

ESTADO DEL ARTE DE LA TECNOLOGÍA DE CELDAS SOLARES BASADAS EN SEMICONDUCTORES III-V

Juan Plá

Instituto de Nanociencia y Nanotecnología – CNEA-CONICET
Departamento Energía Solar - Centro Atómico Constituyentes - CNEA
Av. General Paz 1499 - (1650) San Martín – Provincia de Buenos Aires - Argentina
Tel. (011) 6772-7128, Fax (011) 6772-7121, jpla@tandar.cnea.gov.ar

Recibido: 01-09-20; Aceptado: 20-12-20; Publicado en línea: 17-02-20.

RESUMEN – En años recientes se observa un notable desarrollo de materiales y diseños de celdas solares destacándose particularmente las multijunturas basadas en semiconductores III-V, que configuran los dispositivos fotovoltaicos de la más alta eficiencia de conversión energética lograda hasta el momento. En esta tecnología, hemos observado la transición entre el estándar de tres junturas basado en materiales ajustados en el parámetro de red hacia arquitecturas basadas en materiales cuya energía de *gap* permite un mejor ajuste al espectro solar. Las estrategias abordadas son básicamente dos: i) utilizar materiales de composición graduada que posibilitan la ingeniería del *gap* accediendo a valores del mismo más apropiados para la absorción del espectro solar; ii) la unión de estructuras de semiconductores ajustados en el parámetro de red pero crecidas sobre sustratos cristalinos diferentes. Estas estrategias lograron sucesivamente los últimos récords en la eficiencia de conversión, llegando recientemente al diseño de un dispositivo de 6 junturas con una eficiencia de 47,1% a 143 soles de concentración. La tecnología de multijunturas III-V, ya consolidada en el mercado espacial y con productos comerciales para aplicaciones terrestres, emerge como candidata a ocupar un lugar de relevancia en un mercado dominado por la tradicional tecnología basada en el Si cristalino.

Palabras claves: celdas solares – semiconductores III-V – materiales fotovoltaicos - tecnologías emergentes

STATE OF THE ART OF SOLAR CELLS TECHNOLOGY BASED ON III-V SEMICONDUCTORS

ABSTRACT – In recent years, a noticeable development of materials and designs of lab level solar cells is observed. Among the emergent technologies, III-V based multijunctions highlight particularly, and configure the highest efficiency conversion photovoltaic devices ever accomplished. Inside this technology, we witnessed the transition between the standard 3-junction devices based on lattice matched materials towards architectures based on materials whose band gap allows a better match to the solar spectrum. The strategies addressed are basically two: i) the utilization of compositional graded materials, that allow the gap engineering to approach values closer to the ideal to the solar spectrum absorption; ii) bonded lattice matched semiconductor structures grew on different crystalline substrates. These strategies achieved the last successive records on the conversion efficiency, reaching recently up to the design of a 6-junction device with an efficiency of 47.1% at 143 suns of concentration. The III-V multijunction technology, already consolidated in the space market and with commercial products for terrestrial applications, emerges as a candidate to take a relevant role in a global market dominated by the traditional technology based on crystalline Si.

Keywords: solar cells – III-V semiconductors – photovoltaic materials – emergent technologies

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Marco general.

En la actualidad, la energía solar fotovoltaica (FV) es ya una alternativa energética competitiva en muchos mercados. Tiene asimismo la ventaja de la modularidad, pudiendo ser aplicada a gran escala en plantas de generación del orden del GW, hasta en generación distribuida de unos pocos kW en hogares urbanos, así como en numerosas aplicaciones como sistemas aislados para locaciones que carecen de red eléctrica: bombeo de agua, señalización marítima, sistemas de repetidoras en telecomunicaciones, estaciones de monitoreo

ambiental, micro-redes en poblaciones remotas, iluminación, protección catódica de gasoductos, y la que fue su primera aplicación: la provisión de potencia eléctrica en satélites artificiales.

La amplia difusión de la tecnología FV reconoce múltiples causas. Entre las más importantes se encuentra la abrupta caída del precio en los últimos años de su componente principal, el módulo FV. Dicho precio ha bajado tanto como 18 veces entre 2009 y 2019 (Green, 2019). Mientras, los costos de generación de las fuentes de generación tradicionales,

como las basadas en combustibles fósiles y nuclear, permanecieron aproximadamente constantes (Haegel et al., 2019). La caída del costo de generación de la energía solar FV es asignada usualmente a las siguientes causas: i) las políticas gubernamentales activas para la apertura de mercados y la disseminación de la tecnología; ii) el avance tecnológico dado por la inversión en I+D; iii) la economía de escala a nivel producción de componentes. Un análisis riguroso en este sentido puede verse en el artículo de Kavlak et al., 2018. En Green (2019) este punto de vista es revisado, y se da una interesante visión relacionada con la serendipia y particulares hechos históricos y decisiones políticas (la crisis del petróleo en los 70's, el accidente nuclear de Chernobyl, la política sostenida de *feed-in-tariff* en Alemania, por ejemplo) como motores del desarrollo de solar FV.

Como resultado de los hechos mencionados más arriba, se produjo un incremento notable de la potencia FV instalada, cuya evolución puede verse en la figura 1.

La tecnología históricamente dominante en la industria FV es aquella basada en el Si cristalino, mono o poli, que en 2018 cubría un 96% del mercado global. Mientras, la suma de todas las tecnologías de película delgada (CdTe, CuInGaSe, y en menor medida a-Si) vieron reducida su participación a lo largo de los años, alcanzando solo un 4% del mercado en 2018 (ISE, 2020).

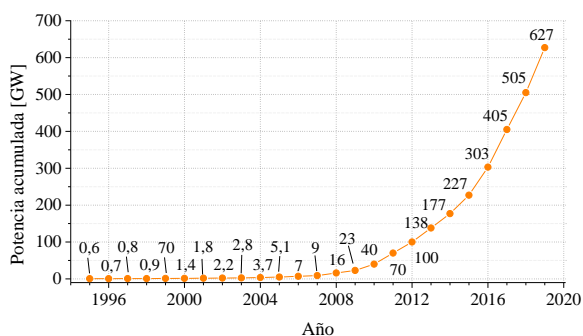


Fig. 1: Evolución de la capacidad instalada acumulada de solar FV a nivel global. Fuente: REN21 (2013), (2020)

1.2. Celdas solares basadas en semiconductores III-V.

Las celdas solares basadas en semiconductores III-V constituyen el estándar en la industria FV para aplicaciones espaciales, dada su superior resistencia al daño por radiación y eficiencia de conversión respecto a aquellas basadas en c-Si, entre otros factores a considerar (Plá, 2007). Asimismo, existen módulos comerciales para aplicaciones terrestres que utilizan concentración óptica de la radiación solar (tecnología conocida como CPV, *Concentrating Photovoltaics*) que provee una mejor ecuación económica y de rendimiento.

Las características favorables de estos semiconductores son su alta estabilidad, el *gap* directo, que permite fabricar dispositivos muy delgados, y la posibilidad de crecer estructuras monolíticas de alta calidad cristalina y pureza, y por lo tanto de excelentes propiedades electrónicas.

Hacia 1990, los dispositivos de GaAs competían con el c-Si en aplicaciones espaciales, y las multijunturas (MJ) basadas en semiconductores III-V comenzaron a desarrollarse. 10 años después, como fuera mencionado más arriba, los dispositivos III-V desplazaron a los basados en c-Si del mercado

espacial. Al mismo tiempo, comenzaba el trabajo de investigación asociado al desarrollo de CPV aprovechando su muy alta eficiencia de conversión.

La figura 2 muestra la notable evolución de las MJ III-V, en particular comparada con las tecnologías basadas en el Si cristalino (mono y multi), que evidencian una característica mayormente plana como signo de su madurez tecnológica. Las diferentes características particulares de las MJ III-V que aparecen en la figura se detallarán más adelante.

