

CELDA SOLARES AVANZADAS: EL PAPEL CRUCIAL DE LAS TECNOLOGÍAS TÁNDEM.

ADVANCED SOLAR CELLS: THE CRUCIAL ROLE OF TANDEM TECHNOLOGIES

Dylan Tepatzi Xahuentitla (1*)
José Joaquín Alvarado Pulido(1)
Evelin Díaz Cruz(2)

<http://orcid.org/0000-0001-5336-1457>
<http://orcid.org/0000-0001-7186-4429>
<http://orcid.org/0000-0002-3219-129X>

NÚMERO ESPECIAL POSGRADO ICUAP EP11-2024
FECHA DE RECEPCIÓN: 20. DICIEMBRE.2023
FECHA DE APROBACIÓN: 26. FEBRERO.2024
FECHA DE PUBLICACIÓN: 7 MARZO.2024

(1) Instituto de Ciencias (ICUAP), Posgrado en dispositivos semiconductores, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, ecocampus Valsequillo, C.P.72960. San Pedro Zacachimalpa, Puebla México.

(2) Instituto de Física “Luis Rivera Terrazas” Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Ecocampus Valsequillo, C.P.72960. San Pedro Zacachimalpa, Puebla México.

dylan.tepatzix@alumno.buap.mx
joaquin.alvarado@correo.buap.mx
ediaz@ifuap.buap.mx

RESUMEN

Este artículo explora celdas solares avanzadas de nueva generación, con un enfoque destacado en las tecnologías tándem. Se presenta una investigación que abarca desde conceptos básicos hasta la actualidad y posibles materiales utilizados en estas innovadoras celdas solares. Las tecnologías tándem se destacan por su capacidad para mejorar la eficiencia en la conversión de energía solar mediante el uso de múltiples materiales teniendo diferentes sub-celdas que aportan al funcionamiento total. Se resaltan sus ventajas, como la alta eficiencia y el diseño centrado en el aumento de la absorción y eficiencia solar. A pesar de los avances, se mencionan desafíos asociados con su complejidad y costos. En última instancia, el artículo concluye enfatizando la importancia de abordar estos desafíos para lograr una adopción masiva de las celdas tándem, destacando su papel clave en la transición hacia fuentes de energía más sostenibles.

Palabras clave: Celda tándem, Unión PN, Eficiencia, sub-celdas, absorción, celdas solares y Efecto fotovoltaico.

ABSTRACT

This article explores next-generation advanced solar cells, with a prominent focus on tandem technologies. It presents research ranging from basic concepts to current developments and potential materials used in these innovative solar cells. Tandem technologies stand out for their ability to enhance efficiency in solar energy conversion by using multiple materials, with different sub-cells contributing to overall functionality. Their advantages, such as high efficiency and design focused on increased absorption and solar efficiency, are highlighted. Despite advancements, challenges associated with their complexity and costs are mentioned. Ultimately, the article concludes by emphasizing the importance of addressing these challenges to achieve widespread adoption of tandem cells, underscoring their key role in transitioning towards more sustainable energy sources.

Keywords: Tandem cell, PN junction, Efficiency, sub-cells, absorption, solar cells, and Photovoltaic effect.

INTRODUCCIÓN

El suministro energético se ha consolidado como una necesidad esencial desde la aparición de las primeras máquinas eléctricas funcionales. Esto ha sido un impulsor clave del desarrollo tecnológico en una sociedad cada vez más dependiente de aparatos eléctricos como: Refrigeradores, Computadoras, Televisores, Teléfonos Celulares e Internet, entre otros. La importancia de generar grandes cantidades de energía a costos bajos y de manera no contaminante, se ha convertido en una tendencia dominante. Un hecho es que la Tierra recibe 173×10^{10} kWh de energía solar cada hora, lo equivalente a 12,000 veces la energía requerida para el consumo humano a nivel mundial evidenciando lo prometedora de esta fuente energética. No obstante, existen pérdidas energéticas durante la transmisión de la energía solar hacia la superficie terrestre. A pesar de ello, la potencia solar

constante alcanza los 0.1353 W/cm^2 (Richard 1995), lo que ha impulsado un crecimiento significativo en la adopción de celdas solares como tecnología tanto presente como futura. Estas celdas solares representan una solución fundamental para aprovechar de manera eficiente y sostenible la abundante fuente de energía solar disponible. Citando (Richard 1995), las celdas solares “no solo se caracterizan por ser respetuosas con el medio ambiente, sino que también ofrecen fuentes de energía eléctrica limpias, eficientes, confiables e ininterrumpidas”. Esta característica las posiciona como una alternativa sólida capaz de reemplazar a las fuentes de energía contaminantes, tales como la energía nuclear, el gas natural, el carbón y el petróleo. Este cambio hacia fuentes de energía más sostenibles refleja la creciente conciencia sobre la importancia de preservar el medio ambiente y buscar soluciones energéticas más responsables. Después de lo que se ha expuesto, hay una pregunta importante que aún no hemos respondido: ¿Qué es exactamente una celda solar? Bueno, las celdas solares son dispositivos electrónicos que convierten la luz del sol en electricidad. Funcionan gracias a algo llamado Efecto Fotovoltaico. Este proceso ocurre cuando la luz incide sobre un semiconductor y los fotones (partículas de luz) rompen enlaces de valencia de la estructura del material para liberar electrones, permitiéndoles moverse. Lo que hace un dispositivo fotovoltaico es aprovechar estos electrones libres para direccionarlos hacia los contactos metálicos y así fomentar un flujo de electrones a través del dispositivo, de manera que, siempre que esté iluminado el material este generará electricidad (Fonash 2020).

