alcanzado eficiencias de 29.5%, son una alternativa al utilizar materiales abundantes en la tierra, no contaminantes y a un menor costo de fabricación, y que a medida que se promueven nuevos desarrollos esta tecnología pueden ser una fuente de generación de energía más eficiente y amigable con el ambiente).

Palabras clave: Película delgada, celda solar, Tecnologías fotovoltaicas, multiunión-Tandem, Perovskitas



La electricidad es la forma más versátil de energía que tenemos, el acceso y consumo a la energía eléctrica está relacionado de forma directa con la calidad de vida y el desarrollo industrial de los países. Se tienen dos rutas para cumplir la demanda requerida de energía y el desarrollo de los países en el futuro: continuar quemando combustibles fósiles y seguir liberando al ambiente toneladas de CO₂, SO₂ y NO₂ o utilizar fuentes de energías renovables, sustentable, no contaminante, ampliamente disponible y esencialmente infinita como la luz solar y el viento.

Dentro de las alternativas para la producción de energía renovable, la basada en radiación solar es de las principales, la energía solar puede ser utilizada de tres formas: 1. Sistemas térmico-solares, 2. Combustibles solares y 3. Producción de electricidad utilizando sistemas fotovoltaicos. La tecnología fotovoltaica genera energía eléctrica de corriente directa (Badawy, 2013; Lynn, 2010) a partir de semiconductores N y P unidos cuando son iluminados por fotones y los electrones son captados por contactos metálicos. La energía a partir de dispositivos fotovoltaicos tiene algunas desventajas como los altos costos de fabricación e instalación y las eficiencias de los dispositivos (debido a que la energía solar es difusa y no se puede hasta el momento aprovechar en su totalidad (Luque & Steven, 2003; Lynn, 2010).

Una forma muy general de describir el funcionamiento de las celdas solares es que deben generar portadores de carga mediante la absorción óptima del espectro solar, y asegurar que el exceso de portadores de carga sean recolectados eficientemente con una recombinación mínimo (Wolf et al., 2012).

En este trabajo se muestran los diferentes tipos de tecnologías que se estudian para el desarrollo de dispositivos fotovoltaicos, la

clasificación que realiza el Laboratorio Nacional de Energías Renovables (NREL) de Estados Unidos **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, es una herramienta muy útil que agilizará la comprensión de este trabajo. Las clasificaciones se dividen en celdas solares de silicio, película delgada, multiunión y emergentes.

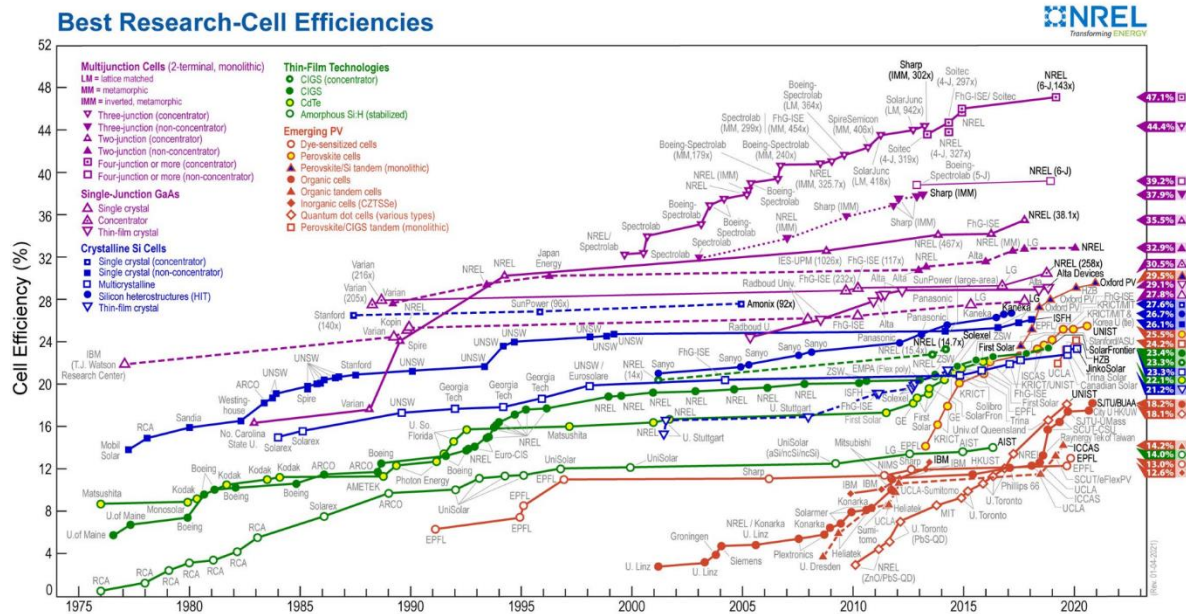


Figura 1 Eficiencias máximas registradas de diferentes tecnologías fotovoltaicas. (Esta gráfica es cortesía de National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO.)

Celdas de Silicio Cristalino

La producción de celdas solares por muchos años se ha enfocado en el desarrollo de celdas de silicio, debido a que es un componente muy común en la corteza terrestre y hasta el momento son las más económicas (Badawy, 2013; Luque & Steven, 2003; Lynn, 2010; Wolf et al., 2012), actualmente la producción de energía fotovoltaica está dominada por este tipo de celdas sin embargo se continúa investigando para mejorar su rendimiento.

Silicio Monocristalino

También conocidas como celdas de primera generación, es uno de los tipos más eficientes de celdas comerciales, fabricada a partir de rodajas u obleas muy delgadas de un único cristal grande obtenido de silicio altamente puro (99.9999%) derretido y

posteriormente dopado para tener una unión p-n. Este material tiene propiedades uniformes y predecibles, pero requiere procesos de manufactura de alto costo (Badawy, 2013; Lynn, 2010).

El método clásico de crecimiento de monocristales, y el más utilizado es el método Czochralski un método lento que requiere grandes cantidades de energía y, por lo tanto, altos costos de producción, adicionalmente se introducen impurezas en el material debido a la interacción entre el crisol y el material, lo cual afecta el desempeño de la celda. (Goodrich et al., 2013; Luque & Steven, 2003; Lynn, 2010).

Para la reducción de tiempos se ha determinado que se puede acelerar el crecimiento del cristal aumentando la velocidad de enfriamiento del fundido de silicio (Nakajima et al., 2014). Como variaciones se encuentra el método de



Kyropoulos, en el cual los cristales crecen al remover el calor del fundido de silicio utilizando un soporte de crista de Si como semilla.

El corte del lingote en rodajas delgadas es un proceso que consume mucho tiempo y existen pérdidas de hasta 50%. (Luque & Steven, 2003) aumentando los costos de producción (Goodrich et al., 2013). El 65% del costo de la celda es debido a la producción de las obleas, lo cual ha impulsado la investigación de alternativas, tales como el silicio multicristalino y de capa fina.

La mayor eficiencia reportada es la fabricada por The Institute for Solar Energy Research Hamelin (ISFH) con una eficiencia de 26.1% en la cual utilizaron una combinación de técnicas de ablación laser. Estas celdas que son crecidas sobre una oblea de silicio utilizan una unión pasivante de polisilicio selectiva de electrones tipo n^+ en uniones de óxido de silicio (POLO) y en el contacto negativo de la celda y una unión POLO de tipo p^+ selectiva de huecos en el contacto positivo (Haase et al., 2018).

Silicio Multicristalino

Las celdas de silicio multicristalino, también se producen a partir de silicio puro derretido, pero utilizando un proceso de fundición. A medida que el silicio se enfría, tiene un acomodo multicristalino irregular grande, la cristalización ocurre simultáneamente en varios puntos, produciendo granos de distintos tamaños, formas y orientaciones, posteriormente es cortado en rebanadas delgadas rectangulares o cuadrangulares para hacer celdas individuales (Lynn, 2010). Dentro de cada grano, la estructura cristalina es regular, pero los límites de grano representan imperfecciones que proveen de sitios para la recombinación de

electrón-hueco no deseados. Por estas razones, se considera menos ideal que el silicio monocristalino y tiene eficiencias menores, en comparación con el proceso de obleas (Lynn, 2010).

Uno de las razones más importantes por las cuales las eficiencias de las celdas multicristalinas son menores que las monocristalinas es la falta de un proceso de texturización de alto desempeño viable, comparable al texturizado cristalino piramidal usado en las monocristalinas lo cual provoca mayores pérdidas por reflexión, el silicio multicristalino tiene una orientación de cristales al azar, lo cual no permite la formación de estructuras uniformes (Basu et al., 2014). Un texturizado con ácido fluorhídrico es el más usado en el mercado, pero durante éste pueden aparecer patrones irregulares llamados “hilos negros” provocadas por una alta densidad de dislocaciones en las obleas, los cuales disminuyen la eficiencia de la celda (Gong et al., 2014). Aunado a esto es primordial la adición de un recubrimiento antireflectivo (ARC) para el desempeño de la celda solar aumentando el transporte de fotocorriente y minimizando la reflectancia (Derbali et al., 2015).

El proceso de crecimiento de silicio multicristalino y mucho más rápido y barato que el de obleas del monocristalino, por lo que se puede balancear la pérdida de eficiencia con el costo (Basu et al., 2015; Luque & Steven, 2003; Lynn, 2010). Un problema clave en la obtención de mejores eficiencias es un perfil de temperatura perfecto en ambos la fabricación del lingote y el procesamiento de la celda solar para controlar el número de defectos, actividad eléctrica y tiempo de vida de los portadores minoritarios (Jayakrishnan et al., 2011).



Un reporte de eficiencia alcanzada para sistemas de este tipo es de 21.25% reportada por Trina Solar, que utiliza obleas multicristalinas utilizando tecnología de pasivación de emisor trasero (PERC por sus siglas en inglés) (Green et al., 2014). La tecnología PERC a contrario de las celdas convencionales en las cuales el contacto metálico se encuentra completamente en contacto con la parte trasera de la celda, en la tecnología PERC se cubre el reverso de la celda con una capa dieléctrica la cual tiene pequeños agujeros hechos con láser, el contacto metálico es colocado sobre la capa dieléctrica y la parte metálica se encuentra en contacto con el silicio multicristalino solamente a través de los agujeros del dieléctrico. Esta tecnología aumenta el desempeño de la celda al aumentar la capacidad de ésta para capturar la luz (Luque & Steven, 2003). Sin embargo, el Helmholtz-Zentrum Berlin (HZB) reportó una eficiencia del 23.3% para este tipo de tecnología fotovoltaica de acuerdo al NREL en 2020.