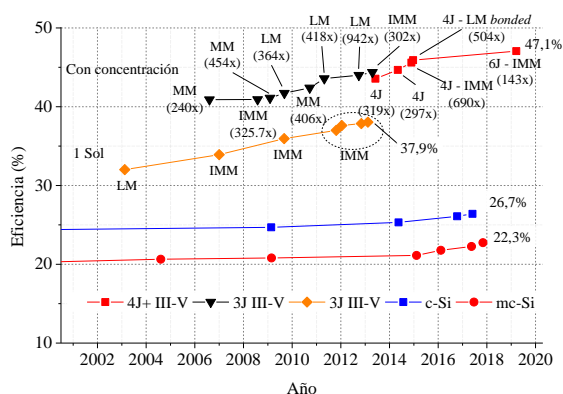


Fig. 2. Evolución de la eficiencia de conversión a nivel laboratorio para multijunturas III-V y tecnologías basadas en Si cristalino. LM corresponde a 'lattice matched', MM a 'metamorphic', e IMM a 'inverted MM'. En los casos de valores medidos bajo concentración se indica su nivel para cada punto. Fuente: NREL (2020).

En las secciones siguientes se pasará revista a la evolución histórica de las MJ III-V, las estrategias de diseño, arquitectura, y materiales más recientes, y finalmente se discutirán las perspectivas de esta tecnología.

2. MULTIJUNTURAS III-V. RESEÑA HISTÓRICA

2.1. Orígenes, la triple juntura, y los nitruros diluidos.

El interés en las celdas solares MJ III-V deviene de su competitividad en aplicaciones espaciales respecto a los dispositivos tradicionales de c-Si. El reemplazo del sustrato de GaAs por obleas de Ge en monojunturas de GaAs permitió, dadas las mejores propiedades mecánicas del Ge, la fabricación de dispositivos de mayor área, más delgados y por lo tanto más livianos. La posibilidad de activar el Ge, además, lleva a un mejor aprovechamiento del espectro solar al absorber fotones de menor energía dada su energía de *gap*.

Los primeros dispositivos fabricados fueron monojunturas de GaAs/Ge, que fueron naturalmente seguidos por MJ InGaP/GaAs/Ge, doble o triple juntura según la activación o no del sustrato de Ge. La elección del Ge está basada fundamentalmente en que su parámetro de red es muy similar al de varios compuestos semiconductores III-V, en particular el GaAs, haciendo posible el crecimiento epitaxial de materiales de buena cristalinidad y propiedades electrónicas y así disponer de una familia de energías de *gap* para cubrir más apropiadamente la absorción del espectro solar.

En los primeros trabajos publicados (por ejemplo Chang et al., 1987, Cavicchi et al., 1988, Tobin et al., 1988, Gillanders

et al., 1992, Huggins et al., 1992), se reportan algunos problemas asociados a la formación no intencional de una juntura en el Ge, como ser la aparición de curvas *I-V* anómalas debido a la falta de ajuste espectral entre el GaAs y el Ge, y el auto-dopado del GaAs por el Ge en procesos de relativamente alta temperatura (~700 °C).

Los primeros artículos que describen doble junturas datan del inicio de la década del 90, primeramente sobre sustratos de GaAs (Olson et al., 1990, Bertness et al., 1994a, 1994b) y luego sobre sustratos de Ge (Chiang et al., 1994). La primera celda solar de triple juntura, obtenida a partir de la activación del sustrato de Ge, fue reportada en 1996 (Chiang et al., 1996).

Utilizando materiales ajustados en el parámetro de red (*lattice matched*, LM), es posible obtener celdas de triple juntura para aplicaciones espaciales de hasta alrededor de un 30% (espectro AM0, 28 °C) a nivel industrial (Azur, 2020, CESI, 2020, SolAero, 2020, Spectrolab, 2020), y representa el estándar actual en estas aplicaciones. A nivel laboratorio, los dispositivos de triple juntura alcanzan una eficiencia de 37,9% (espectro AM1.5G, 25°C) para la estructura InGaP/GaAs/InGaAs crecida de manera inversa (Yamaguchi y Luque, 2013, Green et al., 2020).

Las celdas solares de triple juntura III-V comerciales, tanto para aplicaciones terrestres como espaciales, están basadas actualmente en la configuración InGaP/GaAs/Ge, y sus principales características son: estructura monolítica, materiales semiconductores LM crecidos epitaxialmente mediante la técnica MOVPE (*Metal-Organic Vapor Phase Epitaxy*) en un reactor MOCVD (*Metal-Organic Chemical Vapor Deposition*), pasivación de las superficies frontal (mediante una capa de relativamente alto *gap* denominada *window*) y posterior (mediante un BSF, *Back Surface Field*, a veces conocida como juntura posterior de cada juntura o subcelda, una multicapa antirreflectante de amplio espectro, junturas túnel para la conexión interna entre subceldas, y espesores optimizados para el espectro solar).

Más cerca en el tiempo, fueron propuestas estructuras de semiconductores que hacen un mejor aprovechamiento del espectro solar por medio de la denominada ingeniería del *gap* (*gap engineering*) dando lugar a materiales llamados metamórficos (Geisz et al, 2007, Geisz et al, 2008, Guter et al., 2009, Stan et al., 2010), donde la constante de red ya no se conserva en toda la estructura. Para ello se utilizan capas amortiguadoras (*buffer layers*), que posibilitan una gradual adaptación de la estequiometría de los compuestos para, así, minimizar la propagación de defectos cristalinos extendidos introducidos por el desajuste en la constante de red hacia las zonas activas del dispositivo. Cabe destacar que obtener materiales metamórficos implica un considerable aumento de la complejidad del proceso de crecimiento de la estructura de semiconductores.

En la figura 2 puede observarse que los dispositivos de triple juntura a nivel laboratorio, medidos en condiciones de concentración de la radiación incidente, tienen rendimientos similares para materiales ajustados en el parámetro de red como para el caso de los materiales metamórficos, a pesar que estos últimos implican una mejor aproximación a las energías de *gap* ideales a la vez que aumenta la complejidad del proceso de fabricación. Más adelante veremos que esta situación ya no se mantiene exactamente así una vez que se aumenta el número de junturas para obtener dispositivos aún más

eficientes, y que también hay otra alternativa que permite combinar materiales crecidos LM pero con diferentes parámetros de red.

Por otra parte, en la misma figura se observa que los dispositivos crecidos en forma inversa que involucran materiales metamórficos (IMM, *Inverted Metamorphic*) se desempeñan claramente mejor que los LM medidos a 1 sol.

Los avances en celdas solares MJ III-V han tenido un camino paralelo para las aplicaciones espaciales (a 1 sol) y terrestres (con concentración). Esta evolución se puede ver gráficamente en la figura 3, de acuerdo a los datos publicados en Bett et al, 2013. Se verifica un notable crecimiento en la eficiencia de un 1% (absoluto) por año.

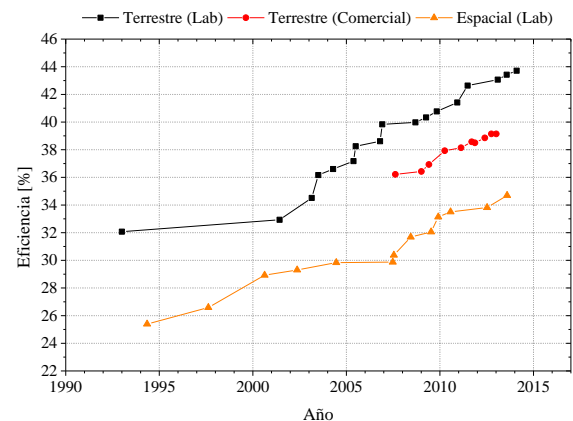


Fig. 3: Evolución paralela de la performance de celdas solares MJ III-V para aplicaciones terrestres con concentración (comerciales y a nivel laboratorio) y para aplicaciones espaciales sin concentración (a nivel laboratorio). Fuente: Bett et al., 2013.