Propiedades de los materiales.

Ahora no todos los materiales responden de la misma forma al ser irradiados ¿Por qué? Para responder a ello, se tiene que conocer la naturaleza de la luz, lo que se conoce como dualidad onda-partícula, que es fundamental en la teoría cuántica. Este concepto nos dice que la luz, se comporta tanto como partícula como onda, de manera que los fotones son cuantos de energía electromagnética. Un aspecto importante es que estos fotones llevan considerada una cantidad discreta de energía que es proporcional a su frecuencia, teniendo así, que el espectro solar consta de un rango que va desde el ultravioleta (250 nm), rango del visible entre 350 nm a 730 nm hasta el infrarrojo (2500 nm). Como se observa en la Figura 1, la mayor intensidad (correspondiente a la mayor potencia solar), se encuentra en el rango del visible, por lo que podemos inferir que un material que es excitado por dicha longitud de onda tendrá mayor entrada de energía proveniente del sol y, por lo tanto, aprovechará mejor la luz solar.

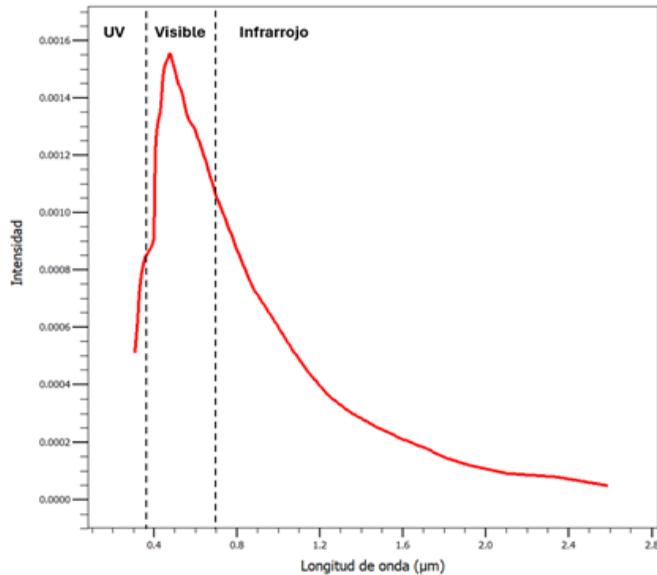


Figura 1. Espectro solar AM1.5

Los materiales que son óptimos para aplicaciones ópticas se pueden explicar a través de la teoría de los materiales semiconductores. Cada material semiconductor tiene una propiedad muy importante que es el ancho de banda. Esto es la energía necesaria para romper un enlace covalente de la estructura cristalina del material, y como la energía se relaciona con la longitud de onda por la ley de Broglie, ecuación 1:

$$E=hc/\lambda$$

Así que la energía de un fotón (partícula de luz) está relacionada con su longitud de onda λ , la constante de Planck h y la velocidad de la luz C . De esta forma, si se observa la figura 2, cada material semiconductor tiene un rango específico del espectro solar en el cual absorbe y si este está en el máximo de irradiancia, entonces en teoría sería más eficiente la CS, ya que tiene una mayor potencia disponible. Por lo que los mejores materiales estarán en 2.5 eV en energía o 430 nm en longitud de onda, sin embargo, no todos los semiconductores responden bien al irradiarse, a pesar de responder en el rango del visible, sino también influye si el semiconductor tiene propiedades ópticas. Esto es intrínseco de cada semiconductor. De acuerdo con la teoría de bandas se tiene:

