Desarrollo de celdas solares basadas en semiconductores III-V para aplicaciones espaciales

M. Alurralde
M. Barrera
S. Saint-André
P. Giudici
A. Torres
A.C. Reybet
M.D. Pérez
J. Plá

Departamento Energía Solar
Gerencia Investigación y Aplicaciones – CAC-CNEA
Instituto de Nanociencia y Nanotecnología
Unidad Ejecutora mixta CNEA-CONICET
E-mail: jpla@tandar.cnea.gov.a

RESUMEN

El Departamento Energía Solar (DES) de la CNEA desarrolla, desde 2001, tecnología fotovoltaica para aplicaciones espaciales a través de contratos de asistencia tecnológica (CAT) con distintos organismos y empresas, como ser CONAE, INVAP, y Satellogic. En este marco, se lleva adelante un proyecto PDTS con el fin de desarrollar celdas solares para estas aplicaciones, siendo las mismas el principal componente de los paneles solares que generan la potencia eléctrica en los satélites artificiales. Se presentan en este artículo los avances realizados hasta el momento, así como las perspectivas del desarrollo de dispositivos en el corto y mediano plazo.

ABSTRACT

The Solar Energy Department (DES) of the CNEA develops, from 2001, photovoltaic technology for space applications through technologic assistance contracts (CAT) with different actors, as the government agency CONAE, the state-owned company INVAP, and the private company Satellogic. In this frame, a PDTS project is carried on in order to develop solar cells for these applications, being these devices the main component of the solar panels that generate the electric power in artificial satellites. In this article, advances performed so far are presented, as well as the outlook at short and medium terms of device development.

PALABRAS CLAVE

Celdas Solares, Aplicaciones Espaciales, Semiconductores III-V.

INTRODUCCIÓN

Desde 2001 el Departamento Energía Solar (DES) de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) lleva adelante proyectos de desarrollo vinculados a tecnología fotovoltaica para aplicaciones espaciales, principalmente a partir de la demanda de la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE), donde el DES participó y participa en el diseño, simulación, y el desarrollo de técnicas de integración y ensayo de los paneles solares de potencia para las misiones satelitales SAC-D y SAOCOM 1A y 1B [1]. Debido a su alta eficiencia de conversión y mayor resistencia al daño por radiación, en una aplicación de escasa área disponible, donde el peso debe ser estrictamente optimizado, y en presencia de un ambiente hostil como el espacial, en la actualidad la opción excluyente de las celdas solares que componen los paneles de los satélites son las multijunturas basadas en semiconductores III-V [2]. El Proyecto de Desarrollo Tecnológico y Social (PDTS), cuyos avances se presentan en este artículo, fue acreditado por el MINCyT (*ex* Ministerio de Ciencia, Tecnología, e Innovación Productiva) en mayo de 2017 con el código PCTI-253, y se propone trabajar en el desarrollo local de dispositivos para aplicaciones espaciales que eventualmente se puedan utilizar en futuras misiones argentinas.

Hasta el presente, las celdas solares utilizadas en todas las misiones argentinas son adquiridas en el exterior, aún cuando la integración del panel sea nacional. Gracias a la reciente adquisición por parte de CNEA del equipamiento adecuado para el crecimiento epitaxial de semiconductores III-V, se cuenta con una oportunidad única para comenzar el desarrollo de las celdas solares en Argentina, de modo que se abre la posibilidad de sustituir importaciones y maximizar la componente nacional en los satélites argentinos.

El objetivo principal del proyecto es la fabricación y ensayo de prototipos de celdas solares de GaAs de alta eficiencia para aplicaciones espaciales. Asimismo, como parte del desarrollo, se fabricarán y ensayarán dispositivos multijuntura basados en crecimientos epitaxiales de terceros.

A tal fin, como procesos a generar, se pondrán a punto técnicas de crecimiento epitaxial de los semiconductores, se realizarán ensayos de caracterización de los crecimientos para evaluar su calidad, se implementarán los procesos de fabricación del dispositivo (particularmente la deposición de contactos y multicapas dieléctricas antirreflectantes), se caracterizarán los dispositivos fabricados tanto eléctrica como electrónicamente, y se realizarán ensayos de resistencia a la radiación y de termovacío.

Participan como instituciones adoptantes del proyecto la CONAE y la CNEA, mientras que las instituciones ejecutoras son la CNEA y el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

La relevancia socioeconómica de las áreas vinculadas con el Plan Espacial Nacional, en el cual se enmarca este proyecto, junto con el elevado costo de las misiones satelitales asociadas al mismo, justifican plenamente la necesidad de contar en el país con los recursos capaces de diseñar, fabricar, evaluar y ensayar sistemas y componentes nacionales altamente confiables.