Este comportamiento muestra la sinergia de la actividad de la I+D en cada segmento de aplicación.

Otra estrategia explorada para obtener valores de energía de *gap* más apropiados es la utilización de nitruros diluidos (compuestos III-N-V). Si bien con estos materiales es posible obtener una energía de *gap* del orden de 1 eV en condiciones LM, un valor apropiado por ejemplo para una cuarta juntura a incorporar a la estructura estándar de tres junturas, es un hecho conocido que la calidad electrónica de estos compuestos no es suficiente para cumplir este rol.

Sin embargo, se obtuvo un notable resultado para una triple juntura basada en la estructura GaInP/GaAs/GaInNAs(Sb) crecida sobre GaAs en condiciones LM, resultando en una eficiencia de conversión de 44,0% con concentración (espectro AM1.5D, 942 soles) (Sabnis et al., 2012). La característica particular de este resultado es que la estructura fue crecida utilizando MBE (*Molecular Beam Epitaxy*), y por lo tanto su factibilidad económica debería ser evaluada respecto al proceso MOVPE, usual y competitivo a nivel industrial (Bett et al., 2013).

La aplicación de nitruros diluidos ya fue explorada con cierto éxito para dispositivos monolíticos de 4 (King et al., 2009), 5, y 6 (Dimroth et al., 2005) junturas, aunque la complejidad del proceso de crecimiento junto al hecho que estructuras más simples dan un mejor resultado indica que muy difícilmente pasen a un proceso a nivel industrial.

2.2. Nuevas estrategias.

Las innovaciones más recientes en celdas solares MJ se centran en dos estrategias conducentes a superar los límites tecnológicos para lograr dispositivos funcionales de 4 o más junturas.

Una de estas innovaciones está basada en el concepto de *wafer bonding*. La idea es combinar junturas formadas por materiales que aproximen mejor los valores ideales de energía de *gap*, de la misma manera que los metamórficos, pero en este caso utilizando materiales LM.

La manera de lograrlo es utilizar crecimientos epitaxiales LM sobre distintos sustratos, cada uno con diferente parámetro de red, que posteriormente se unen (*bonding*) en un ulterior paso de fabricación, un proceso que debe garantizar buena adherencia, transparencia, estabilidad mecánica, y buena conductividad eléctrica.

Este tipo de estructuras lograron dos records de eficiencia sucesivos para dispositivos de 4 junturas (Dimroth et al., 2014, 2016), así como el record vigente para 5 junturas (Chiu et al., 2014). En el primer caso (Dimroth et al., 2014), se trata de un dispositivo de una eficiencia de conversión de 44,7% (AM1.5D, 297 soles) constituido por dos junturas crecidas en forma inversa sobre una oblea de GaAs (InGaP/GaAs), unidas a otras dos junturas crecidas en forma directa sobre una oblea de InP (GaInPAs/GaInAs), lo cual resulta en una estructura con energía de *gap* decreciente de la forma 1,88/1,45//1,10/0,73 eV. Mientras que cada doble juntura está formada por materiales LM, dichas junturas dobles no están ajustadas en el parámetro de red entre sí. Esta misma estructura fue ulteriormente optimizada resultando en un dispositivo de 46,0% de eficiencia (AM1.5D, 504 soles) (Dimroth et al., 2016).

El dispositivo de 5 junturas presentado en Chiu et al., 2014, sigue un concepto similar, en este caso para producir una estructura con energías de *gap* 2,2/1,7/1,4//1,05/0,73 eV (AlGaInP/AlGaInAs/GaInAs//GaInPAs/GaInAs). Este dispositivo mantiene el récord vigente para 5 junturas con una eficiencia de 38,8% (AM1.5G, 1 sol) (Green et al., 2020).

La otra estrategia está basada en la estructura monolítica y los materiales metamórficos. Como ejemplo de esta, un dispositivo de 4 junturas se obtiene creciendo en forma inversa materiales LM para las dos primeras subceldas y luego materiales metamórficos, a fin de obtener energías de *gap* apropiadas, para las dos siguientes subceldas. El dispositivo más eficiente con estas características es el reportado por France et al., 2015, alcanzando una eficiencia de conversión de 45,6% (690 soles), muy cerca del récord obtenido con la estrategia de estructuras LM unidas a posteriori (ver figura 2).

Por último, se publicó recientemente un notable artículo (Geisz et al., 2020), en el cual se reporta el último récord para dispositivos MJ III-V (y superior a cualquier otra tecnología) alcanzando una eficiencia de 47,1% (143 soles) para una celda solar de 6 junturas. Este dispositivo monolítico está cuidadosamente optimizado, con una estructura de energía de *gap* 2,1/1,7/1,4/1,2/0,95/0,69 eV obtenida utilizando el crecimiento inverso de materiales LM para las tres primeras subceldas y luego materiales metamórficos, con apropiadas capas amortiguadoras que adaptan el parámetro de red, para las otras tres subceldas.

3. MATERIALES SEMICONDUCTORES III-V PARA APLICACIONES EN CELDAS SOLARES MULTIJUNTURA

3.1. Algunos conceptos básicos de celdas solares multijuntura.

Una vez que un material semiconductor absorbe un fotón, en el caso de una celda solar los portadores de carga generados son separados por un campo eléctrico interno dado por la juntura *p-n*, llegando por difusión a los contactos eléctricos del dispositivo. Sin embargo, existen una serie de procesos físicos que intervienen e implican la pérdida de parte de la energía de los fotones absorbidos, tales como la termalización y la recombinación. Estos procesos son inevitables, y limitan la eficiencia de conversión.

En la figura 4 se presenta un diagrama esquemático donde se ilustran los procesos básicos que ocurren en una celda solar. Las características principales que se observan son: el semiconductor absorbe fotones de energía mayor o igual que la energía de *gap*, y la diferencia de energía entre el fotón y el *gap* se pierde por termalización. Otras pérdidas de energía incluyen la disipación por efecto Joule debido a la resistencia finita del semiconductor, los contactos metálicos, y la interfaz metal-semiconductor, los procesos de recombinación de portadores tanto en el volumen como en las superficies, y la reflectividad no nula de la cara frontal del dispositivo.

Las MJ dividen el espectro solar en bandas utilizando una secuencia de semiconductores con energías de *gap* decreciente, de modo tal que la diferencia entre la energía del fotón que se absorbe y la energía de *gap* del semiconductor correspondiente se mantiene acotada.

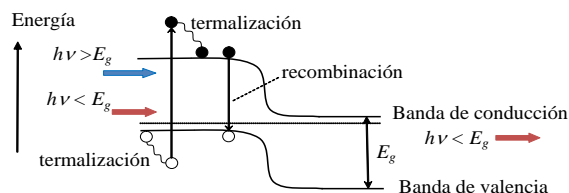


Fig. 4. Esquema de las bandas de energía correspondientes a una juntura semiconductor, donde se muestran las principales pérdidas de energía: termalización y recombinación. Los fotones de energía menor al *gap* E_g no son absorbidos y por lo tanto no generan portadores.

La figura 5 muestra el ejemplo correspondiente a una triple juntura estándar InGaP/GaAs/Ge, donde cada sección del espectro solar es absorbida por una juntura diferente. Esta absorción se obtiene multiplicando el flujo de fotones por la eficiencia cuántica externa (EQE) del dispositivo, es decir el número de electrones generados por fotón incidente. Las líneas verticales indican las longitudes de onda correspondientes a la energía de *gap* de cada semiconductor.

La penetración de la respuesta de la subcelda de GaAs en la zona correspondiente a la subcelda de InGaP se debe al bajo espesor de esta última, el cual está optimizado para obtener el ajuste de las corrientes fotogeneradas y así evitar ulteriores pérdidas eléctricas. Esto está causado por la arquitectura monolítica de las multijunturas: dado que las junturas están conectadas en serie, la corriente estará limitada por la subcelda que genera la fotocorriente más baja.