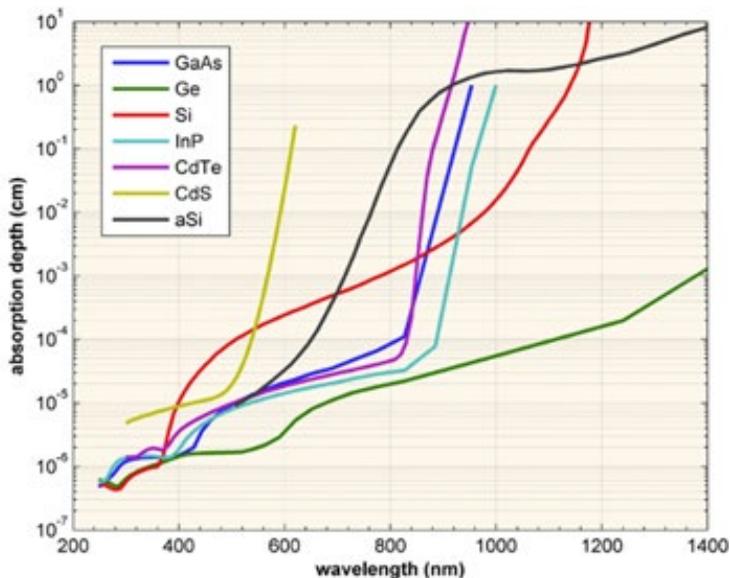


Figura 2. Representación de la estructura de una bacteria.
Elaboración propia en BioRender.com

Ancho de Banda Directo.

- En un material con un “Ancho de banda directo”, el nivel de energía del estado excitado (electrón en un nivel energético superior) es casi igual al nivel de energía del estado fundamental (electrón en el nivel más bajo). Esto significa que la transición electrónica que ocurre durante la absorción o emisión de luz implica un cambio directo en la energía sin necesidad de cambios en el momento de la red cristalina.

- Estos materiales tienden a tener una mayor eficiencia en la emisión y absorción de luz, lo que los hace útiles en aplicaciones fotónicas, como los diodos emisores de luz (LED) y láseres.

Ancho de Banda Indirecto:

- En un material con un “Ancho de banda indirecto”, la transición electrónica implica un cambio tanto en la energía como en el momento (momento) de la red cristalina. Esto significa que, para que ocurra la transición electrónica, es necesario un cambio adicional en el momento del electrón. Este tipo de transición suele requerir la participación de un tercer cuerpo (como un fonón) para conservar la cantidad de movimiento.

- Los materiales con ancho de banda indirecto tienden a ser menos eficientes en la emisión y absorción de luz en comparación con los materiales de ancho de banda directo.

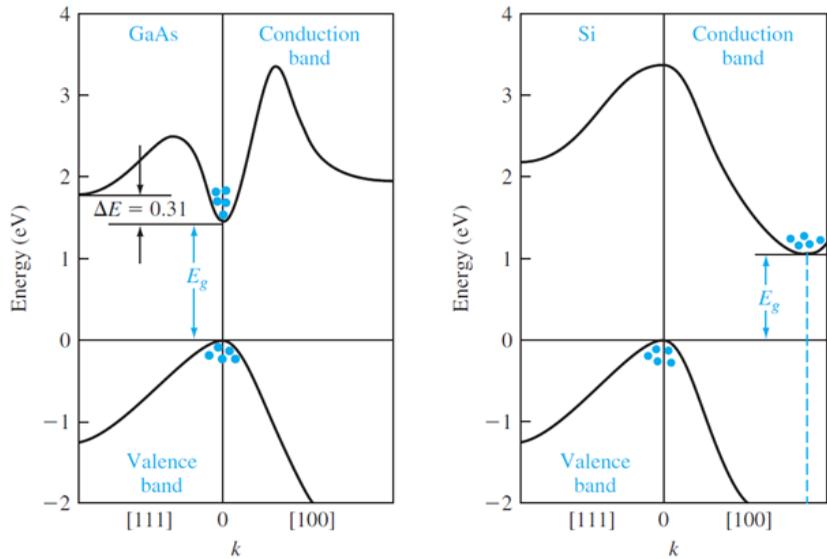


Figura 3. Diagrama de bandas a) Ancho de banda directo GaAs b) Ancho de banda indirecto Si (Neamen, 2012).

De manera que los materiales con mejores propiedades ópticas serán los que el momento es igual a cero y el máximo de la banda valencia coincide con el mínimo de la banda de conducción, simplemente una doble interacción durante el rompimiento del enlace covalente.

Una vez que contamos con materiales que exhiben propiedades ópticas favorables, el diseño preciso del dispositivo adquiere una importancia fundamental. En presencia de electrones libres, es esencial dirigir su movimiento, lo que subraya la relevancia del estudio de la física de los dispositivos semiconductores. Por ejemplo, en una celda solar convencional, se emplea una unión PN, lograda mediante la unión del dopado de dos semiconductores con elementos que aportan carga negativa por medio de electrones libres (tipo N) y otro que aporta carga positiva por medio de huecos libres (tipo P). Cuando estos semiconductores están en equilibrio, se forma una zona de deplexión. Las cargas negativas y positivas originadas por la difusión de los electrones y huecos originan un campo eléctrico interno que canaliza de manera precisa los portadores de carga hacia los contactos correspondientes. La estructura interna de las celdas solares PN, son formadas por 3 zonas importantes el emisor, la unión y la base (McEvoy et al., 2012), en la unión ocurre este proceso de discriminación de las cargas. Este proceso es esencial para el funcionamiento eficiente de la celda solar.