Silicio de capa delgada

Recientemente, se ha buscado la fabricación de sustratos delgados por dos razones: Reducir la cantidad de Si por cada watt de energía fotovoltaica generada a fin de efficientar el uso de Si en épocas de escasez del material y para mejorar la eficiencia de las celdas fabricadas a partir de sustratos de bajo costo utilizando diseños mejorados (Luque & Steven, 2003), las celdas solares de capa delgada son conocidas como de segunda generación (Y. Wang et al., 2014).

La ventaja que ofrece este tipo de celdas es la disminución de la recombinación total de portadores (Luque & Steven, 2003; Rao et al., 2011), lo cual resulta en una mejora en el voltaje de circuito abierto (V_{oc}) y el factor de llenado (FF) de la celda solar, pero también

aumenta la recombinación superficial, por lo cual es muy importante a medida de que se reduce el espesor, utilizar opciones que reduzca la reflexión de portadores minoritarios en las interfaces utilizando reflectores electrónicos y ópticos (Luque & Steven, 2003).

El uso de una morfología texturizada en la superficie dispersa la luz y la atrapa en la celda solar, lo cual aumenta el largo del camino óptico y por lo tanto un aumento de la cantidad de luz absorbida, de esta forma se han fabricado electrodos con esta morfología a partir de materiales como el SnO_2 , ZnO , Ag y Al . Como efecto adverso de lo anterior, existe una disminución de V_{oc} y FF, por lo cual se han estudiado alternativas llamados Sustratos Reflectores de Luz (FLISS por sus siglas en inglés) a partir de materiales refractores de Si y ZnO o nanopartículas de óxidos metálicos en un sustrato de vidrio, (Miura et al., 2015; Varadan & Ji, 2010).

Durante el proceso de manufactura existe otro inconveniente, el cual es la fabricación de obleas menores de $150 \mu m$, debido a que en capas muy delgadas requiere consideraciones extra de manejo, debido a la fragilidad y pérdida de resistencia lo cual tiene un impacto significativo en la construcción del módulo final. Se ha reportado el uso de dos técnicas de crecimiento, entre ellas el crecimiento epitaxial y la exfoliación esta última capaz de fabricar obleas de $25 \mu m$ (Rao et al., 2011). La mayor eficiencia reportada para celdas de este tipo ha sido de 21.2% fabricada por Solexel utilizando obleas de $35 \mu m$ de espesor (Green et al., 2014).

Silicio Heteroestructural (HIT)

Las celdas solares de silicio heteroestructural consisten de capas delgadas de silicio amorfo depositadas sobre obleas de



silicio cristalino. Este tipo de celda solar utiliza las obleas de silicio cristalino para el transporte y absorción de portadores, y las capas delgadas de silicio amorfo para la pasivación y la formación de uniones. Se ha buscado la reducción de costos de la celda al minimizar el espesor de capa de silicio cristalino, pero los retos a los que se enfrenta esta tecnología es para mejorar el desempeño de la celda solar al minimizar las pérdidas ópticas, por recombinación y por resistencia (G.J.H.M. van Sark & Korte, 2012).

El factor principal en esta tecnología son los contactos metálicos, los cuales se encuentran separados de la banda de absorción, lo cual permite obtener un V_{OC} similares a dispositivos con patrones de texturas obtenidas por técnicas de mayor costo. Aún después del texturizado se tienen altos niveles de recombinación en los contactos lo cual limitan la eficiencia de la celda solar de silicio cristalino. (Wolf et al., 2012).

La capa de silicio amorfo provee de una excelente superficie de pasivación a temperaturas de procesamiento bajas, lo cual evita la degradación del material cristalino. La *Figura 2* muestra la estructura de la celda HIT (Luque & Steven, 2003).

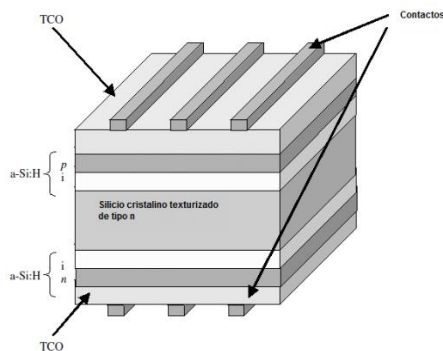


Figura 2 Estructura de celda HIT (Luque & Steven, 2003)

Las heteroestructuras de silicio cristalino-amorfo se preparan típicamente por depósito de capas delgadas de silicio amorfo dopado con hidrogenado (a-Si:H) en la superficie de la oblea de c-Si utilizando radio frecuencia (RF) o depósito de vapor químico mejorado de plasma (PECVD) (Mahtani et al., 2012; Tucci et al., 2009) de muy alta radio frecuencia (VHF) (Mahtani et al., 2012).

Debido a que la conductividad de las capas de a-Si:H es pobre, el dispositivo debe de contar con una capa TCO que transporte la carga a las terminales, además de un electrodo de malla metálica frontal y metalización completa posterior, por lo cual, es necesario un estudio de la optimización de éstas capas ya que es un factor importante para el desempeño de la celda.

Recientemente Kaneka Corporation reportó un récord de eficiencia de 26.7% para este tipo de celdas solares con un tamaño de 180 cm², esta celda tiene una arquitectura llamada heterounión de contacto trasero interdigitado HJ-IBC por sus siglas en inglés. Esta celda fue fabricada utilizando una oblea de silicio cristalino de Czochralski tipo n. La superficie frontal de la oblea se texturizó para minimizar el reflejo de la luz, por otra parte, la pasivación de la parte posterior se realizó mediante el depósito de capas i: a-Si: H seguida del depósito de la capa p: a-Si: H y luego por el depósito de la capa i: a-Si: H seguida por el depósito de capa tipo n de Si de película delgada, todo esto mediante la técnica de depósito químico de vapor mejorada con plasma de radio frecuencia acoplado capacitivamente (PECVD) (Yoshikawa et al., 2017).



Tecnologías fotovoltaicas emergentes

En la búsqueda de recolectar energía solar de forma eficiente y con un bajo costo por unidad de área se han desarrollado la innovación referente nuevos materiales y diseños de celdas, muchas de las cuales se encuentran todavía en una fase temprana de desarrollo, pero no por ello cuentan con bajas eficiencias. Este tipo de celdas son conocidas como de tercera generación.

Celda solar sensibilizada por colorantes (DSC)

Las celdas solares sensibilizadas por están generalmente conformadas por una capa delgada de $10\mu\text{m}$ semiconductor de dióxido de titanio (TiO_2) nanoporoso recubierto de un colorante orgánico inmerso en un electrolito (Lynn, 2010; Su'ait et al., 2015). Alternativas para el semiconductor utilizado son ZnO , SnO_2 , Nb_2O_5 , SrTiO_3 , CdSe , CdS , Fe_2O_3 , WO_3 y Ta_2O_5 , una combinación de ZnO con TiO_2 , con nanotubos o grafeno son alternativas para mejorar la eficiencia (Omar & Abdullah, 2014). La mayor eficiencia reportada para este tipo de tecnología es 13.5% fabricada por École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL) (Zhang et al., 2021)

El colorante actúa absorbiendo la luz y generando electrones que son inyectados en la banda de conducción, es decir, sensibiliza el TiO_2 , el cual no es tan efectivo por su cuenta debido a su ancho de banda. Este tipo de celdas son amigables con el ambiente, transparentes debido a las características de los materiales y pueden ser utilizadas para construirse en paredes o ventanas de los edificios (Choi et al., 2013; Su'ait et al., 2015) su uso en ventanas de edificios puede contribuir al control de la temperatura interna dentro de éstos (Ben, 2014). Tiene como ventajas el bajo costo de fabricación, además de que, a diferencia de las

celdas de silicio, no son afectadas por impurezas introducidas durante el proceso de fabricación, lo cual acelera su transición de investigación en el laboratorio a su producción en masa. Son capaces de trabajar en condiciones con menor cantidad de luz, como por ejemplo el amanecer y atardecer y su desempeño no es afectado seriamente por altas temperaturas (Ben, 2014).

La *Figura 3* muestra un esquema de una DSC, dos electrodos son depositados en la capa delgada de TCO separados por un electrolito (Su'ait et al., 2015).

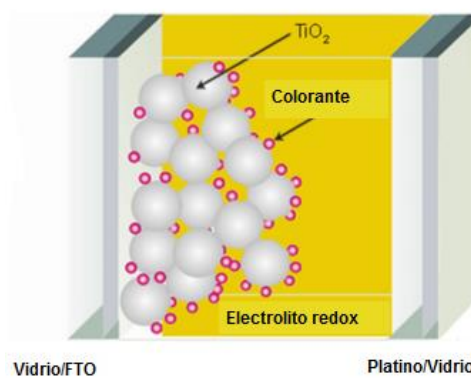


Figura 3: Esquema de una celda DSC (Su'ait et al., 2015).

El reto de la fabricación de estas celdas es la presencia del electrolito que puede provocar desorción, fotodegradación del colorante, corrosión del electrodo y fotodegradación de otros componentes que puede disminuir el tiempo de vida de la celda, este factor, junto con la baja eficiencia alcanzable por esta tecnología es uno de los mayores problemas que enfrenta (Chen et al., 2012) por lo cual se ha buscado utilizar electrolitos de polímeros o en gel (Su'ait et al., 2015).

Las moléculas de colorante deben de cumplir con las siguientes características: Ajustarse al espectro solar, estabilidad



operacional de largo término y ajustarse a la rugosidad de la superficie de superconductor, además de que el potencial redox debe de ser lo suficientemente alto para facilitar la reacción de regeneración (Ben, 2014). Se han desarrollado colorantes naturales debido a su disponibilidad, bajo impacto ambiental y bajo costo, un ejemplo de esto es la betaciamina, responsable del color rojo de las frutas (Tripathi & Chawla, 2014), lo cual abre una perspectiva comercial para el desarrollo de módulos de bajo costos y amigables con el ambiente.