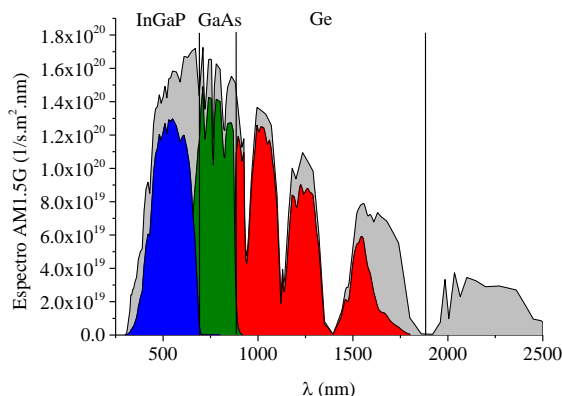


Fig. 5. Espectro solar AM1.5G expresado como flujo de fotones. En color, la absorción de cada junta correspondiente a una triple junta InGaP/GaAs/Ge, calculada a partir de la EQE de un dispositivo real (datos extraídos de King et al., 2000). En este caso la absorción no solo representa las pérdidas por termalización, sino el conjunto de pérdidas presentes en un dispositivo.

A medida que el número de juntas aumenta, las bandas de absorción se vuelven más angostas y por lo tanto disminuye la corriente fotogenerada, mientras que la tensión aumenta. Esta situación resulta particularmente ventajosa en aplicaciones terrestres con concentración donde el flujo de fotones es alto. Cuantas más juntas tenga el dispositivo, menores serán las pérdidas resistivas I^2R y, por otra parte, las juntas túnel tendrán que soportar menores niveles de densidad de corriente.

En el límite de infinitas juntas, y bajo la hipótesis de considerar solo las pérdidas fundamentales (termalización y recombinación radiativa), se obtiene una eficiencia de conversión de 65% a un sol, mientras que el incremento de los portadores fotogenerados obtenido utilizando concentración implica un ulterior aumento de la tensión alcanzando una eficiencia de 85% en este límite (Martí y Araújo, 1996).

3.2. Aplicaciones de materiales semiconductores III-V.

Como fuera referido en la sección 2, la tecnología correspondiente a las celdas solares de triple junta estándar ya es una realidad de amplio uso en el mercado espacial y cuenta con productos comerciales en aplicaciones terrestres. La intención de aproximar el límite comentado sobre el final de la sección precedente, implica un considerable aumento de la complejidad en la implementación de estructuras de semiconductores funcionales y que, a su vez, tengan una mejor performance que la tecnología estándar en MJ.

Solo en años recientes se lograron variantes de un número de juntas mayor que 3 que superaran los resultados anteriores a través de la manipulación de la estequiometría de los compuestos III-V para así lograr energías de *gap* más apropiadas para el aprovechamiento del espectro solar.

Para llegar a este punto consideraremos primero la estructura tradicional de una triple junta. Los materiales básicos de la misma son el InGaP y el GaAs, crecidos de manera epitaxial sobre un sustrato de Ge. La forma de obtener materiales de buena calidad electrónica es que los mismos tengan el mismo parámetro de red, de manera tal de evitar dislocaciones y otros defectos extendidos que reduzcan la vida media de los portadores fotogenerados.

Como comentáramos anteriormente, la técnica utilizada a nivel industrial para el crecimiento epitaxial de los compuestos semiconductores III-V, que pueden ser binarios, ternarios y aún cuaternarios, se denomina MOVPE. Una descripción detallada de esta técnica está más allá del alcance de este artículo. Resumidamente, es un proceso químico donde los precursores, sean tanto compuestos metal-orgánicos como hidruros, se encuentran en fase vapor e ingresan a la cámara de reacción en determinadas proporciones según el compuesto que se quiera crecer y el tipo y concentración del dopante a incorporar. La reacción química de los precursores ocurre sobre la superficie del sustrato, seguida por la difusión y nucleación en un proceso dinámico. La temperatura del sustrato se mantiene constante para cada compuesto, así como la presión en la cámara.

Los precursores típicos son el trimetilgalio, trimetilindio, y trimetilaluminio para los elementos de la columna III, y fosfina y arsina para los de la columna V, mientras que para los dopantes se utilizan dietilzinc, disilano, y tetracloruro de carbono (Friedman et al, 2011). El gas de arrastre y dilución de las especies en fase vapor es el hidrógeno. Una descripción pormenorizada del proceso de heteroepitaxia involucrado en las estructuras de semiconductores que tratamos aquí puede encontrarse en Stringfellow, 1982.

La figura 6 muestra algunos ejemplos de compuestos III-V, así como distintas estequiometrias o familias de compuestos. En particular, el caso de la triple junta estándar InGaP/GaAs/Ge (en realidad $\text{Ga}_{0,51}\text{In}_{0,49}\text{P}/\text{Ga}_{0,99}\text{In}_{0,01}\text{As}/\text{Ge}$, para asegurar las condiciones de ajuste del parámetro de red con el Ge; ver Takamoto et al., 2000) se encuentra resaltado sobre la izquierda de la figura con los colores azul, verde, y rojo respectivamente.

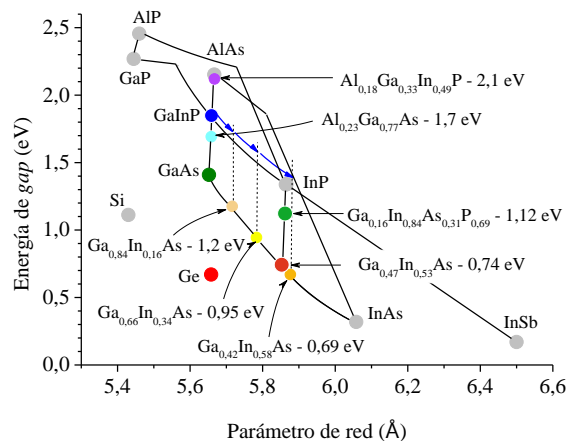


Fig. 6. Energía de *gap* vs. parámetro de red para algunos compuestos semiconductores III-V (ver texto).

La estructura de una celda estándar de triple junta puede verse, por ejemplo, en el artículo de Takamoto et al., 2000, y se muestra aquí en la figura 7. Como fuera mencionado, cada subcelda está formada por una junta n^+p , y una heteroestructura que contiene las capas *window* y BSF que actúan como pasivantes de las superficies para mitigar la recombinación de portadores. Las juntas túnel permiten una conexión interna de baja resistencia entre las subceldas, mientras que la capa *buffer* actúa como capa de nucleación al inicio del crecimiento epitaxial. En cada subcelda se utilizan materiales de alto *gap* como pasivantes y en las juntas túnel, que a su vez

previenen la absorción de fotones que serán útiles para la generación en la subcelda siguiente.

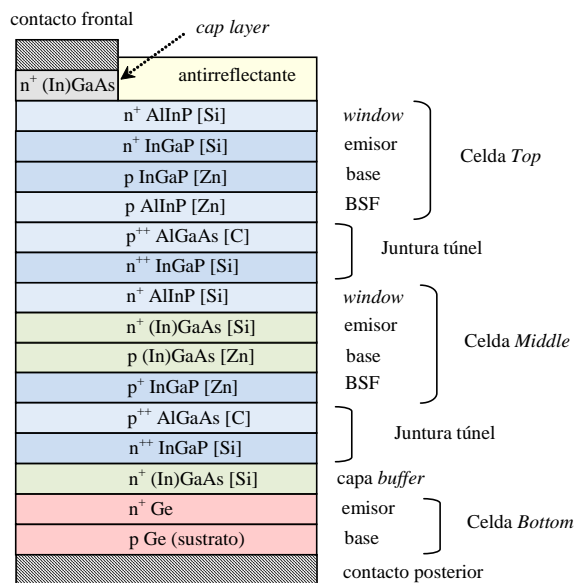


Fig. 7. Estructura de capas de una celda solar de triple juntura estándar. La capa 'cap layer' tiene como función proveer un buen contacto eléctrico en la interfaz metal-semiconductor. Fuente: Takamoto et al., 2000.