Asimismo, el desarrollo propuesto permitirá la introducción de alta tecnología hasta el momento inexistente en el país, propiciando la formación de recursos humanos especializados y un producto de alto valor agregado potencial.

ANTECEDENTES

En el DES se viene trabajando en los últimos años en temas relacionados con el objetivo del PDTS. En particular, se realizaron actividades de caracterización eléctrica y electrónica como la medición en condiciones normalizadas de la característica I-V y de la respuesta espectral en dispositivos multijuntura [1], [3], [4], la simulación numérica de los mismos [5], [6], la realización de ensayos de daño por radiación y el análisis de sus resultados [1], [7].

Asimismo, más recientemente se desarrollaron técnicas de caracterización

del daño por radiación en materiales semiconductores III-V mediante técnicas ópticas [8], y la espectroscopía DLTS (*Deep Level Transient Spectroscopy*) para la caracterización de defectos electrónicos [9], aunque hasta ahora solo fue aplicada a junturas de Si cristalino.

AVANCES

Montaje del laboratorio de crecimiento epitaxial

El laboratorio de crecimiento epitaxial tiene ya ubicado en su posición final un reactor químico de fase vapor MOCVD (*Metal-OrganicChemical Vapor Deposition*) recientemente adquirido marca AIXTRON, con capacidad para hasta tres obleas de 2". Este reactor permite el depósito de estructuras planas de películas delgadas basadas en compuestos semiconductores III-V, típicos materiales utilizados en dispositivos opto-electrónicos. El laboratorio está en proceso final de instalación: se adaptó el local para albergar el reactor (ver Figura 1), se renovó el sistema de inyección y extracción de aire, se adquirió un sistema de enfriamiento de agua necesario para la operación del reactor, y se instalaron las líneas de gases especiales. Se dio especial importancia a la seguridad del laboratorio, para lo que se adquirió equipamiento específico (sensores de gases tóxicos y explosivos, extracción de gases, etc.) cuya interconexión se diseñó mediante una central de monitoreo, de modo tal de proteger los procesos y a los operadores.

Se adquirió equipamiento complementario como ser una campana de extracción y un droguero. Una vez terminadas las instalaciones, el proceso de puesta en marcha del reactor se llevará a cabo coordinadamente y en conjunto con personal especializado de la empresa AIXTRON. Esta etapa final tendrá lugar una vez que todos los sistemas accesorios estén instalados.

Figura 1: Reactor MOCVD montado en el laboratorio de crecimiento epitaxial.

El sistema de tratamiento de gases tóxicos (*scrubber*) está siendo desarrollado en el ámbito de la CNEA. El mismo está basado en un lecho sólido poroso de adsorción/quimisorción cuyo objetivo es disminuir las concentraciones de los flujos de salida de gases al exterior a valores menores a los valores umbrales límite permitidos. Contempla a su vez un sistema de seguridad y control que abarca los sensores de gases tóxicos, de presión y temperatura, así como un proceso de oxidación para la inertización del lecho contaminado.

Montaje del laboratorio de caracterización

El laboratorio de caracterización, remodelado en paralelo con el laboratorio de crecimiento epitaxial, cuenta con una serie de equipos entre los que se encuentra un banco para mediciones ópticas, un simulador solar con adquisición de datos para la medición de características I-V, un montaje para la medición de respuesta espectral, y la implementación de la técnica DLTS. Para la caracterización de los crecimientos epitaxiales se adquirió un microscopio Normaski, se desarrolló el setup de efecto Hall y se aplicaron las técnicas de fotolumiscencia (PL), espectroscopia Raman, y difracción de rayos X a la caracterización de películas delgadas de semiconductores III-V.

DESARROLLO DE CAPAS ANTIRREFLECTANTES

Se realizó un estudio sobre películas antirreflectantes (AR) sobre distintos sustratos semiconductores con la finalidad

de su implementación en celdas solares, y en particular las basadas en semiconductores III-V.

Con el fin de simular las características ópticas de los dispositivos, se desarrollaron rutinas que permiten calcular las características ópticas. Se utilizó el paquete TMM (*Transfer Matrix Method*) [10] que implementa el método de matrices de transferencia en Python [11]. Asimismo, se implementó el modelo de Bruggeman [12] para incluir capas porosas.