Celdas perovskitas

La estructura perovskita cuenta con una estructura cristalina específica de fórmula ABX_3 (X =halógeno) (Lee et al., 2014; Park, 2014). La base de esta tecnología es la sensibilización en estado sólido de celdas solares derivadas de las celdas sensibilizadas con colorantes. El electrolito líquido es sustituido por un material transportador de huecos (HTM) sólido, a través del cual se mueven los electrones (Park, 2014).

Se utiliza un material mesoporoso sobre el cual hay un depósito de yoduro de plomo (por depósito de vapor o depósito de solución), seguido de una reacción con yoduro de metilamonio que permita el crecimiento controlado de las capas perovskitas con una capa de TiO_2 . Se busca tener una alta porosidad para proveer un mayor volumen para el depósito de perovskita que lleva a una mayor colección de luz y mayor eficiencia (Lee et al., 2014).

La morfología de la estructura afecta también el desempeño de la celda, la mayoría de las celdas usan nanopartículas mesoporosas basadas en capas apiladas, estas tienen como dificultad el electrodeposición en los poros debido a su estructura, por lo cual se han

realizado estudios en configuraciones de forma de nanobarras, las cuales permiten una mejor distribución de caminos de percolación. (Fakharuddin et al., 2015).

La fabricación de celdas con esta tecnología tiene como inconvenientes: El uso y la toxicidad de sales de plomo solubles (Park, 2014), carencia de estabilidad a largo plazo y la relación de costo-efectividad. La preocupación debido al impacto ambiental ha llevado a buscar tecnologías en las cuales el silicio sea reemplazado por estaño, pero se encuentra limitado por el menor desempeño de éste y la menor estabilidad del compuesto en presencia de oxígeno, lo cual complica la fabricación y operación del material (Espinosa et al., 2015). Estas celdas de perovskita que son de reciente desarrollo hasta el momento han alcanzado una eficiencia de 25.5% que fueron desarrolladas por Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST), esta celda está basada en un tipo de perovskita de haluro metálico llamado yoduro de plomo de formamidinio ($FAPbI_3$), que es conocido por su estabilidad térmica y banda prohibida estrecha (NREL, 2021).

Celdas Orgánicas

Los semiconductores orgánicos son materiales de base carbono que poseen características de semiconductores, con el mayor orbital molecular ocupado (HOMO) y el menor orbital molecular desocupado (LUMO) como análogos a la banda de valencia y a la de conducción respectivamente. Al ser absorbido un fotón, se excita un electrón desde el HOMO hacia el LUMO, pero debido a la baja constante dieléctrica y las funciones de onda localizadas de electrones y huecos en semiconductores orgánicos existe una fuerte atracción de coulomb entre el par electrón-hueco el cual es llamado excitón (Fung & Choy, 2013). Durante la disociación del



excitón en la heterounión para su recolección existe una pérdida de energía. Como soluciones se encuentra el uso de capas buffer de capas finas de polímeros, pequeñas moléculas o capas de óxidos metálicos para ser utilizados como capa de transporte de carga o como una capa de bloqueo del excitón (Amsalem et al., 2015).

El uso de materiales orgánicos ha sido muy atractivos debido a su facilidad de procesamiento, disponibilidad de material, peso ligero, bajo consumo de material y la posibilidad de ser depositados en módulos flexibles de plástico (Fung & Choy, 2013; Maoucha et al., 2012; Qi et al., 2014; Riede et al., 2010; Sun et al., 2015), además la facilidad de diseño de los materiales a nivel molecular para su posterior uso en fotovoltaicos, fotosensores y otros sistemas fotoelectrónicos (Maoucha et al., 2012).

La mayor eficiencia reportada para esta celda es de 18.2% fabricada por Shanghai Jiao Tong University y Beihang University (NREL, 2021). La eficiencia se encuentra limitada principalmente por una banda prohibida grande y un rango pequeño de absorción del espectro solar (Fung & Choy, 2013).

La celda de heterounión BHJ por sus siglas en inglés es formada comúnmente al mezclar materiales donadores y aceptores en una solución y después depositando la solución en un sustrato siendo la más utilizada la P3HT:PCBM (Fung & Choy, 2013). Esta celda presenta una mayor resistencia a la fotodegradación contra otro tipo de configuraciones (Williams & Aziz, 2014), pero no se encuentra exenta a la degradación al estar en contacto con el medio ambiente, sobre todo en los contactos donde la capa de óxido resultante es aislante, y el semiconductor puede provocar una erosión

química en el electrodo ITO (Qi et al., 2014). Como opción se ha planteado reemplazar la capa ITO con una lámina de grafeno CNT, que tiene como ventajas una mayor flexibilidad, alta conductividad, transparencia óptica y baja resistividad (Kamble et al., 2013). A fin de evitar la rápida degradación de los electrodos se ha investigado el uso de un diseño invertido, junto con el uso de una capa de interfase delgada para formar el cátodo en la celda solar (Scharber & Sariciftci, 2013). La *Figura 4* presenta una configuración general de la celda BHJ.

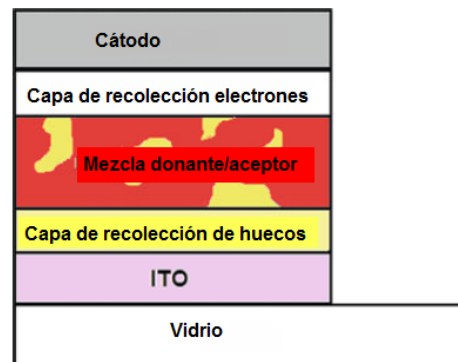


Figura 4: Configuración general celda BHJ (Fung & Choy, 2013)

A fin de mejorar la conversión se ha utilizado una configuración de tipo tándem. (Scharber & Sariciftci, 2013). Con el diseño de tipo tándem se busca maximizar la recolección de luz y ajustar la absorción de la celda al espectro de irradiación solar. El arreglo más común es uno en series de dos terminales (2T) en la cual dos subceldas con una absorción complementaria son colocadas de tal forma que la capa de recombinación de una subcelda se conecta en serie con la de electrones de otra y resulta en un voltaje de circuito abierto (V_{OC}) grande y capas de regiones de absorción diferente que permite que exista una absorción de luz a un rango de longitud de onda mayor (Etxebarria et al., 2014; Fung & Choy, 2013)



la celda frontal es un material con una banda prohibida (E_g) alta seguida de una capa de interconexión y una celda trasera con una banda prohibida baja (You et al., 2013). Los dispositivos de tres terminales en paralelo (3T) (Fung & Choy, 2013) conecta las celdas en paralelo, la corriente de corto circuito es idealmente la suma de todas las entregas de corriente de las subceldas. Hasta el momento la mayor eficiencia reportada para celdas orgánicas tándem es de 14.2% fabricada por Institute of Chemistry, Chinese Academy of Sciences (S. Li et al., 2018).

Celdas Inorgánicas (CZTSSe)

Las celdas de tipo kesteritas $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S},\text{Se})_4$ surgen como alternativa de celdas solares de película delgada utilizando materiales no tóxicos y abundantes en la corteza terrestre (Siebentritt, 2013) y a un bajo costo de manufactura (Romanyuk et al., 2013). Los semiconductores cuaternarios de calcopirita $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ (CZTS) y $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ (CZTSe) son materiales con una banda prohibida de 1.5 eV la cuál es óptima para su uso como una capa de absorción en celdas solares en la región visible del espectro electromagnético (Shyju et al., 2015). Hasta el momento la mayor eficiencia reportada es de 12.6% fabricada por IBM (W. Wang et al., 2014).

Este tipo de celdas pueden ser preparadas por varios métodos de depósito, ya sea utilizando vacío como lo son la co-evaporación y sputtering, o técnicas químicas que involucran la aplicación de una capa con una solución que contiene el precursor como es una solución en un solvente de hidracina, o una solución de sales metálica en un sulfóxido (DMSO) seguido de una selenización o un procesamiento térmico, estos métodos son llamados depósito de solución química (CSD), hasta el momento el método de depósito que

no involucra vacío es el que ofrece una mayor eficiencia (Fella et al., 2013).

Romanyuk y col., afirman que la eficiencia de esta celda se encuentra limitada por la energía de activación del camino de recombinación en la intercara buffer/absorbente (Romanyuk et al., 2013), que ocurre principalmente en las celdas que contienen azufre en vez de selenio. Siebentritt comenta que es debido a una alineación diferente de las bandas de la interfase kesterita-Cds (Siebentritt, 2013). Otro factor que afecta también este tipo de celdas es el tiempo de vida corto de los portadores minoritarios relacionada con una alta densidad de defectos (Fella et al., 2013).

Puntos cuánticos

La nanotecnología ha demostrado contar con el potencial para contribuir en sistemas de energía sustentable, a través del crecimiento de materiales nano-estructurados para su uso en celdas solares. Los puntos cuánticos son grupos a nano-escala de semiconductores que cuentan con excelentes propiedades optoelectricas, las cuales son modificadas debido a los efectos físico-cuánticos dependientes del tamaño de los grupos (Albero et al., 2014; Badawy, 2013). El tamaño de estas partículas es desde algunos Angstroms hasta algunas décimas de nanómetros (Albero et al., 2014).

Una de las principales ventajas es que son capaces de producir varios pares electrón-hueco; mientras que las celdas solares convierten un fotón en un par electrón-hueco, las de puntos cuánticos pueden producir tres pares de electrones por fotón, y por lo tanto realizar en teoría, una conversión más eficiente y a un menor costo que podría ser capaz de competir con las fuentes de energía fósil. Adicionalmente son capaces de ajustar



sus bandas de absorción a las longitudes de onda de la energía irradiada (Badawy, 2013).