Los espesores en esta estructura de capas están optimizados de manera tal que maximizan la absorción de la luz y proveen el ajuste de la corriente generada por cada subcelda (Friedman et al., 2011). Las capas asociadas a la pasivación y a las junturas túnel se mantienen lo más delgadas posible mientras cumplan su función. Los valores de espesor típicos pueden encontrarse en Friedman et al., 2011, y están en el orden de 100 nm para los emisores, BSF, y junturas túnel, 30 nm para las capas window, y 1 μm y 3 μm para la base de las subceldas de InGaP y GaAs respectivamente.

El desajuste en el parámetro de red de una heteroestructura de semiconductores III-V, más allá de un cierto espesor crítico, induce la aparición de una tensión mecánica que es liberada a través de dislocaciones. Estos defectos cristalinos extendidos implican la aparición de niveles profundos en el gap, que actúan como centros de recombinación no radiativa y por lo tanto degradan la calidad electrónica del material. Este es el problema a resolver cuando se utilizan materiales metamórficos en la búsqueda de energías de gap cercanas al ideal en dispositivos fotovoltaicos multijuntura.

Por ejemplo, en el trabajo de Guter et al., 2009, se presenta una estructura de tres junturas cercana a la ideal, ajustada en corriente, y crecida sobre un sustrato de Ge: $\text{Ga}_{0,35}\text{In}_{0,65}\text{P}/\text{Ga}_{0,83}\text{In}_{0,17}\text{As}/\text{Ge}$, con energías de gap 1,67/1,18/0,66 eV, pero con un importante desajuste de 1,1% en el parámetro de red respecto al Ge. La manera instrumentada por los autores de resolver este problema es usar una capa amortiguadora $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}$ con estequiometría escalonada, adaptando paulatinamente el parámetro de red, de manera tal que las dos subceldas superiores son LM y libres de defectos cristalinos. El parámetro x varía entre 0,01 y 0,17, a lo largo de 7 capas de 200 nm de espesor cada una entre el sustrato y la subcelda middle, para finalmente ajustar el parámetro de red de dicha subcelda. La tensión en la red cristalina es absorbida por la capa amortiguadora, transparente e inactiva para

la generación de corriente, concentrando todas las dislocaciones y permitiendo el crecimiento libre de defectos de las subceldas superiores.

Otro método interesante para obtener materiales con energías de gap más cercanas a las ideales es el crecimiento invertido, mencionado anteriormente en referencia a las celdas solares IMM. En contraste con el ejemplo del párrafo anterior de crecimiento en forma directa (*upright growth*), la estructura de capas se crece comenzando por la subcelda superior (*top cell*). Luego del crecimiento de la estructura, la misma se desprende del sustrato utilizando un ataque químico selectivo de una capa de sacrificio, técnica denominada *epitaxial lift-off*.

Este método tiene dos ventajas. Una es que la estructura puede ser montada en un sustrato liviano, mientras que el sustrato original puede ser potencialmente reutilizado, con un importante ahorro en el costo del dispositivo; la otra es que la subcelda inferior ya no tiene la limitación del Ge, cuya energía de gap es demasiado baja respecto al valor ideal en una triple juntura.

Un ejemplo de aplicación en una triple juntura se puede encontrar en el artículo de Geisz et al., 2007. Utilizando un sustrato de GaAs, se crece en forma inversa una doble juntura (LM) InGaP/GaAs, que luego se combina con una tercera juntura metamórfica $\text{In}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$, de una energía de gap de 1 eV. En este caso se utiliza una capa amortiguadora escalonada de $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$, donde x varía entre 0,51, valor que ajusta al parámetro de red del GaAs, y 0,25, que se ajusta al $\text{In}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$.

Hasta aquí consideramos la evolución de la tecnología de celdas solares basadas en semiconductores III-V que llevó a los dispositivos de triple juntura, tanto el estándar que cuenta con productos comerciales como los intentos desde la actividad de I+D de superar las limitaciones de los compuestos y sustratos disponibles para la fabricación de dispositivos de buena calidad electrónica.

El aumento del número de junturas como medio de mejorar la eficiencia de conversión ya fue propuesto y ensayado con anterioridad, pero no es sino hasta mediados de la última década en que los primeros dispositivos de 4 junturas funcionales superaron en performance a los de 3 junturas. Nos referimos a los mismos en la sección 2.2 y a continuación, utilizando los mejores ejemplos de cada estrategia utilizada, los consideraremos más detalladamente ya que son los que darán una mejor perspectiva del estado del arte.

3.3. Últimos desarrollos. Estructuras LM 'bonded'.

Consideraremos como ejemplo la celda solar de 4 junturas presentada en el artículo de Dimroth et al., 2014, que dio lugar posteriormente al récord alcanzado por los mismos autores (Dimroth et al., 2016).

La estructura de de semiconductores propuesta es $\text{Ga}_{0,51}\text{In}_{0,49}\text{P}/\text{GaAs}/\text{Ga}_{0,16}\text{In}_{0,84}\text{As}_{0,31}\text{P}_{0,69}/\text{Ga}_{0,47}\text{In}_{0,53}\text{As}$, con energías de gap 1,88/1,42/1,12/0,74 eV. Las dos junturas superiores son las tradicionales utilizadas en los dispositivos estándar de triple juntura, ajustadas en parámetro de red con un sustrato de Ge (o GaAs), mientras que las dos junturas inferiores se encuentran ajustadas a un sustrato de InP, y pueden visualizarse en la figura 6 (puntos verde claro y morado, alineados verticalmente con el InP).

El crecimiento epitaxial es realizado en dos procesos MOVPE diferentes: las junturas superiores de manera inversa sobre un

sustrato de GaAs, y las juntas inferiores en forma directa sobre un sustrato de InP. El ajuste del parámetro de red asegura para ambas estructuras materiales libres de defectos extendidos, y por lo tanto de excelentes propiedades electrónicas. Si bien no hay mayores detalles acerca de la estructura, esta sigue las habituales características de las MJ ya discutidas (juntas *n-p*, pasivación de las superficies, juntas túnel para el contacto interno) pero con una particularidad: cada subestructura de dos juntas finaliza con una capa fuertemente dopada tipo *n* (con una concentración $N_D > 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) de GaAs y InP en las superficies que luego será unidas.

El proceso clave de esta propuesta es el que produce la unión entre las dos subestructuras. Este proceso deberá tener una baja carga térmica (para evitar la posible difusión de dopantes durante el mismo), una adecuada estabilidad mecánica para soportar los procesos siguientes en la fabricación del dispositivo, y una baja resistencia eléctrica. Una descripción relativamente detallada de un proceso aplicado a celdas solares se encuentra en el desarrollo publicado en Bhusari et al., 2011. Entre sus principales características están: i) la necesidad de superficies muy planas; mientras que la rugosidad media en un crecimiento epitaxial está en el orden de algunos nm, la misma debe disminuirse hasta alrededor de 0,5 nm; ii) baja cantidad de partículas en la superficie; las partículas están asociadas con la aparición de defectos superficiales en la unión. En Bhusari et al., 2011 se propone un proceso de pulido mecánico-químico durante 10 minutos, luego del cual obtienen 0,36 nm de rugosidad media y menos de 1000 partículas en un área de $40 \times 40 \mu\text{m}^2$. No se reportan los detalles del proceso en sí, tales como la temperatura, la presión, las rampas de temperatura, y el tiempo. Los autores afirman que el proceso que realizan produce una unión muy fuerte (con una energía de ligadura mayor que $4,1 \text{ J/m}^2$), buena transparencia (97%), y baja resistencia ($0,3 \Omega\text{cm}^2$). Cabe destacar que en Dimroth et al., 2014 reportan una resistencia de $0,01 \Omega\text{cm}^2$.