Funcionamiento de una celda solar

El proceso de convertir la energía solar en electricidad, se desarrolla a través de tres etapas clave, como se detalla en (Fonash 2020): Absorción, Conversión y Transporte. De manera simple, la celda solar utiliza un material específico que atrapa la luz solar en un rango particular del espectro solar. Luego, este material libera algunos electrones y los guía con la asistencia de un campo eléctrico interno formado por la unión de 2 semiconductores tipo P y tipo N (detalle visible en la figura 4). Este asombroso proceso culmina en la generación de una corriente eléctrica, y la cantidad de corriente producida está directamente vinculada a la intensidad de la luz solar que incide.

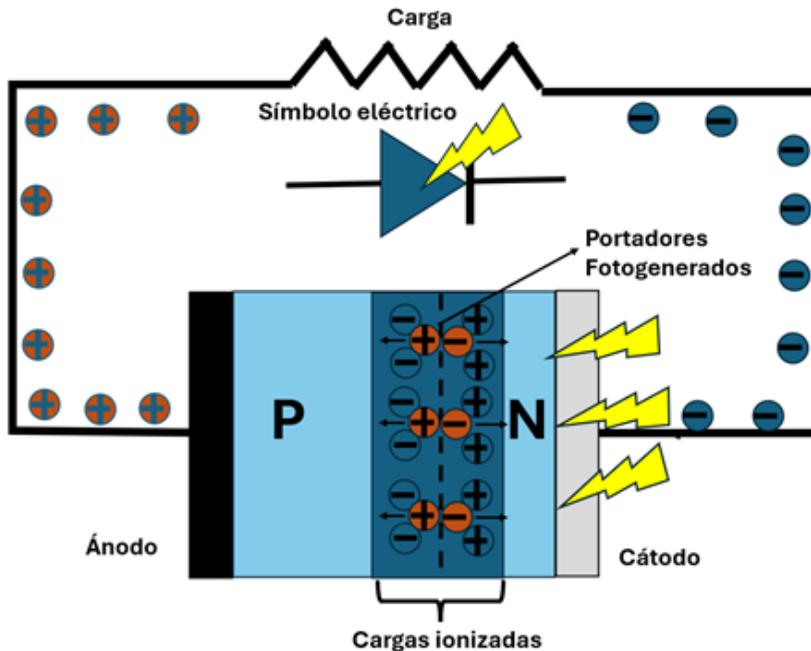


Figura 4. Representación gráfica de una celda solar y su composición interna. Elaboración propia.

Claves para la Excelencia en la Fabricación de Celdas Solares.

En el fascinante mundo de la fabricación de celdas solares, intervienen diversos elementos clave.

a) **Materiales Semiconductores:** La elección de materiales es fundamental.

Entre los semiconductores destacan el Silicio, Germanio, GaAs, GaN, Perovskitas y materiales orgánicos(Thomas Dittrich, (2014)).

b)Proceso de Fabricación: Aquí, nos sumergimos en los métodos para dar forma a los materiales semiconductores, utilizando procesos químicos, térmicos y físicos (Kern & Schuegraf, 2001). La precisión en estas etapas es crucial para garantizar la calidad y eficiencia.

c)Diseño: La configuración de la celda solar implica numerosos aspectos detallados. Estos abarcan el grosor de los materiales, el tipo de contacto utilizado, las capas absorbentes de luz, las capas ventanas transparentes, el tipo específico de celda solar, la disposición precisa de los materiales, la concentración de elementos clave y la implementación de superficies que optimicen la absorción de luz.

Estos elementos combinados contribuyen al desarrollo eficiente y efectivo de celdas solares, desempeñando un papel esencial en la obtención de energía a partir de fuentes sostenibles como la luz solar. Lo primordial al tomar en cuenta todos estos puntos es aumentar la eficiencia energética, lo que se traduce en ¿cuánta energía solar es aprovechada y convertida en energía eléctrica?

Progreso de las celdas solares

En la revista “Progress of photovoltaics”, se especifican cada año la eficiencia lograda y qué tecnología se utilizó para obtener dicho dispositivo. Desde el año de 1993 hasta el año 2023, en cuanto a la eficiencia, como se dice en (Green et al., 2023).

Como se especificó, las CS (celdas solares) que usan múltiples materiales III-V han alcanzado la mejor eficiencia por sus propiedades optoelectrónicas excelentes (gran absorción), además se muestra que ha habido un crecimiento en el interés de mejoramiento de las celdas solares convencionales y de nueva generación. Sin embargo, las celdas de silicio acaparan la mayor cuota de mercado por encima del 90% por su facilidad de fabricar , ya que son compatibles a la tecnología de chips CMOS (del inglés, Complementary Metal-Oxide-SEMICONDUCTOR) y a adaptación a la disponibilidad del material. Es por ello, que se han desarrollado las Celdas solares tipo tándem que como se menciona el autor (Wilson et al., 2020) “Ofrecen un margen mayor para alcanzar una eficiencia significativamente mayor”, además de que se pueden utilizar materiales económicos como el silicio o perovskita como tecnología base, para reducir los costos y que compitan con las celdas comerciales.