La

Figura 5 muestra los tres tipos de celdas de puntos cuánticos estudiadas recientemente: Ensamblajes de fotoelectrodos compuestos de puntos cuánticos, celdas sensibilizadas con puntos cuánticos, y puntos cuánticos dispersados en una matriz de semiconductor orgánico polimérico, de las tres mencionadas, los que presentan las mejores eficiencias son las sensibilizadas y las orgánicas. (Albero et al., 2014).

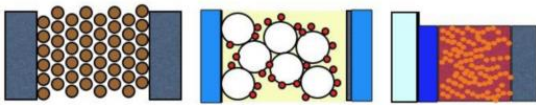


Figura 5: Ensamblajes de celdas estudiadas actualmente, de izquierda a derecha; Ensamblajes de fotoelectrodos compuestos de puntos cuánticos, celdas sensibilizadas con puntos cuánticos, y puntos cuánticos dispersados en una matriz de semiconductor orgánico polimérico (Albero et al., 2014)

Los métodos de depósito más utilizados en este tipo de celdas es el depósito por baño químico, en la cual se escoge una solución de tal manera que una reacción espontánea en fase líquida sea viable, generando un compuesto que precipita y este nuevo compuesto formado ya no es soluble en el solvente, generando una precipitación sobre el sustrato. Una síntesis que vale la pena comentar es el método Linker donde una capa mesoporosa se coloca en una solución con ligandos que actúan como anclas de la capa y de los puntos cuánticos. En el depósito electroforético se sumergen los electrodos en una solución de puntos cuánticos y se aplica un voltaje para depositarlos (Albero et al., 2014).

El mayor desafío de esta tecnología son las pérdidas por recombinación, en el caso de las celdas sensibilizadas, los electrones inducidos se recombinan debido al electrolito, esta recombinación ocurre como resultado de una desalineación de las bandas. Una conexión débil entre los puntos y el sustrato puede introducir defectos en el desempeño de la celda y como consecuencia reducir su eficiencia (Kouhnavard et al., 2014). Hasta el momento la mayor eficiencia alcanzada es de 18.1% fabricada por South Korea's Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST) (NREL, 2021).

Perovskita/Si

Las celdas tándem de perovskita/Si y las de perovskita/CIGS son dos de las tecnologías emergentes más recientes y de eficiencias importantes, en el caso de las celdas de Perovskita/ Si (PSC/Si) tienen el potencial de superar considerablemente a las celdas de Si convencionales, sin embargo, en condiciones reales en el planeta apenas son capaces de superar ligeramente a las de Si en eficiencia. Diversos estudios se han realizado para determinar el alcance máximo de la eficiencia de estas celdas, y han demostrado alcanzar una eficiencia teórica de 46% (Futscher & Ehrler, 2017; Qiu et al., 2018).

La estructura básica de estas celdas es apilar una celda de perovskita sobre una celda de Si para absorber una parte del espectro solar y la otra parte que es transmitida se absorbe en la parte inferior donde está la celda de Si y así tener el potencial de producir una eficiencia que supere el límite de unión única Shockley-Queisser (33.7%). Estas celdas tienen varios problemas que merman su eficiencia, entre los principales factores son absorción parásita, la recombinación no radiativa (JNR), la resistencia en serie no deseada (R_s), la resistencia en paralelo (R_{sh}), las pérdidas



ópticas y la temperatura. Finalmente, otro factor importante en el desempeño de este tipo de celdas es la interconexión entre los componentes (Futscher & Ehrler, 2016; Shen et al., 2020). La conversión máxima de este tipo de celdas reportada es de 29.5 % que fue fabricada por Oxford PV.

CELDAS SOLARES MULTIUNIÓN

Los dispositivos de una sola unión, trabajan de una manera óptima, con longitudes de onda iguales a las del ancho de banda prohibida (E_g), por lo tanto, pierden eficiencia en otras longitudes que están presentes a través de todo el espectro solar. Las celdas multiunión, unen diferentes celdas con múltiples anchos de banda (E_g), acopladas o sintonizadas para utilizar el espectro solar completo. La luz incide en una celda con amplio E_g , que puede producir relativamente alto voltaje, y así hacer mejor uso de la alta energía de los fotones, entonces los fotones de baja energía pasan a través de las demás celdas (apiladas), con E_g que pueden absorber los fotones que están en el infrarrojo. (Bagnall & Boreland, 2008).

Eficiencias máximas teóricas de 55.9%, 63.8 % y 68% son predichas para dos, tres y cuatro celdas multiunión (tándem) respectivamente, (Green et al., 2011). Sin embargo, la escalada de costos en la fabricación incrementa los problemas, junto con el número de interfases y de celdas. Las celdas basadas en GaAs, InP o GaN utilizan diferentes composiciones de aluminio o aleaciones de indio para modificar el E_g , mientras mantienen las constantes de red, en un crecimiento continuo (con uniones entre cada celda) (Bagnall & Boreland, 2008). Como se ha visto estas celdas son de alto rendimiento, sin embargo, su alto costo de producción solo puede ser contemplado para aplicaciones espaciales.

Se han realizado estudios en celdas solares de triple unión del tipo InGaP/InGaAs/Ge y se encontró que hay una relación entre la temperatura y las propiedades eléctricas, la eficiencia de conversión decrece cuando incrementa la temperatura, e incrementa con el aumento de concentración solar, (Nishioka et al., 2006).

Un uso económico para las celdas multiunión de alta eficiencia en la tierra, es usándolas en sistemas de concentradores fotovoltaicos. En estos el factor de concentración óptica es típicamente mayor a 300.

Concentradores fotovoltaicos

Los sistemas de concentración fotovoltaica hacen uso de un área larga de lentes o espejos para enfocar o concentrar la luz solar en una pequeña área de la celda fotovoltaica. El sistema usa un sistema de seguimiento del sol para mejorar el rendimiento (Akinyele et al., 2015). Su uso principal, comienza con el reducido uso de material semiconductor, el cual es costoso y también incrementa el porcentaje de concentración sobre la celda. Las limitaciones de un sistema de este tipo comienzan con los costos de enfoque, seguimiento y equipamiento (Parida et al., 2011).

Celdas solares de 5 o más uniones

Se ha comentado que estas celdas tienen un potencial de conversión de 47 % con 500 soles de iluminación (Chiu et al., 2014), sin embargo, recientemente se desarrollaron celdas solares con 47.1 % de eficiencia con una concentración de 147 soles. Este tipo de celdas fue fabricado usando aleaciones de semiconductores III-V y se espera que próximamente alcancen una eficiencia del 50% (Geisz et al., 2020). Una de las



configuraciones utilizadas para absorber la mayor energía del espectro solar fue implementando una estructura con E_g de 2.2/1.7/1.4/1.2/0.95 y 0.69 eV.

La construcción de este tipo de celdas solares, se realiza con una técnica llamada epitaxia en fase de vapor organometálica cinéticamente estabilizada (OMVPE), primero en la parte superior con 3 uniones y en la parte inferior 3 uniones, donde crecen en sustratos de GaAs y InP con la técnica antes mencionada.

Las subceldas que se forman en la parte superior e inferior crecen juntas respectivamente, para después hacer pulido químico y mecánico hasta obtener rugosidades menores a 0.5 nm. Después de esto, se unen las dos partes (superior e inferior). Se tiene especial cuidado con los parámetros de temperatura, presión y tiempo de crecimiento, para lograr una alta resistencia mecánica y una baja resistencia eléctrica a través de la interfaz de crecimiento (Chiu et al., 2014).

Uno de los factores que afectan la eficiencia y el factor de llenado en este tipo de celda solar es, la concentración y la resistencia entre los contactos.

Celdas solares de 4 uniones

Las celdas multiunión de 4 capas tienen una absorción de fotones mayor que las celdas de 3 uniones, debido a que pueden absorber un mayor espectro de radiación solar, lo cual, resulta en una mayor absorción de fotones (Bhattacharya & Foo, 2013). Estos sistemas, pueden producir bajos costos de electricidad en plantas de generación eléctrica, en regiones donde hay una gran cantidad de radiación solar.

Las condiciones óptimas para las celdas solares de 4 uniones que se han encontrado, están establecidas, para un decaimiento de E_g con 1.9, 1.4, 1.0, y 0.5 eV (Dimroth et al., 2014). Se han realizado combinaciones cercanas al óptimo teórico, con una celda multiunión del tipo GaInP/GaAs/GaInNAs/Ge, pero el rendimiento de esta celda no fue satisfactorio, debido a la insuficiente calidad de nitrógeno diluido, crecido por fase de vapor orgánico metal en fase epitaxial.

Una celda, que alcanzó 44.7 % de eficiencia, se realizó con la configuración $Ga_{0.51}In_{0.49}P/GaAs$, depositada en la parte superior, unida a una celda tándem de $(Ga_{0.16}In_{0.84})(As_{0.31}P_{0.69})/Ga_{0.47}In_{0.53}As$ en la parte inferior, esta combinación es cercana a la combinación ideal

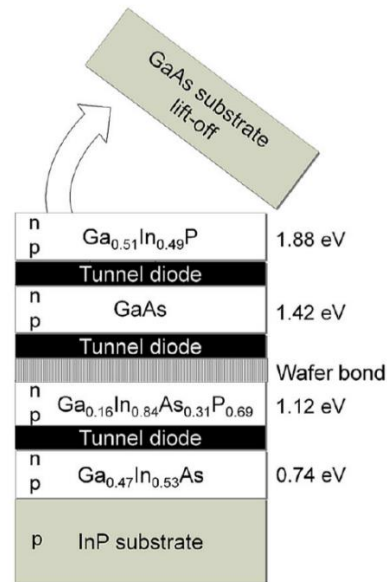


Figura 6 (Dimroth y col. 2014).