Luego de la unión entre las dos subestructuras, el proceso de fabricación del dispositivo continúa con la remoción del sustrato de GaAs utilizando un ataque químico, el depósito del contacto frontal, luego una bicapa antirreflejante de $\text{MgF}_2/\text{TaO}_x$, y finalmente un ataque *mesa* que define el área del dispositivo (Dimroth et al., 2014).

La publicación del récord de esta tecnología por parte de los mismos autores (Dimroth et al., 2016) está basada en la misma estructura, pero mejorada a partir de una optimización teórica. La combinación de energías de *gap* óptimas se obtiene maximizando el producto entre energía de *gap* y fotocorriente, bajo la hipótesis de que la eficiencia cuántica es igual a 1 en todos los casos (es decir, se genera un par electrón-hueco por cada fotón absorbido). Las propiedades ópticas de los compuestos ternarios y cuaternarios son obtenidas mediante interpolación, y se aplica el método de la matriz de transferencia para obtener la absorción óptica en cada una de las capas. Asimismo, las juntas túnel son consideradas transparentes y no se insertan en la estructura. Los espesores de las subceldas fueron corregidos para igualar las corrientes fotogeneradas.

El límite teórico para la eficiencia de conversión obtenido para esta estructura es 53,8% a 500 soles, mostrando la factibilidad de obtener dispositivos con eficiencias mayores que 50%.

La caracterización de dispositivos multijuntura es un tema delicado y, aunque amerita esta mención, no nos extenderemos

demasiado sobre el mismo. Resumidamente, la caracterización eléctrica debe tener en cuenta el contenido espectral de la fuente de iluminación; eventualmente, el desajuste respecto al espectro solar estándar AM1.5D (u otro, según la aplicación) puede conducir a un resultado erróneo. Por otra parte, dado que no se tienen contactos para acceder a cada subcelda, la medición de la eficiencia cuántica requiere una cuidadosa polarización eléctrica y luminosa (García et al., 2017). Un mayor detalle acerca de la caracterización de dispositivos MJ puede encontrarse en Osterwald y Siefer, 2016.

Las particularidades relacionadas con la caracterización eléctrica de las multijuntas llevan a los distintos valores de eficiencia de conversión presentados en Dimroth et al., 2016. El récord de 46,0% a 508 soles de concentración fue independientemente confirmado, mientras que la medición realizada por los autores en el laboratorio de calibración del Fraunhofer ISE tiene un pico de 46,1% a 312 soles, y 47,4% a 389 soles, utilizando dos fuentes de iluminación diferentes. Al margen, obtuvieron excelentes valores de eficiencia cuántica externa (en el orden del 90%) para todas las subceldas.

3. Últimos desarrollos. Estructuras metamórficas invertidas

El récord más reciente en multijuntas basadas en semiconductores III-V, obtenido para un dispositivo IMM de 6 juntas (Geisz et al., 2020), muestra el enorme potencial de esta estrategia. La estructura de capas se inicia con el crecimiento de las 3 primeras subceldas en forma invertida sobre un sustrato de GaAs en condiciones LM, al cual le siguen las siguientes 3 subceldas en condiciones MM, de modo de obtener una óptima combinación de energías de *gap*. Los principales desafíos de esta idea son controlar las dislocaciones y evitar la segregación de fases en los compuestos III-V metaestables durante el crecimiento de la estructura metamórfica.

La estructura presentada para el dispositivo de 6 juntas es $\text{Al}_{0,18}\text{Ga}_{0,33}\text{In}_{0,49}\text{P}/\text{Al}_{0,23}\text{Ga}_{0,77}\text{As}/\text{GaAs}$, para las primeras 3 juntas, utilizando juntas túnel de $\text{Al}_{0,6}\text{Ga}_{0,4}\text{As}$, y $\text{Ga}_{0,84}\text{In}_{0,16}\text{As}/\text{Ga}_{0,66}\text{In}_{0,34}\text{As}/\text{Ga}_{0,42}\text{In}_{0,58}\text{As}$ para las siguientes 3 juntas, que tienen un desajuste en el parámetro de red con el sustrato de GaAs de 1,1, 2,4 y 4,2% respectivamente. Los materiales que constituyen las juntas están indicados en la figura 6, con símbolos en color de menor tamaño respecto a los materiales considerados anteriormente.

El parámetro de red es modulado utilizando capas de GaInP dopadas con Sb para la graduación de su composición, denominadas CGB (*Compositionally Graded Buffers*), que se indican esquemáticamente con flechas azules en la figura 6. Estas capas permiten el crecimiento de los materiales metamórficos de interés con una baja densidad de dislocaciones.

Las juntas MM se conectan eléctricamente con juntas túnel formadas por GaAsSb dopado con C y GaInAs dopado con Se. En el trabajo de Geisz et al., 2020, así como también en una publicación previa de los mismos autores (Geisz et al., 2018), se presentan numerosos detalles acerca de la estrategia del crecimiento epitaxial y las propiedades de los materiales. Utilizando las técnicas de caracterización TEM (microscopía electrónica de transmisión) y cátodoluminiscencia muestran la baja concentración de dislocaciones en las juntas MM, asegurándose así la buena performance de las mismas. La complejidad de este dispositivo puede advertirse en la detallada estructura de capas publicada en la información suplementaria del artículo de Geisz et al., 2020. El proceso de crecimiento tiene una duración total de 7,5 horas, y la

temperatura durante el mismo varía entre 500 y 700 °C aproximadamente.

Como fuera mencionado anteriormente, el aumento del número de juntas en dispositivos que trabajan con concentración resulta favorable en la medida que reduce la densidad de corriente, y por lo tanto las pérdidas óhmicas. Sin embargo estas pérdidas, debido al valor finito de la resistencia serie, son las que limitan en la práctica la eficiencia al utilizar mayores niveles de concentración. Entre los problemas encarados en el artículo de Geisz et al., 2020, hay dos directamente relacionados con este punto.

Uno de estos problemas es la baja movilidad electrónica del material de alto *gap* $\text{Al}_{0,18}\text{Ga}_{0,33}\text{In}_{0,49}\text{P}$ utilizado en la subcelda superior, problema que se encuentra asociado a la incorporación de Al en este compuesto cuaternario. Este hecho influye en la resistencia de capa lateral entre los dedos de la grilla de contactos frontal donde la corriente es recolectada, contribuyendo así al aumento de la resistencia serie. La solución propuesta es reducir el contenido de Al desde el 18% en la base hasta un 6% en el emisor, dando lugar a la denominada *heterojuntura inversa*, en la cual el emisor está formado por un material de menor energía de *gap* que el de la base.

El otro problema mencionado en Geisz et al, 2020 es la difusión de Zn desde las capas fuertemente dopadas durante el largo proceso de crecimiento a alta temperatura, creando barreras de potencial internas de alta resistividad (Schulte et al., 2019). Este problema se produce particularmente entre el BSF de la cuarta junta y la siguiente junta túnel, y el mismo fue mitigado utilizando una barrera de difusión optimizada de $(\text{AlGa})_{0,84}\text{In}_{0,16}\text{As}$ (Geisz et al, 2020).

4. DISCUSIÓN

En el presente artículo hemos revisado el progreso, histórico y reciente, del desarrollo de las celdas solares multijuntura basadas en semiconductores III-V, la opción tecnológica de más alta eficiencia de conversión entre todas las disponibles. A lo largo de los años ha habido una notable evolución en esta opción, que en los últimos tiempos fue caracterizada por nuevos materiales, arquitecturas, y procesos diseñados para superar las limitaciones prácticas de los tradicionales materiales ajustados en el parámetro de red.