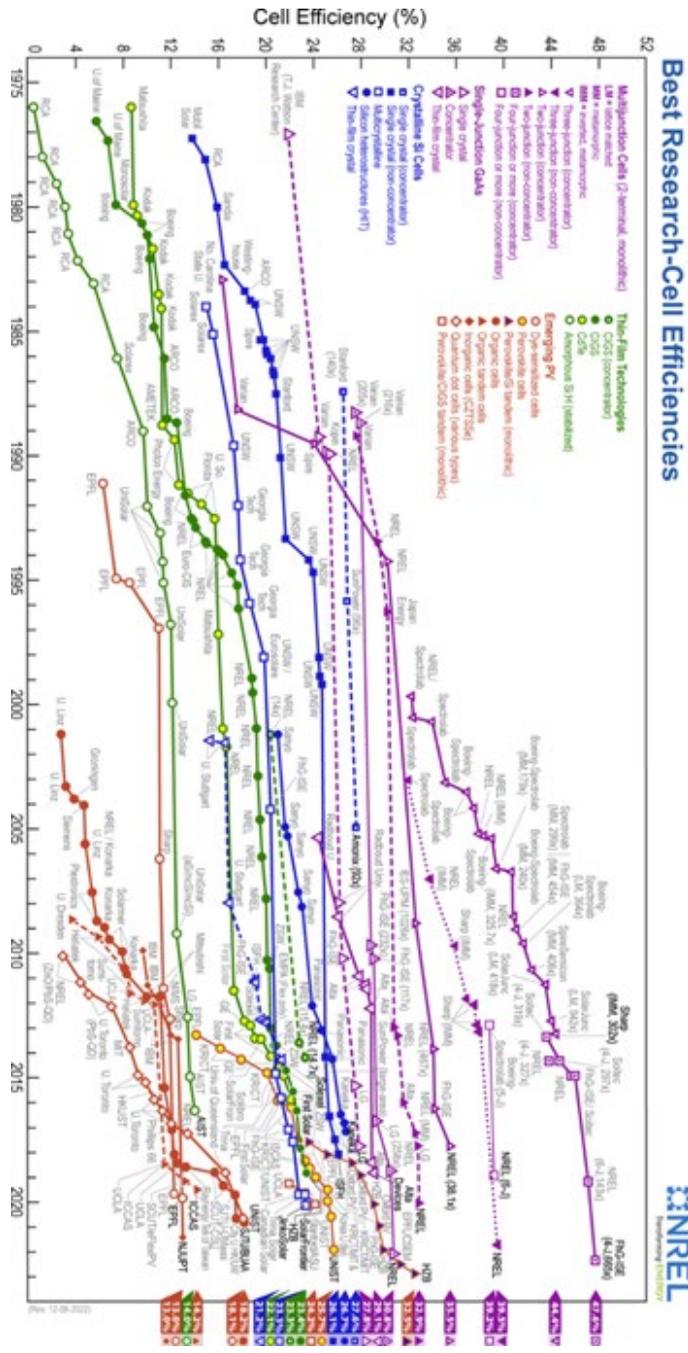


Figura 4. Eficiencias de las celdas solares (National Renewable Energy Laboratory, 2017).

Celdas solares tipo tándem.

Las celdas tipo tándem surgen de la necesidad de mejorar significativamente la eficiencia fotovoltaica, reduciendo costos, pero ¿en qué consisten estos componentes revolucionarios? Las celdas tándem, son como las orquestas de la energía solar, donde cada “instrumento” o sub-celda trabaja en armonía para crear una sinfonía (ver figura 6). En esta ilustración, se muestra un ejemplo de lo que son las celdas tándem y cómo se verían transversalmente, cada color representa un material distinto que ayude al aporte de energía de la eléctrica, además podrás notar que cada sub-celda contribuye al funcionamiento general. Existen tres fascinantes diseños, los de 2, 3 y 4 terminales. Imagina que las celdas solares de dos terminales son como construir un sándwich, apilando capas una sobre otra. Por otro lado, las de 3 y 4 terminales son como una banda musical más versátil, donde cada miembro puede tocar su propia melodía sin afectar a los demás (figura 6). Esto permite fabricar cada sub-celda con diferentes procesos y materiales. Por ejemplo, podríamos combinar la experiencia de fabricación y lo barato del silicio con la excelente eficiencia de los materiales III-V.