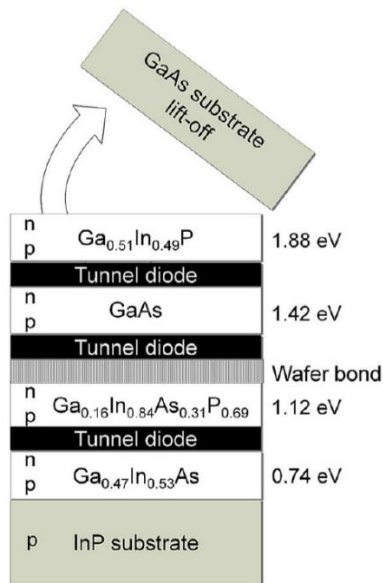


Figura 6 Estructura esquemática de una celda solar de 4 uniones con eficiencia de 44.7 % (Dimroth et al., 2014)

Soitec y CEA-Leti desarrollaron una celda solar de 4 uniones GaInP/GaAs; GaInAsP/GaInAs con una eficiencia de 46%. Cada una de las celdas que la compone, convierte un cuarto de los fotones entrantes a electricidad, en un rango de longitud de onda entre 300 y 170 nm. Todo esto con ayuda de lentes Fresnel, que concentra la luz solar dentro de la celda. Esta eficiencia se alcanzó con una concentración de 508 soles AM 1.5d (ASTM E927-10). El desafío que tuvo que ser cumplido por esta celda, es la exacta distribución de los electrones a través de las cuatro sub celdas, lo cual, se ha logrado mediante la alineación precisa de la composición y espesor de cada capa dentro de la estructura de la celda (tsigurdsson, 2014).

Uno de los problemas que presentan este tipo de celdas solares, es la alta pureza que se debe utilizar en los reactivos, además,

cualquier contaminación externa (polvo), puede interferir en el crecimiento de las celdas solares, por lo que, se requieren cuartos con un alto grado de limpieza. El crecimiento de las películas no debe tener rugosidades, para que en la unión de las subceldas no haya espacios vacíos que provoquen deficiencias en el paso de fotones. Por último, las capas túnel deben ser lo más transparentes posibles, para que no decaiga el paso de fotones de una capa a otra.

Celdas solares de 3 uniones

La construcción actual de emparejamiento es importante para celdas solares multiunión, para incrementar las eficiencias bajo un sol y con concentradores. Desde este punto de vista, una gran cantidad de trabajos se han desarrollado, en estructuras metamórficas y metamórficas invertidas para las celdas solares (Sasaki et al., 2013).

Se han reportado eficiencias de 37.9% con un sol de concentración, para una celda solar de tres uniones desarrollada por Sharp, bajo la configuración InGaP/GaAs/InGaAs (Green et al., 2015). Por otra parte, se han alcanzado eficiencias de 44.4% con una concentración de 302 soles, desarrollada por Sharp (*Sharp Develops Concentrator Solar Cell with World's Highest Conversion Efficiency of 44.4% | Press Releases | Sharp Global, s. f.*).

La Figura 7, muestra un esquema del proceso de fabricación de una celda solar de triple unión invertida. Las capas de la celda, fueron crecidas por el método MOCVD en un sustrato de GaAs. En la parte superior InGaP, en la parte media, celdas de GaAs, las cuales tienen redes emparejadas al sustrato, donde crecieron primero y después se hizo que las redes coincidieran. Las celdas de la parte superior, fueron crecidas en orden invertido. Después del crecimiento de las capas de las celdas, las capas fueron separadas del sustrato

de GaAs y fueron montadas en un sustrato de silicio, por la unión de un metal (Sasaki et al., 2013).

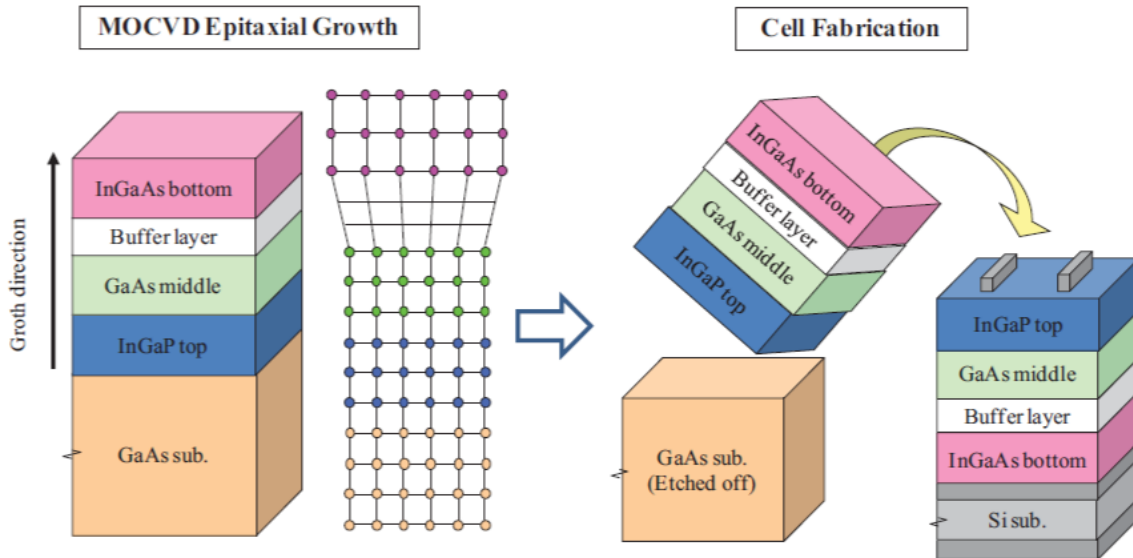


Figura 7 Vista esquemática de la estructura con la imagen de red (izquierda) y el proceso de fabricación (derecha) para una celda solar de triple unión InGaP/GaAs/InGaAs. (Sasaki et al., 2013)

Celdas solares de dos uniones

Se han presentado investigaciones, en las cuales, el récord de eficiencia bajo condiciones de un sol de iluminación, para este tipo de celda solar es de 32.9 %, desarrollada por el Laboratorio Nacional de Energía Renovable (Steiner et al., 2021).

La celda tándem, fue realizada mediante la técnica MOVPE crecida sobre un sustrato de GaAs. Se realizó con un crecimiento invertido, similar a un crecimiento metamórfico invertido para celdas solares multiunión, y reorientada durante el proceso. Esta celda, estaba cubierta en la parte delantera con un revestimiento anti reflectante bicapa, y en la parte inferior con una capa de contacto de oro, muy reflectante.

Las mejoras de este tipo de celdas, se realizan mediante el reciclaje de fotones en la parte inferior, usando un contacto de oro muy reflectivo en la unión de GaAs, para que los fotones vuelvan al interior de celda, y permitiendo una significativa fracción de la luminiscencia de la parte superior, la unión de GaInP, se acopla con la unión de GaAs (NREL, 2021).

Tecnología de película delgada

Las celdas solares de película delgada, son básicamente, películas de materiales semiconductores aplicados sobre un sustrato utilizando técnicas físicas, el sustrato puede ser, acero inoxidable o vidrio, (Akinyele et al., 2015). Estas películas, reducen significativamente la cantidad de material semiconductor requerido, ya que las capas

depositadas son menores a 10 μm de espesor, cuando es comparada con obleas de silicio, que son de cientos de micras y por lo tanto, se obtienen menores costos de producción para las celdas fotovoltaicas (Parida et al., 2011) (El Chaar et al., 2011).

Compuestos como $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ (CIGS), CdTe, silicio amorfo (a-Si:H) se han utilizado para la fabricación de estas películas delgadas, como se puede observar en la Figura 8.

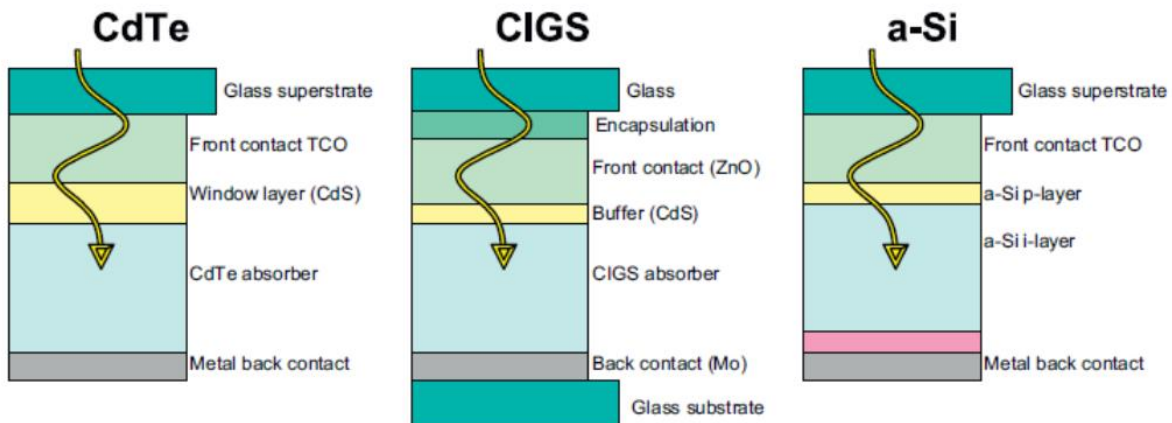


Figura 8 Diagramas esquemáticos de celdas de películas delgadas de CdTe, CIGS y a-Si (Bagnall & Boreland, 2008)

Película delgada de CdTe

Se conoce que el telururo de cadmio (CdTe), tiene una E_g ideal de 1.45 eV, con un alto coeficiente de absorción directa $\alpha > 10^5 \text{ cm}^{-1}$ (El Chaar et al., 2011). Tiene un fácil depósito, y es apto para producción a gran escala, uno de los principales métodos para el depósito de este material es por sublimación en espacio cerrado (CSS) (Romeo et al., 2014)

Figura 9.

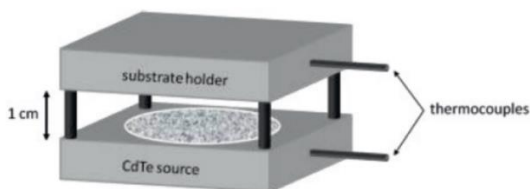


Figura 9 Configuración del sistema CSS (Romeo et al., 2014)

Se han demostrado eficiencias en película delgada de CdTe de 22.1% sobre un sustrato de vidrio conductor, este récord se ha obtenido por First Solar (NREL, 2021). La celda de película delgada está compuesta de una capa gruesa de material tipo n de CdS (50-200 nm) en la parte frontal de la capa de la ventana. La luz solar pasa a través de la capa de CdS antes de reaccionar con la capa absorbente de CdTe. Las propiedades eléctricas, ópticas y estructurales de la capa de CdS, obtienen una influencia grande en las características de interfase de la heterounión de CdS/CdTe, (H. Li & Liu, 2015; Parel et al., 2015). Una representación de una celda de CdTe se muestra en la Figura 10.