Observamos en este sentido una suerte de competencia entre dos opciones, cada una con ventajas y desventajas. Una está basada en la unión de dos estructuras formadas por materiales LM, mientras que la otra está basada en una estructura monolítica obtenida a partir del crecimiento de materiales metamórficos en forma inversa. La primera tiene la ventaja de que utiliza procesos de crecimiento relativamente simples para obtener materiales de buena calidad electrónica, pero utiliza tres procesos, dos crecimientos epitaxiales y otro para la unión de las estructuras, así como sustratos costosos, mientras que la segunda involucra un solo proceso de crecimiento, pero muy largo y con numerosos desafíos para la obtención de materiales de buena performance.

Para evaluar la factibilidad de una aplicación industrial de estas opciones de muy alta eficiencia de conversión es necesario hacer un cálculo económico muy fino, así como estimar la factibilidad de escalarlas de manera eficiente.

Las multijuntas III-V son un producto industrial desde hace 20 años, cubriendo esencialmente el mercado fotovoltaico

espacial. Este mercado ha incluido recientemente un dispositivo IMM, de 32% de eficiencia a un sol AM0 (SolAero, 2020). Esta celda solar supera a todos los productos anteriores basados en materiales LM, con la ventaja de tener una mejor performance tanto en el peso por W como en la resistencia a la radiación, aspectos muy importantes en aplicaciones espaciales. También existen productos comerciales disponibles para aplicaciones terrestres con concentración (Azur, 2020; Spectrolab, 2020).

Por otra parte, CPV es una tecnología que hace uso de multijuntas III-V, aunque hasta el momento su penetración en el mercado terrestre ha sido dificultosa. El informe de Wieserfarth et al., 2017, que no fuera actualizado luego de esta fecha, establece una capacidad instalada a nivel global de 370 MW, todavía un valor marginal entre las tecnologías fotovoltaicas ya establecidas en el mercado terrestre. Entre otras causas que explican esta realidad, podemos consignar su relativamente reciente entrada en el mercado (alrededor de 2005), con la consecuente falta de historia y datos concretos en campo acerca de la confiabilidad de los sistemas, así como la continua caída en el precio de la tecnología basada en el Si cristalino. Como consecuencia, la tecnología CPV no puede escalar, y sus componentes industriales se encuentran escasamente estandarizados.

A pesar de esta situación, el desarrollo de nuevos procesos de crecimiento más eficientes como D-HVPE (*Dynamic Hydride Vapor Phase Epitaxy*) y el enorme potencial de los dispositivos de muy alta eficiencia de conversión mantienen la expectativa de que CPV encuentre su oportunidad.

5. CONCLUSIONES

Está ampliamente aceptado que la tecnología solar fotovoltaica tendrá un rol central en la transición hacia un futuro escenario de un 100% de energías limpias. Su amplia disponibilidad, su carácter modular, y su costo marginal de operación y mantenimiento están entre las características más atractivas de esta tecnología.

El costo de generación de la energía solar fotovoltaica ya es competitivo en numerosos mercados en todo el mundo respecto a las fuentes convencionales. Se espera que esta tendencia se mantenga, dada la drástica caída de los precios de los componentes que se viene dando año tras año.

Los desafíos a encarar para llegar en el futuro a la escala del TW serán la disponibilidad de materiales, que requerirá por lo tanto una agresiva política de reciclado, y el desarrollo de más y mejores opciones de acumulación para compensar el carácter intermitente de la generación fotovoltaica.

En la actualidad, la tecnología basada en el Si cristalino es madura, confiable, y tiene una industria consolidada para escalar aún más. Entre las tecnologías emergentes identificamos a la basada en materiales semiconductores III-V como una de las más prometedoras, con productos comerciales y consolidada en el mercado espacial. Esta tecnología posee la más alta eficiencia de conversión, pero también el más alto costo de producción. En este sentido, su aplicación en el mercado terrestre está restringida a utilizar óptica de concentración de la radiación solar y mecanismos de seguimiento del sol, aumentando así la eficiencia de conversión a la vez que minimiza el costo del dispositivo en el sistema.

En ciertos nichos, como las regiones con alta disponibilidad de radiación solar directa, compite razonablemente con la tecnología basada en el Si cristalino, con la ventaja adicional de ocupar una superficie menor.

Entre sus desafíos futuros se encuentran la implementación a nivel industrial de alguno de los conceptos más recientes de muy alta eficiencia y la reducción de los costos de fabricación.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por la CNEA, la CONAE, la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica a través del proyecto PICT2013 N° 3077, y el CONICET a través del proyecto PIP 2012-2014 N° 1052.

REFERENCIAS

- Azur (2020). AZUR SPACE Solar Power GmbH, SPACE Solar Cells. Recuperado de:
<http://www.azurspace.com/index.php/en/products/products-space/space-solar-cells>
- Bertness, K.A., Kurtz, S.R., Friedman, D.J., Kibbler, A.E., Kramer, C., Olson, J.M. (1994a). 29.5%-efficient GaInP/GaAs tandem solar cells. *Applied Physics Letters* **65**, 989–991.
- Bertness, K.A., Kurtz, S.R., Friedman, D.J., Kibbler, A.E., Kramer, C., Olson, J.M. (1994b). High-efficiency GaInP/GaAs tandem solar cells for space and terrestrial applications. En *Proceedings of the 24th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Waikoloa, EE.UU.*, pp. 1671–1678.
- Bett, A.W. et al. (2013). Overview about technology perspectives for high efficiency solar cells for space and terrestrial applications. En *Proceedings of the 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, París, Francia*, pp. 1–6.
- Bhusari, D., et al. (2011). Direct Semiconductor Bonding Technology (SBT) for high efficiency III-V multi-junction solar cells. En *Proceedings of the 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Seattle, EE.UU.*, pp. 1937–1940.
- Cavicchi, B.T., Lillington, D.R., Garlick, G.F.J., Glenn, G.S., Tobin, S.P. (1988). GaAs on Ge cell and panel technology for advanced space flight application. En *Proceedings of the 20th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Las Vegas, EE.UU.*, pp. 918-923.
- CESI (2020). CESI S.p.A., Space Solar Cells. Recuperado de:
<https://www.cesi.it/space-solar-cells/>
- Chang, K.I., Yeh, Y.C., Iles, P.A., Tracy, J.M., Morris, R.K. (1987). Heterostructures GaAs/Ge solar cells. En *Proceedings of the 19th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, New Orleans, EE.UU.*, pp. 273–279.
- Chiang, P.K., Krut, D.D., Cavicchi, B.T., Bertness, K.A., Kurtz, S.R., Olson, J.M. (1994). Large area GaInP₂/GaAs/Ge multijunction solar cells for space applications. En *Proceedings of the 24th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Waikoloa, EE.UU.*, pp. 2120–2123.
- Chiang, P.K. et al. (1996). Experimental results of GaInP₂/GaAs/Ge triple junction cell development for space power systems. En *Proceedings of the 25th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington, EE.UU.*, pp. 183–186.
- Chiu, P.T., et al. (2014). Direct semiconductor bonded 5J cell for space and terrestrial applications. *IEEE Journal of Photovoltaics* **4**, 493–497.
- Dimroth, F., Baur, C., Bett, A.W., Meusel, M., Strobl, G. (2005). 3-6 Junction photovoltaic cells for space and terrestrial concentrator applications. En *Proceedings of the 31st IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Lake Buena Vista, EE.UU.*, pp. 525–529.
- Dimroth, F., et al. (2014). Wafer bonded four-junction GaInP/GaAs/GaInAsP/GaInAs concentrator solar cells with 44.7% efficiency. *Progress in Photovoltaics, Research and Applications* **22**, 277–282.
- Dimroth F., et al. (2016). Four-junction wafer-bonded concentrator solar cells. *IEEE Journal of Photovoltaics* **6**, 343–349.
- France, R.M. et al. (2015). Design flexibility of ultra-high efficiency 4-junction inverted metamorphic solar cells. En *Proceedings of the 42nd IEEE Photovoltaic Specialist Conference, New Orleans, EE.UU.*, pp. 1–3.
- Friedman, D.J., Olson, J.M., Kurtz, S. (2011). High-efficiency III–V Multijunction Solar Cells. En *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, 2nd ed.*, edited by A. Luque and S. Hegedus, John Wiley & Sons, capítulo 8, pp. 314–364.
- García, J., Socolovsky, H., Plá, J. (2017). On the spectral response measurement of multijunction solar cells. *Measurement Science and Technology* **28**, 055203 (10pp).
- Geisz, J.F. et al. (2007). High-efficiency GaInP/GaAs/InGaAs triple-junction solar cells grown inverted with a metamorphic bottom junction. *Applied Physics Letters* **91**, 3–5.
- Geisz, J.F. et al. (2008). 40.8% Efficient Inverted Triple-Junction Solar Cell With Two Independently Metamorphic Junctions. *Applied Physics Letters* **93**, 8–10.
- Geisz, J.F. et al. (2018). Building a Six-Junction Inverted Metamorphic Concentrator Solar Cell. *IEEE Journal of Photovoltaics* **8**, pp. 626–632.
- Geisz, J.F. et al. (2020). Six-junction III–V solar cells with 47.1% conversion efficiency under 143 Suns concentration. *Nature Energy* **5**, 326–335.
- Gillanders, M.S. et al. (1992). Production and qualification status of GaAs/Ge top/bottom contact solar cells. En *Proceedings of the 22nd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Las Vegas, EE.UU.*, pp. 1469–1473.
- Guter, W. et al. (2009). Current-matched triple-junction solar cell reaching 41.1% conversion efficiency under concentrated sunlight. *Applied Physics Letters* **94**, 94–96.
- Green, M.A. (2019). How Did Solar Cells Get So Cheap? *Joule* **3**, pp. 631–633.
- Green, M.A., Dunlop, E.D., Hohl-Ebinger, J., Yoshita, M., Kopidakis, N., Ho-Baillie, A.W.Y. (2020). Solar cell efficiency tables (Version 55). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* **28**, 3–15.
- Haegel, N.M., et al. (2019). Terawatt-scale photovoltaics: Transform global energy. Improving costs and scale reflect looming opportunities. *Science* **364**, pp. 836–838.
- Huggins, C.R., Cross, T.A., Hardingham, C.M. (1992). Ultrathin GaAs solar cells using germanium substrates. En *Proceedings of the 22nd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Las Vegas, EE.UU.*, pp. 318–322.
- ISE (2020). Photovoltaics Report. Informe generado por ISE, Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, junio de 2020. Recuperado de:
<https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf>