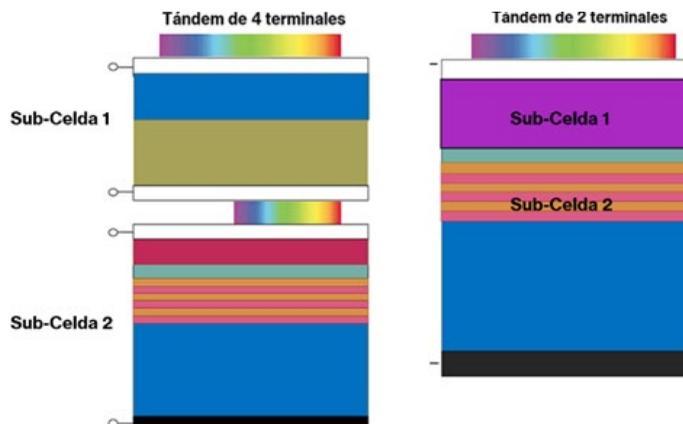


Figura 5. Celda solar tandem de 4 Terminales y 2 Terminales.

La magia radica en garantizar que cada sub-celda absorba la misma luz y genere electricidad al unísono. Para lograrlo, empleamos materiales transparentes, que actúan como ventanas que permiten que la luz fluya a través de cada sub-celda. Así que, en esencia, una celda tándem aprovecha las virtudes de cada sub-celda ampliando las posibilidades del uso de esta tecnología.

Materiales de Sub-celdas para celdas tándem.

Se ha hablado mucho de las celdas solares de siempre, las que usan Silicio por su bajo costo, disponibilidad, adaptación, fabricación y comercialización. Pero como se mencionó hay materiales nuevos que están causando sensación, como las perovskitas que están dando de qué hablar porque absorben la luz y producen energía eléctrica con buena eficiencia, son baratas de hacer y se pueden mezclar fácilmente con otras tecnologías, como las celdas solares de silicio (Lee et al., 2015), Luego tenemos otro material, el arseniuro de galio (GaAs), que suena complicado, pero es otro héroe en esto de la energía solar. Sus celdas solares son muy eficientes y han batido récords de eficiencia fotovoltaica. Estos materiales absorben la luz desde el visible hasta el infrarrojo, y aunque son un poco caras, algunos científicos están pensando en cómo combinarlas con celdas solares de silicio para hacerlas más accesibles. Otra alternativa a este material III-nitruros como base son los III-nitruro de galio indio , el cual ofrece uno de los mejores candidatos el nitruro de galio indio (InGaN) , ya que basados en su eficiencia teórica es el material con mayor proyección, aunque con varios retos que superar (Hamid Howlader et al., 2014; Huang et al., 2006; Jani et al., 2007; Wang et al., 2018). Además, hay otros materiales increíbles, como los compuestos GeSn que absorben diferentes tipos de luz invisible (la luz infrarroja) aunque no genera mucha electricidad aporta al rendimiento general del dispositivo (Wirths et al., 2015).

Existen muchos elementos que pueden ser utilizados como sub-celdas en la tabla se muestran qué materiales y el porqué de su posible uso. En esta tabla 1 destacan los materiales Silicio, Perovskitas y materiales III-V.

Material base	Ventajas	Desventajas	Eficiencia
Silicio	Disponibilidad y bajo precio	Baja eficiencia teórica.	26.7%
GaAs	Excelentes propiedades ópticas	Alto precio de fabricación y poca adaptabilidad a otros materiales	47.6%
Perovskita	Bajo costo	Degradación del material por la humedad y altas temperaturas	26.6%
InGaN	Excelente eficiencia teórica, altas propiedades ópticas, resistente a la radiación.	Separación de fases, alto costo, bajo dopado tipo P	3%

CIGS	Buenas propiedades ópticas, buena eficiencia	Falta de homogeneidad, fases secundarias bajo dopado	23.6%
------	--	--	-------

Tabla 1 comparativa de algunos materiales para celdas solares tándem.

La actualidad de las celdas tándem.

Las celdas solares tándem nos permite mejorar y optimizar las celdas solares existentes, empezando con las convencionales basadas en el elemento silicio y explorando otras sub-celdas con eficiencia similares perovskitas, CIGS (Wilson et al., 2020) y los dispositivos con el mayor rendimiento mostrado los semiconductores III-V (Kasap & Capper, 2006) , de las columnas III-V de la tabla periódica, entre otros. Las celdas tándem de Si/Perovskita por crecimiento monolítico han sido una realidad (Hossain et al., 2019) con una eficiencia de 32.2% pudiendo superar el rendimiento de las CS de unión simple.

Retos de estas celdas solares tipo tándem.