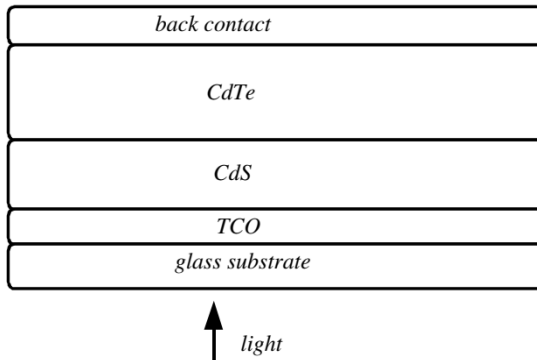


Figura 10 Sección transversal típica para una celda CdS/CdTe (Romeo et al., 2004)

Durante el proceso de fabricación, hay un paso que es fundamental para el rendimiento de la celda solar, ya que, si no se realiza, la eficiencia es menor al 5%, este paso crítico es el tratamiento de la película delgada de CdTe en presencia de cloro. Esto se debe a que el cloro controla el tamaño de grano del CdTe, hace una pasivación de los límites de grano y promueve una mezcla entre el CdS y el CdTe en su interfaz (Dharmadasa, 2014).

Existen dos metodologías la vía húmeda y la vía vapor, la primera se realiza por la inmersión de la película de CdTe en una solución saturada de CdCl₂ en metanol, con el fin de depositar una película de CdCl₂ en la parte superior de CdTe. Después del depósito de CdCl₂, la bicapa de CdTe/CdCl₂ se pone en un horno, donde se le da un tratamiento térmico aproximadamente a 400 °C durante 20 minutos. Con el fin de eliminar los residuos de CdCl₂ en la superficie de CdTe, se hace un ataque químico en una solución de metanol-Br, o una mezcla de ácidos nítrico y fosfórico. (Chander & Dhaka, 2018; Romeo et al., 2014).

La segunda vía consiste en depositar el CdCl₂, mediante un equipo con vacío

exponiendo el CdTe calentado en una cámara de vacío con vapores de CdCl₂.

Los problemas de este compuesto son ambientales, ya que el cadmio es tóxico, y aún más durante el proceso de fabricación, el CdCl₂ también es altamente tóxico, así que hay cuestiones ambientales que permanecen, por otra parte, el costo de los materiales representa otro problema, ya que son escasos en la corteza terrestre (Kumarage et al., 2018).

Película delgada de CIGS

Estas celdas solares contienen elementos de los grupos I, III y VI de la tabla periódica, esto representa un beneficio, debido a su alto coeficiente de absorción óptica, y características eléctricas, permitiendo un mejor arreglo del dispositivo. Las mejores eficiencias que se han alcanzado para una celda solar CIGS son de 23.4% sin concentrador y 23.3%, con una concentración de 15 soles (Green et al., 2015). Este tipo de celdas presenta un Eg de 1.68 eV, (Tyagi et al., 2013).

El mayor desafío para los módulos CIGS, ha sido la limitada capacidad de ampliar el proceso de alto rendimiento, alta producción y bajo costo.

Varios métodos de depósito son usados, entre ellos erosión catódica, impresión con tinta y galvanización, cada uno tiene un rendimiento y eficiencia diferentes.

La mayor preocupación de esta tecnología es los escasos de indio. El indio se utiliza en gran medida como óxido de indio y estaño (ITO), regularmente es usado para pantallas de tv, computadoras, entre otros dispositivos de ahí su baja disponibilidad (El Chaar et al., 2011).



Los módulos de CIGS muestran degradación de 10% cuando son expuestos a radiaciones de 130 kWh/m^2 (Akinyele et al., 2015), en condiciones de humedad y alta temperatura, necesitan revestimientos de barrera adicionales para protegerlos de tal degradación. Particularmente, el estrés por calor húmedo provocará la degradación en las propiedades de transporte de conexiones y características de transporte de portadores minoritarios en la celda (Olsen et al., 2007) Una representación de una celda de CIGS se muestra en la Figura 11.

ZnO transparent oxide
Cds buffer layer (or Indium Sulfide (InS)
CIGS (absorber)
Mo contact layer
Glass

Figura 11 Sección transversal de una celda solar CIGS (El Chaar et al., 2011)

Películas delgadas de silicio amorfo a-Si:H

El silicio amorfo (a-Si), es una de las más recientes tecnologías de capa delgada desarrollada, es muy popular esta tecnología comparada con otros materiales, como CIS/CIGS y CdS/CdTe debido a su eficiencia (Parida et al., 2011). Esta tecnología, diverge del silicio cristalino en el hecho de que los átomos de silicio están localizados aleatoriamente unos de otros. Estas aleatoriedades en la estructura atómica tienen un mejor efecto en las propiedades electrónicas del material, lo que causa un mayor E_g (1.7 eV) (Boutchich et al., 2012) que el silicio cristalino (1.1eV). La banda prohibida más grande, permite a las celdas de a-Si absorber la parte visible del espectro solar más eficientemente que la porción infrarroja del espectro (El Chaar et al., 2011). El a-Si

muestra picos de eficiencias cuánticas en longitudes de onda entre 500 y 600 nm, con fuertes caídas al acercarse a 350 y 750 nm. (Nemeth et al., 2011). La eficiencia máxima registrada para las celdas solares de a-Si/nc-Si/nc-Si es de 13.4%, desarrollada por LG Electronics (Green et al., 2015).

Se han realizado estudios en los cuales se analiza la degradación de tres tipos de tecnologías de a-Si, en tripe unión, unión simple y celdas flexibles de triple unión, cada material degrada alrededor de 45%, 22% y 27% respectivamente. (Tyagi et al., 2013). Se ha encontrado, que hay una fuerte correlación entre el factor de microestructura R, el contenido de H unido al Si y la eficiencia estabilizada o relativa degradación de las celdas de a-Si, conteniendo las capas correspondientes de absorbentes (Fecioru-Morariu et al., 2012).

Conclusiones

En la actualidad nos encontramos, por cuestiones económicas, sociales y ambientales, en la necesidad de buscar alternativas para resolver los retos energéticos, siendo la energía generada a partir de luz solar una opción en la cual se utiliza un recurso que es inagotable, disponible y que no tiene costo.

Los materiales fotovoltaicos requieren un gran esfuerzo en el desarrollo de tecnologías que utilicen la energía solar de forma más directa, aumentando la eficiencia de las celdas y realizando investigación de métodos de manufactura que puedan hacerlas competitivas con otras formas de generación de energía.

Hasta el momento la tecnología de celdas multiunión presenta las mayores eficiencias, a un costo alto y con una alta dificultad de fabricación, que las hace solo viables para aplicaciones espaciales, mientras que otro tipo



de tecnologías, tales como las emergentes que llevan en muy poco tiempo un gran salto en las eficiencias alcanzadas prometen ser uno de los factores hacia la independencia de los combustibles fósiles.

Para que los sistemas fotovoltaicos puedan seguir su curso de desarrollo, es necesario implementar innovaciones que permitan aumentar la eficiencia en la conversión de energía fotovoltaica lo suficiente, aun cuando las innovaciones en sistemas requieran una mayor inversión en capital, esta se puede compensar con una suficiente ganancia en cuestión de eficiencia.

Referencias

- Akinyele, D. O., Rayudu, R. K., & Nair, N. K. C. (2015). Global progress in photovoltaic technologies and the scenario of development of solar panel plant and module performance estimation – Application in Nigeria. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *48*, 112-139. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.021>
- Albero, J., Clifford, J. N., & Palomares, E. (2014). Quantum dot based molecular solar cells. *Coordination Chemistry Reviews*, *263-264*(1), 53-64. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2013.07.005>
- Amsalem, P., Heimel, G., Oehzelt, M., & Koch, N. (2015). The interface electronic properties of organic photovoltaic cells. *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*, *1*, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.elspec.2015.02.012>
- Badawy, W. a. (2013). A review on solar cells from Si-single crystals to porous materials and quantum dots. *Journal of Advanced Research*, *6*(2), 123-132. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2013.10.001>
- Bagnall, D. M., & Boreland, M. (2008). Photovoltaic technologies. *Energy Policy*, *36*(12), 4390-4396. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.09.070>
- Basu, P. K., Chakraborty, S., Hameiri, Z., & Boreland, M. B. (2014). Novel non-metallic non-acidic approach to generate sub-wavelength surface structures for inline-diffused multicrystalline silicon wafer solar cells. *Applied Surface Science*, *307*, 689-697. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.04.101>
- Basu, P. K., Law, F., Vinodh, S., Kumar, A., Richter, P., Bottari, F., & Hoex, B. (2015). 0.4% Absolute Efficiency Increase for Inline-Diffused Screen-Printed Multicrystalline Silicon Wafer Solar Cells By Non-Acidic Deep Emitter Etch-Back. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, *137*, 193-201. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2015.02.004>
- Ben, M. (2014). *Development and Integration of Innovative Low-Cost PV Windows Based on Dye Sensitized Solar Cells Technology: Application in Morocco*.
- Bhattacharya, I., & Foo, S. Y. (2013). *Four junction solar cell*. <https://www.google.com/patents/US20130104970>
- Boutchich, M., Alvarez, J., Diouf, D., Roca i Cabarrocas, P., Liao, M., Masataka, I., Koide, Y., & Kleider, J.-P. (2012). Amorphous silicon diamond based heterojunctions with high rectification ratio. *Journal of Non-Crystalline Solids*, *358*(17), 2110-2113. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2011.12.067>
- Chander, S., & Dhaka, M. S. (2018). CdCl₂ treatment concentration evolution of physical properties correlation with surface morphology of CdTe thin films for solar cells. *Materials Research Bulletin*, *97*, 128-135. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2017.08.038>
- Chen, J. K. C., Wang, M. Y., Chen, Y. R., & Chen, Y. S. (2012). Exploring Knowledge Flows of Network on Patent of Dye Sensitized Solar Cell. *Picmet '12: Proceedings - Technology Management for Emerging Technologies*, 927-940.
- Chiu, P. T., Law, D. C., Woo, R. L., Singer, S. B., Bhusari, D., Hong, W. D., Zakaria, A., Boisvert, J., Mesropian, S., King, R. R., & others. (2014).