- Kavлак, G., McNERney, J., Trancik, J.E. (2018). Evaluating the causes of cost reduction in photovoltaic modules. *Energy Policy* **123**, pp. 700–710.
- King, D.L., Hansen, B.R., Moore, J.M., Aiken, D.J. (2000). New methods for measuring performance of monolithic multi-junction solar cells. En *Proceedings of the 28th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Anchorage, EE.UU.*, pp. 1197-1200.
- King, R.R., Fetzer, C.M., Law, D.C., Edmondson, K.M., Yoon, H., Kinsey, G.S., Krut, D.D., Ermer, J.H., Hebert, P., Cavicchi, B.T., Karam, N.H. (2006). Advanced III-V Multijunction Cells for Space. En *Proceedings of the 4th World Conference Photovoltaic Solar Energy Conversion, Waikoloa, Hawaii, EE.UU.*, pp.1757-1762.
- King, R.R. et al. (2009). Band-Gap-Engineered Architectures for High-Efficiency Multijunction Concentrator Solar Cells. En *Proceedings of the 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Hamburgo, Alemania*, pp. 1–7.
- Kroll, W.J., Thompson, A.G., Armour, E., Stall, R.A., Brennan, T., Hou, H. (1998). MOCVD technology for advanced space solar cell production. En *Proceedings of the 2nd World Conference on Photovoltaic Solar Energy Conversion, Viena, Austria*, pp. 3753-3756.
- Martí, A., Araújo, G.L. (1996). Limiting efficiencies for photovoltaic energy conversion in multigap systems. *Solar Energy Materials and Solar Cells* **43**, 203–222.
- NREL (2020). Best Research-Cell Efficiency Chart. [Online]. Disponible en: <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>
- Olson, J.M., Kurtz, S.R., Kibbler, A.E., Faine, P. (1990). A 27.3% efficient Ga_{0.5}In_{0.5}P/GaAs tandem solar cell. *Applied Physics Letters* **56**, 623–625.
- Osterwald, C.R. y Siefer, G. (2016). CPV Multijunction Solar Cell Characterization. En *Handbook of concentrator photovoltaic technology, edited by C. Algora and Ignacio Rey-Stolle, John Wiley & Sons*, capítulo 10, pp. 589–614.
- Plá, J. (2007). Influencia de nuevas tecnologías en celdas solares en el costo de un sistema fotovoltaico para aplicaciones espaciales. *Energías Renovables y Medio Ambiente* **20**, 45-50.
- REN21 (2013). Renewables 2013 - Global Status Report. Informe generado por REN21 – Renewable Energy Policy Network for the 21st Century. Recuperado de: <https://www.ren21.net/reports/global-status-report/>
- REN21 (2020). Renewables 2020 - Global Status Report. Informe generado por REN21 – Renewable Energy Policy Network for the 21st Century. Recuperado de: <https://www.ren21.net/reports/global-status-report/>
- Sabnis, V., Yuen, H., Wiemer, M. (2012). High-efficiency multijunction solar cells employing dilute nitrides. *AIP Conference Proceedings* **1477**, 14–19.
- Schulte, K.L., Steiner, M.A., Young, M.R., Geisz, J.F. (2019). Internal resistive barriers related to zinc diffusion during the growth of inverted metamorphic multijunction solar cells. *IEEE Journal of Photovoltaics* **9**, pp. 167–173.
- SolAero (2020). Space solar cells / Coverglass interconnected cells (CIC). Recuperado de: <https://solaerotech.com/products/space-solar-cells-cover-glass-interconnected-cells-cic/>
- Spectrolab (2020). Cells & CICs. Recuperado de: <https://www.spectrolab.com/photovoltaics.html>
- Stan, M. et al. (2010). High-efficiency quadruple junction solar cells using OMVPE with inverted metamorphic device structures. *Journal of Crystal Growth* **312**, 1370–1374.
- Stan, M., Aiken, D., Clevenger, B., Cornfeld, A., Doman, J., Downard, E., Hills, J., Hoffman, R., Johnston, G., Newman, F., Pappan, J., Sandoval, A. Sharps, P. Wood Jr., J. (2006). En *Proceedings of the 4th World Conference Photovoltaic Solar Energy Conversion, Waikoloa, Hawaii, EE.UU.*, pp. 1865-1868.
- Stringfellow, G.B. (1982). Epitaxy. *Reports on Progress in Physics* **45**, 469-525.
- Tobin, S.P., Vernon, S.M., Bajgar, C., Haven, V.E., Geoffroy, L.M., Lillington, D.R. (1988). High-efficiency GaAs/Ge monolithic tandem solar cells. *IEEE Electron Device Letters* **9**, 256-258.
- Wiesenfarth, M., Philipps, S.P., Bett, A.W., Kurtz, S.R. (2017). Current Status of Concentrator Photovoltaic (CPV) Technology. *Fraunhofer ISE*, abril de 2017. Recuperado de: <https://www.ise.fraunhofer.de/en/publications/studies/studie-current-status-of-concentrator-photovoltaic-cpv-technology.html>
- Yamaguchi, M. y Luque, A. (2013). Outline of Europe-Japan collaborative research on concentrator photovoltaics. En *Proceedings of the 39th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Tampa, EE.UU.*, pp. 1662–1665.