En el caso de CS no todo es la eficiencia, ya que a pesar de que la multifunción de los materiales III-V basados en el compuesto GaAs haya alcanzado una eficiencia de 47.6% no es la más comercial. Puesto que uno de los aspectos primordiales de las celdas solares, incluyendo la tecnología tándem, es la reducción de costos de vatio por watt, lo que lleva a que las celdas de silicio, a pesar de ser menos eficientes, acaparan el 90% del mercado global. Aquí es donde las CS tándem juegan un papel importante, debido a que se pueden adaptar sub-celdas comerciales a otras celdas con mayor eficiencia, por ejemplo las III-V buscando el aumento del rendimiento del dispositivo y reduciendo costos. Sin embargo, también estamos explorando formas de conectar eficientemente las capas superiores e inferiores de las celdas, utilizando enfoques innovadores como uniones túnel y óxidos conductores transparentes. Cuando se colocan capas adicionales sobre el silicio, como las llamadas celdas tándem, surgen nuevos desafíos. Por ejemplo, para las capas superiores, se necesita encontrar maneras de garantizar que los materiales alcancen su mejor rendimiento y, al mismo tiempo, no dañen el silicio. Esto es todo un reto debido a las diferentes necesidades de tratamiento para el silicio y las capas superiores. Se está trabajando duro para superar estos obstáculos y mejorar estas tecnologías.

Para las celdas tándem basadas en películas delgadas, como las de perovskita, queremos mejorar cómo capturan la luz en el infrarrojo cercano (Wilson et al., 2020). Esto es fundamental para lograr un rendimiento óptimo. Además, debemos asegurarnos de que las capas inferiores sean compatibles con el procesamiento de las capas superiores, especialmente para las celdas de perovskita.

Y eso no es todo, también estamos buscando maneras de hacer que las celdas solares sean más accesibles y asequibles. Para las capas superiores hechas de materiales como III-V, la reducción de costos es crucial. Estamos investigando nuevos métodos de deposición, sustratos y métodos de metalización para hacer que estas celdas sean más eficientes y económicas.

Ventajas y desventajas de la tecnología tándem.

Ventajas:

- Eficiencia Elevada: Las celdas tándem son prometedoras para lograr eficiencias altas en producciones a escala industrial, ofreciendo una mejora significativa.
- Diseño Centrado en la Absorción: La eficacia de las celdas tándem radica en igualar adecuadamente los espectros de absorción de las sub-celdas, maximizando así la recolección de energía solar.
- Configuración 2T: Las celdas tándem de 2 terminales (2T) ofrecen una integración más concisa en sistemas fotovoltaicos, requiriendo solo un electrodo transparente entre las capas superior e inferior y reduciendo costos.
- Efectividad en III-V/Si: Las celdas tándem basadas en III-V/Si, con métodos avanzados como el crecimiento epitaxial directo y el enlace de obleas, logran eficiencias extraordinarias en conversión de energía.

Desventajas:

- Complejidad en Configuración 4T: Aunque la configuración de 4 terminales (4T) es generalmente más simple, su diseño complejo puede aumentar los costos totales del sistema debido a gastos asociados con cables, mano de obra y otros aspectos.
- Retos Económicos: La complejidad de las celdas 4T puede ser un obstáculo para lograr reducciones significativas en los costos eléctricos en el futuro.
- Desafíos en Diseño de Cadenas: Para las celdas tándem, especialmente las de 4T, minimizar las pérdidas ópticas y de resistencia relacionadas con la recolección lateral de corriente desde contactos intermedios es un desafío clave.
- Costos Inherentes: Aunque las celdas tándem ofrecen eficiencias superiores, su costo es probablemente más alto que el de las celdas de un solo empalme, exigiendo eficiencias excepcionales para justificar la inversión.
- Consideraciones de Vida Útil: Lograr una vida útil extensa en módulos es crucial, y la tecnología tándem debe cumplir con estándares similares a las tecnologías convencionales, planteando desafíos en la estabilidad de las capas superiores de perovskitas.

Conclusiones

La evolución de las celdas solares, desde su surgimiento como respuesta a la creciente demanda energética hasta su posición actual como pilar de la transición hacia fuentes sostenibles, destaca la importancia de aprovechar la energía solar de manera eficiente y limpia. Las celdas solares, al convertir la luz solar en electricidad mediante el efecto fotovoltaico, ofrecen una solución crucial para reducir la dependencia de fuentes contaminantes. La introducción de nuevas tecnologías fotovoltaicas como las celdas tándem representa un hito significativo en este camino, empleando sub-celdas para mejorar la eficiencia y reducir costos. Aunque estas celdas prometen eficiencias elevadas, su adopción masiva enfrenta desafíos económicos

y técnicos que requieren atención. La constante búsqueda de nuevos materiales y su mejora en términos de estabilidad y reducción de costos subraya la innovación constante en este campo. Para alcanzar una transición energética completa, es relevante abordar desafíos específicos, como la complejidad de las celdas tándem, y garantizar su accesibilidad económica. En última instancia, el futuro de las celdas solares depende de la capacidad de la industria para equilibrar eficiencia, costo y sostenibilidad. Abordar estos desafíos allana el camino hacia un panorama energético más limpio y responsable, contribuyendo de manera significativa a la construcción de un futuro sostenible.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores de este manuscrito declaran no tener ningún tipo de conflicto de interés.