Direct semiconductor bonded 5J cell for space and terrestrial applications. *Photovoltaics, IEEE Journal of*, 4(1), 493-497.

Choi, H., Nahm, C., Kim, J., Kim, C., Kang, S., Hwang, T., & Park, B. (2013). Review paper: Toward highly efficient quantum-dot- and dye-sensitized solar cells. *Current Applied Physics*, 13(4 SUPPL.2), S2-S13. <https://doi.org/10.1016/j.cap.2013.01.023>

Derbali, L., Zarroug, a., & Ezzaouia, H. (2015). Minority carrier lifetime and efficiency improvement of multicrystalline silicon solar cells by two-step process. *Renewable Energy*, 77, 331-337. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.12.014>

Dharmadasa, I. (2014). Review of the CdCl₂ Treatment Used in CdS/CdTe Thin Film Solar Cell Development and New Evidence towards Improved Understanding. *Coatings*, 4(2), 282-307. <https://doi.org/10.3390/coatings4020282>

Dimroth, F., Grave, M., Beutel, P., Fiedeler, U., Karcher, C., Tibbits, T. N. D., Oliva, E., Siefert, G., Schachtner, M., Wekkeli, A., Bett, A. W., Krause, R., Piccin, M., Blanc, N., Drazek, C., Guiot, E., Ghyselen, B., Salvetat, T., Tauzin, A., ... Schwarzburg, K. (2014). Wafer bonded four-junction GaInP/GaAs//GaInAsP/GaInAs concentrator solar cells with 44.7% efficiency: Wafer bonded four-junction concentrator solar cells with 44.7% efficiency. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 22(3), 277-282. <https://doi.org/10.1002/pip.2475>

El Chaar, L., lamont, L. A., & El Zein, N. (2011). Review of photovoltaic technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(5), 2165-2175. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.01.004>

Espinosa, N., Serrano-luján, L., Urbina, A., & Krebs, F. C. (2015). Solution and vapour deposited lead perovskite solar cells: Ecotoxicity from a life cycle assessment perspective. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 137, 303-310. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2015.02.013>

Ettxebarria, I., Furlan, A., Ajuria, J., Fecher, F. W., Voigt, M., Brabec, C. J., Wienk, M. M., Slooff, L.,

Veenstra, S., Gilot, J., & Pacios, R. (2014). Series vs parallel connected organic tandem solar cells: Cell performance and impact on the design and operation of functional modules. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 130, 495-504. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2014.07.047>

Fakharuddin, A., Di Giacomo, F., Ahmed, I., Wali, Q., Brown, T. M., & Jose, R. (2015). Role of morphology and crystallinity of electron transport layer on long term durable performance of perovskite solar cells. *Journal of Power Sources*, 283, 61-67. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.02.084>

Fecioru-Morariu, M., Mereu, B., Bakehe, S., Kalas, J., Kluth, O., & Eisenhammer, T. (2012). High quality amorphous Si solar cells for large area mass production Micromorph tandem cells. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 358(17), 2264-2267. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2011.12.017>

Fella, C. M., Romanyuk, Y. E., & Tiwari, A. N. (2013). Technological status of Cu₂ZnSn(S,Se)₄ thin film solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 119, 276-277. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2013.08.027>

Fung, D. D. S., & Choy, W. C. H. (2013). Introduction to Organic Solar Cells. En *Organic Solar Cells*. <https://doi.org/10.2174/97816080528511060101>

Futscher, M. H., & Ehrler, B. (2016). Efficiency Limit of Perovskite/Si Tandem Solar Cells. *ACS Energy Letters*, 1(4), 863-868. <https://doi.org/10.1021/acsenergylett.6b00405>

Futscher, M. H., & Ehrler, B. (2017). Modeling the Performance Limitations and Prospects of Perovskite/Si Tandem Solar Cells under Realistic Operating Conditions. *ACS Energy Letters*, 2(9), 2089-2095. <https://doi.org/10.1021/acsenergylett.7b00596>

Geisz, J. F., France, R. M., Schulte, K. L., Steiner, M. A., Norman, A. G., Guthrey, H. L., Young, M. R., Song, T., & Moriarty, T. (2020). Six-junction III-V solar cells with 47.1% conversion efficiency under 143 Suns concentration. *Nature Energy*,



5(4), 326-335. <https://doi.org/10.1038/s41560-020-0598-5>

G.J.H.M. van Sark, W., & Korte, L. (2012). *Physics and technology of amorphous-crystalline heterostructure silicon solar cells* (F. Roca, Ed.; pp. 445-458). Springer.

Gong, H., Li, M., & Zhou, L. (2014). Materials Science in Semiconductor Processing A study of mottling phenomenon on textured multicrystalline silicon wafers and its potential effects on solar cell performance. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 26, 149-154. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2014.04.029>

Goodrich, A., Hacke, P., Wang, Q., Sopori, B., Margolis, R., James, T. L., & Woodhouse, M. (2013). A wafer-based monocrystalline silicon photovoltaics road map: Utilizing known technology improvement opportunities for further reductions in manufacturing costs. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 114, 110-135. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2013.01.030>

Green, M. A., Emery, K., Hishikawa, Y., & Warta, W. (2011). Solar cell efficiency tables (version 37). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 19(1), 84-92. <https://doi.org/10.1002/pip.1088>

Green, M. A., Emery, K., Hishikawa, Y., Warta, W., & Dunlop, E. D. (2015). Solar cell efficiency tables (Version 45): Solar cell efficiency tables. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 23(1), 1-9. <https://doi.org/10.1002/pip.2573>

Green, M. A., Emery, K., Yoshihiro, H., Warta, W., & Dunlop, E. D. (2014). Solar cell efficiency tables (version 44). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 22(1), 701-710. <https://doi.org/10.1002/pip>

Haase, F., Hollemann, C., Schäfer, S., Merkle, A., Rienäcker, M., Krügener, J., Brendel, R., & Peibst, R. (2018). Laser contact openings for local poly-Si-metal contacts enabling 26.1%-efficient POLO-IBC solar cells. *Solar Energy Materials and Solar*

Cells, 186, 184-193. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2018.06.020>

Jayakrishnan, R., Gandhi, S., & Suratkar, P. (2011). Correlation between solar cell efficiency and minority carrier lifetime for batch processed multicrystalline Si wafers. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 14(3-4), 223-228. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2011.02.020>

Kamble, C., Chide, N., Mhatre, S., & Sukhdeve, S. (2013). Thin film organic solar cell as an emerging PV technique. *Proceedings of the 2013 International Conference on Green Computing, Communication and Conservation of Energy, ICGCE 2013*, 649-653. <https://doi.org/10.1109/ICGCE.2013.6823516>

Kouhnavard, M., Ikeda, S., Ludin, N. a., Ahmad Khairudin, N. B., Ghaffari, B. V., Mat-Teridi, M. a., Ibrahim, M. a., Sepeai, S., & Sopian, K. (2014). A review of semiconductor materials as sensitizers for quantum dot-sensitized solar cells. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 37, 397-407. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.023>

Kumarage, W. G. C., Wijesundera, R. P., Seneviratne, V. A., Jayalath, C. P., Kaur, N., Comini, E., & Dassanayake, B. S. (2018). MgCl₂ activation of CdS films: An alternative for CdCl₂. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 367, 171-177. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2018.08.029>

Lee, Y. H., Stefiak, M., Heiniger, L., Gao, P., Seok, S. Il, Grätzel, M., & Nazeeruddin, M. K. (2014). *Power from the Sun: Perovskite Solar Cells*. 943-948.

Li, H., & Liu, X. (2015). Improved performance of CdTe solar cells with CdS treatment. *Solar Energy*, 115, 603-612. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.02.044>

Li, S., Ye, L., Zhao, W., Yan, H., Yang, B., Liu, D., Li, W., Ade, H., & Hou, J. (2018). A Wide Band Gap Polymer with a Deep Highest Occupied Molecular Orbital Level Enables 14.2% Efficiency in Polymer Solar Cells. *Journal of the American*



Chemical Society, 140(23), 7159-7167.
<https://doi.org/10.1021/jacs.8b02695>

Luque, A., & Steven, H. (2003). *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering* (1st edición). Wiley.

Lynn, P. a. (2010). Electricity from Sunlight: An Introduction to Photovoltaics. En *Electricity from Sunlight: An Introduction to Photovoltaics*. <https://doi.org/10.1002/9780470710111>

Mahtani, P., Leong, K. R., Jovet, B., Yeghikyan, D., & Kherani, N. P. (2012). High quality amorphous-crystalline silicon heterostructure prepared by grid-biased remote radio-frequency plasma enhanced chemical vapor deposition. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 358(23), 3396-3402.
<https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2012.08.015>

Maoucha, a, Djeflal, F., Lakhdar, N., Arar, D., & Abdi, M. a. (2012). *A multi-objective optimization-based approach to improve the organic solar cell efficiency*.
<https://doi.org/10.1109/REJET.2012.6195307>

Miura, S., Tashiro, M., Suzuki, K., Noda, S., Hori, S., & Nonomura, S. (2015). Stacked nanoparticle-transparent conductive oxide substrate combining high haze with low surface roughness for improvement of thin film Si solar-cell performance. *Thin Solid Films*, 574, 78-83.
<https://doi.org/10.1016/j.tsf.2014.11.086>

Nakajima, K., Morishita, K., & Murai, R. (2014). High-speed growth of Si single bulk crystals by expanding low-temperature region in Si melt using noncontact crucible method. *Journal of Crystal Growth*, 405, 44-51.
<https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2014.07.024>

Nemeth, B., Xu, Y., Wang, H., Sun, T., Lee, B. G., Duda, A., & Wang, Q. (2011). Performance of hydrogenated a-Si: H solar cells with downshifting coating. *MRS Proceedings*, 1321, mrss11-1321.
http://journals.cambridge.org/abstract_S1946427411009444

Nishioka, K., Takamoto, T., Agui, T., Kaneiwa, M., Uraoka, Y., & Fuyuki, T. (2006). Annual output estimation of concentrator photovoltaic systems using high-efficiency InGaP/InGaAs/Ge triple-junction solar cells based on experimental solar cell's characteristics and field-test meteorological data. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 90(1), 57-67.
<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2005.01.011>

NREL. (2021). *Efficiency Chart*.

Olsen, L., Kundu, S., Gross, M., & Joly, A. (2007). Damp Heat Effects on CIGSS and CdTe Cells. *Proc. DOE SETP Review Meeting, Denver, CO*.
http://www.eere.energy.gov/solar/review_meeting/pdfs/p_31_olsen_pnnl.pdf

Omar, A., & Abdullah, H. (2014). Electron transport analysis in zinc oxide-based dye-sensitized solar cells: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, 149-157.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.11.031>

Parel, T. S., Danos, L., & Markvart, T. (2015). Application of concentrating luminescent downshifting structures to CdS/CdTe solar cells with poor short wavelength response. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 140, 306-311.
<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2015.04.026>

Parida, B., Iniyar, S., & Goic, R. (2011). A review of solar photovoltaic technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(3), 1625-1636.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.032>

Park, N.-G. (2014). Perovskite solar cells: An emerging photovoltaic technology. *Mater. Today (Oxford, U. K.)*, 18(2), Ahead of Print.
<https://doi.org/10.1016/j.mattod.2014.07.007>

Qi, L., Zhang, C., & Chen, Q. (2014). Performance improvement of inverted organic solar cells by adding ultrathin Al₂O₃ as an electron selective layer and a plasma enhanced chemical vapor deposition of SiO_x encapsulating layer. *Thin Solid Films*, 567, 1-7.
<https://doi.org/10.1016/j.tsf.2014.07.038>



- Qiu, Z., Xu, Z., Li, N., Zhou, N., Chen, Y., Wan, X., Liu, J., Li, N., Hao, X., Bi, P., Chen, Q., Cao, B., & Zhou, H. (2018). Monolithic perovskite/Si tandem solar cells exceeding 22% efficiency via optimizing top cell absorber. *Nano Energy*, *53*, 798-807.
<https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2018.09.052>
- Rao, R. a., Mathew, L., Saha, S., Smith, S., Sarkar, D., Garcia, R., Stout, R., Gurmu, a., Onyegam, E., Ahn, D., Xu, D., Jawarani, D., Fossum, J., & Banerjee, S. (2011). A novel low cost 25 μ m thin exfoliated monocrystalline Si solar cell technology. *2011 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 001504-001507.
<https://doi.org/10.1109/PVSC.2011.6186244>
- Riede, M. K., Urich, C. L., Timmreck, R., Widmer, J., Wynands, D., Levichkova, M., Furno, M., Schwartz, G., Gnehr, W.-M., Pfeiffer, M., & Leo, K. (2010). Optimization of organic tandem solar cells based on small molecules. *2010 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 000513-000517.
<https://doi.org/10.1109/PVSC.2010.5616806>
- Romanyuk, Y. E., Fella, C. M., Uhl, a. R., Werner, M., Tiwari, a. N., Schnabel, T., & Ahlswede, E. (2013). Recent trends in direct solution coating of kesterite absorber layers in solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, *119*, 181-189.
<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2013.06.038>
- Romeo, N., Bosio, A., Canevari, V., & Podestà, A. (2004). Recent progress on CdTe/CdS thin film solar cells. *Solar Energy*, *77*(6), 795-801.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2004.07.011>
- Romeo, N., Bosio, A., Menossi, D., Romeo, A., & Aramini, M. (2014). Last Progress in CdTe/CdS Thin Film Solar Cell Fabrication Process. *Energy Procedia*, *57*, 65-72.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.009>
- Sasaki, K., Agui, T., Nakaido, K., Takahashi, N., Onitsuka, R., & Takamoto, T. (2013). *Development of InGaP/GaAs/InGaAs inverted triple junction concentrator solar cells*. 22-25.
<https://doi.org/10.1063/1.4822190>
- Scharber, M. C., & Sariciftci, N. S. (2013). Efficiency of bulk-heterojunction organic solar cells. *Progress in Polymer Science*, *38*(12), 1929-1940.
<https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2013.05.001>
- Sharp Develops Concentrator Solar Cell with World's Highest Conversion Efficiency of 44.4% | Press Releases | Sharp Global.* (s. f.). Recuperado 4 de junio de 2021, de <http://global.sharp/corporate/news/130614.html>
- Shen, H., Walter, D., Wu, Y., Fong, K. C., Jacobs, D. A., Duong, T., Peng, J., Weber, K., White, T. P., & Catchpole, K. R. (2020). Monolithic Perovskite/Si Tandem Solar Cells: Pathways to Over 30% Efficiency. *Advanced Energy Materials*, *10*(13), 1902840.
<https://doi.org/10.1002/aenm.201902840>
- Shyju, T. S., Anandhi, S., Suriakarthick, R., Gopalakrishnan, R., & Kuppusami, P. (2015). Mechano-synthesis, Deposition and Characterization of CZTS and CZTSe Materials for Solar Cell Applications. *Journal of Solid State Chemistry*, *227*, 165-177.
<https://doi.org/10.1016/j.jssc.2015.03.033>
- Siebentritt, S. (2013). Why are kesterite solar cells not 20% efficient? *Thin Solid Films*, *535*(1), 1-4.
<https://doi.org/10.1016/j.tsf.2012.12.089>
- Steiner, M. A., France, R. M., Buencuerpo, J., Geisz, J. F., Nielsen, M. P., Pusch, A., Olavarria, W. J., Young, M., & Ekins-Daukes, N. J. (2021). High Efficiency Inverted GaAs and GaInP/GaAs Solar Cells With Strain-Balanced GaInAs/GaAsP Quantum Wells. *Advanced Energy Materials*, *11*(4), 2002874.
<https://doi.org/10.1002/aenm.202002874>
- Su'ait, M. S., Rahman, M. Y. a., & Ahmad, a. (2015). Review on polymer electrolyte in dye-sensitized solar cells (DSSCs). *Solar Energy*, *115*, 452-470.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.02.043>
- Sun, Q., Zhang, F., An, Q., Li, L., Wang, J., Zhang, M., & Wang, W. (2015). Revealing the effect of



donor / acceptor intermolecular arrangement on organic solar cells performance based on two-dimensional conjugated small molecule as electron donor. *ORGANIC ELECTRONICS*, 24, 30-36. <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2015.05.010>

Tripathi, M., & Chawla, P. (2014). *Natural Photo sensitizers for Solid-State Dye Sensitized Solar Cell*. *Iconce*, 43-46.

tsigurdsson. (2014). *New world record for solar cell efficiency at 46%—Fraunhofer ISE*. <http://www.ise.fraunhofer.de/en/press-and-media/press-releases/press-releases-2014/new-world-record-for-solar-cell-efficiency-at-46-percent>

Tucci, M., Serenelli, L., Salza, E., Pirozzi, L., De Cesare, G., Caputo, D., & Ceccarelli, M. (2009). Bragg reflector and laser fired back contact in a-Si:H/c-Si heterostructure solar cell. *Materials Science and Engineering B: Solid-State Materials for Advanced Technology*, 159-160(C), 48-52. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2008.09.026>

Tyagi, V. V., Rahim, N. A. A., Rahim, N. A., & Selvaraj, J. A. /L. (2013). Progress in solar PV technology: Research and achievement. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 20, 443-461. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.09.028>

Varadan, V. V., & Ji, L. (2010). Optical metastructures for trapping light in thin Si solar cells. *Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 1057-1059. <https://doi.org/10.1109/PVSC.2010.5614665>

Wang, W., Winkler, M. T., Gunawan, O., Gokmen, T., Todorov, T. K., Zhu, Y., & Mitzi, D. B. (2014). Device Characteristics of CZTSSe Thin-Film Solar Cells with 12.6% Efficiency. *Advanced Energy Materials*, 4(7), 1301465. <https://doi.org/10.1002/aenm.201301465>

Wang, Y., Shao, B., Zhang, Z., Zhuge, L., Wu, X., & Zhang, R. (2014). Broadband and omnidirectional antireflection of Si nanocone structures cladded by SiN film for Si thin film solar cells. *Optics Communications*, 316, 37-41. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2013.11.050>

Williams, G., & Aziz, H. (2014). Implications of the device structure on the photo-stability of organic solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 128, 320-329. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2014.05.044>

Wolf, S. De, Descoeurdes, A., Holman, Z. C., & Ballif, C. (2012). High-efficiency Silicon Heterojunction Solar Cells: A Review. *Green*, 0(0), 7-24. <https://doi.org/10.1515/green-2011-0039>

Yoshikawa, K., Yoshida, W., Irie, T., Kawasaki, H., Konishi, K., Ishibashi, H., Asatani, T., Adachi, D., Kanematsu, M., Uzu, H., & Yamamoto, K. (2017). Exceeding conversion efficiency of 26% by heterojunction interdigitated back contact solar cell with thin film Si technology. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 173, 37-42. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2017.06.024>

You, J., Dou, L., Yoshimura, K., Kato, T., Ohya, K., Moriarty, T., Emery, K., Chen, C.-C., Gao, J., Li, G., & Yang, Y. (2013). A polymer tandem solar cell with 10.6% power conversion efficiency. *Nature communications*, 4, 1446. <https://doi.org/10.1038/ncomms2411>

Zhang, D., Stojanovic, M., Ren, Y., Cao, Y., Eickemeyer, F. T., Socie, E., Vlachopoulos, N., Moser, J.-E., Zakeeruddin, S. M., Hagfeldt, A., & Grätzel, M. (2021). A molecular photosensitizer achieves a Voc of 1.24 V enabling highly efficient and stable dye-sensitized solar cells with copper(II/I)-based electrolyte. *Nature Communications*, 12(1), 1777. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21945-3>