DECLARACIÓN DE PRIVACIDAD

Los datos de este artículo, así como los detalles técnicos para la realización del experimento, se pueden compartir a solicitud directa con el autor de correspondencia.

Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo contó con el apoyo del Centro de Investigación BUAP-CA-96-Aplicaciones Tecnológicas de Semiconductores, perteneciente al ICUAP, de la Universidad Autónoma de Puebla (BUAP). D. Tepatzi, estudiante de doctorado del “Programa de Doctorado en Dispositivos Semiconductores”, agradece al CONACYT la beca #1041324 para el desarrollo de su proyecto de investigación, incluyendo la publicación de este artículo. EVELYN BETSABE DIAZ CRUZ agradece al CONAHCYT beca postdoctoral “Estancias Posdoctorales por México para la formación y consolidación de las y los Investigadores por México”.

REFERENCIAS

Richard C. Neville Auth. - Solar Energy Conversion. The Solar Cell-Elsevier Science 1995.

Thomas Dittrich—Materials Concepts for Solar Cells-Imperial College Press (2014).

Fonash, S. J. (2010). Solar cell device physics (2nd ed). Academic Press/Elsevier.

Green, M. A., Dunlop, E. D., Yoshita, M., Kopidakis, N., Bothe, K., Siefert, G., & Hao, X. (2023). Solar cell efficiency tables (version 62). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 31(7), 651-663. <https://doi.org/10.1002/pip.3726>

Hamid Howlader, Md. A., Saha, A. K., Hasan, Md. S., & Islam, Md. R. (2014). Analysis of phase separation in InGaN epitaxy for advanced solar cells. 2014 3rd International Conference on the Developments in Renewable Energy Technology (ICDRET), 1-5. <https://doi.org/10.1109/ICDRET.2014.6861728>

Hossain, M. I., Qarony, W., Ma, S., Zeng, L., Knipp, D., & Tsang, Y. H. (2019). Perovskite/Silicon Tandem Solar Cells: From Detailed Balance Limit Calculations to Photon Management. *Nano-Micro Letters*, 11(1), 58. <https://doi.org/10.1007/s40820-019-0287-8>

Huang, Y., Jani, O., Park, E. H., & Ferguson, I. (2006). Influence of Growth Conditions on Phase Separation of InGaN Bulk Material Grown by MOCVD. *MRS Proceedings*, 955, 0955-107-20. <https://doi.org/10.1557/PROC-0955-107-20>

Jani, O., Yu, H., Trybus, E., Jampana, B., Ferguson, I., Doolittle, A., & Honsberg, C. (2007). EFFECT OF PHASE SEPARATION ON PERFORMANCE OF III-V NITRIDE SOLAR CELLS.

Kasap, S. O., & Capper, P. (Eds.). (2006). Springer handbook of electronic and photonic materials. Springer.

Kern, W., & Schuegraf, K. K. (2001). 1—Deposition Technologies and Applications: Introduction and Overview. En K. Seshan (Ed.), *Handbook of Thin Film Deposition Processes and Techniques (Second Edition)* (Second Edition, pp. 11-43). William Andrew Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-081551442-8.50006-7>

Lee, Y., Park, C., Balaji, N., Lee, Y., & Dao, V. A. (2015). High efficiency Silicon Solar Cells: A Review. *Israel Journal of Chemistry*, 55(10), 1050-1063. <https://doi.org/10.1002/ijch.201400210>

McEvoy, A. J., Markvart, T., & Castañer, L. (Eds.). (2012). Practical handbook of photovoltaics: Fundamentals and applications (2nd ed). Academic Press.

Neamen, D. A. (2012). Semiconductor physics and devices: Basic principles (4th ed). McGraw-Hill.

Wang, K., Wang, Q., Chu, J., Xiao, H., Wang, X., & Wang, Z. (2018). Roles of polarization effects in InGaN/GaN solar cells and comparison of p-i-n and n-i-p structures. *Optics Express*, 26(22), A946. <https://doi.org/10.1364/OE.26.00A946>

Wilson, G. M., Al-Jassim, M., Metzger, W. K., Glunz, S. W., Verlinden, P., Xiong, G., Mansfield, L. M., Stanbery, B. J., Zhu, K., Yan, Y., Berry, J. J., Ptak, A. J., Dimroth, F., Kayes, B. M., Tamboli, A. C., Peibst, R., Catchpole, K., Reese, M. O., Klinga, C. S., ... Sulas-Kern, D. B. (2020). The 2020 photovoltaic technologies roadmap. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 53(49), 493001. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ab9c6a>

Wirths, S., Geiger, R., Von Den Driesch, N., Mussler, G., Stoica, T., Mantl, S., Ikonic, Z., Luysberg, M., Chiussi, S., Hartmann, J. M., Sigg, H., Faist, J., Buca, D., & Grützmacher, D. (2015). Lasing in direct-bandgap GeSn alloy grown on Si. *Nature Photonics*, 9(2), 88-92. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2014.321>