El programa requiere los índices de refracción complejos (n, k) de los materiales, que pueden tomarse de la bibliografía u obtenerse experimentalmente.

El software permite tanto calcular la reflectividad teórica de una multicapa sobre un sustrato, como la corriente de cortocircuito (J_{cc}) esperable en una celda solar con este AR. El método de optimización consiste en maximizar la Jcc teniendo en cuenta la expresión

$$J_c = q\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F(\lambda)T(\lambda)Q(\lambda)\,d\lambda \qquad (1)$$

donde q es la carga del electrón, $F(\lambda)$ es el espectro solar, $T(\lambda)$ la transmitancia de la capa AR y $Q(\lambda)$ la eficiencia cuántica interna del dispositivo. La integral se extiende entre los límites de longitud de onda λ donde la respuesta del dispositivo dada por $Q(\lambda)$ es distinta de 0.

Se optimizó numéricamente una película AR de nanotubos de TiO_2 sobre una celda solar de GaAs. La película se modeló efectivamente como una capa de TiO2 poroso sobre una de TiO2 denso, mientras que la celda se incluyó como una ventana de Al0.8Ga0.2As sobre un sustrato de GaAs. La estructura utilizada se muestra en la Figura 2.

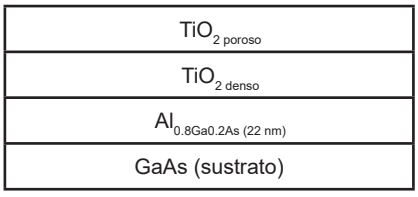

Figura 2: Esquema de la celda de GaAs con AR de nanotubos de TiO2.

Se tomó en cuenta el espectro solar AM1.5G, Como eficiencia cuántica se utilizaron los datos de una celda de GaAs de la literatura [7]. Los índices de refracción de la ventana de Al0.8Ga0.2As y del sustrato de GaAs se obtuvieron de las referencias [13] y [14] respectivamente.

Los datos correspondientes a los índices de refracción de la película de TiO2 fueron tomados de resultados experimentales. Para ello se fabricaron películas de nanotubos de TiO2 sobre Si mediante anodizado electroquímico siguiendo los pasos detallados en [15]. Los valores de los índices de refracción y de los espesores efectivos se obtuvieron a partir de mediciones realizadas con un elipsómetro Horiba AUTO-SE, ajustadas con el modelo de Cauchy transparente [16]. En este caso el espesor de la capa superior (porosa) fue de (29 ± 11) nm y el de la inferior (densa) de (70 ± 14) nm.

En la Figura 3 se observan los resultados de la optimización realizada para la estructura detallada en la Figura 2. Para cada combinación de espesores de la bicapa de TiO2 se calculó la Jcc según la ecuación (1), normalizada al valor $Jmax$ que se obtiene cuando $T(\lambda)$ es igual a 1 en todo el intervalo de integración. Los espesores óptimos se tendrán en cuenta al momento de fabricar celdas solares con AR de nanotubos de TiO2.

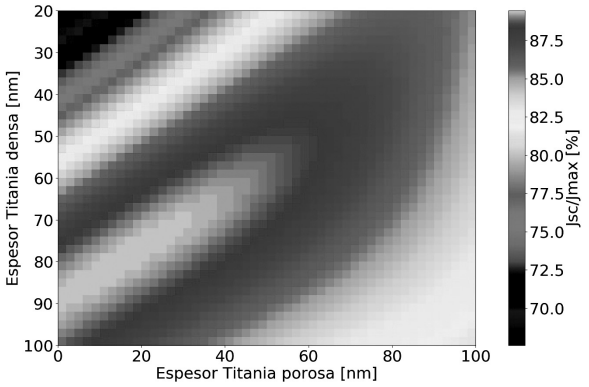

Figura 3: Resultados de la optimización AR realizada utilizando la estructura de la Figura 2.

Para el caso estudiado el máximo de Jcc se consigue para espesores de 14 nm y 79 nm para las capas porosa y densa respectivamente. Para poder llevar estos resultados

al caso experimental de fabricación del dispositivo, se puede considerar una tolerancia del 1 % en la disminución de la Jcc. De acuerdo a este criterio, los espesores óptimos tolerables entonces son los que se encuentran en la zona blanca de la Figura 3.

Actualmente se está trabajando en la implementación de películas AR sobre celdas solares III-V.

Ensayos de daño por radiación

Se avanzó en la automatización de la cámara de ensayos de la línea EDRA (Ensayos de Daño por Radiación y Ambiente). Dicha cámara, desarrollada en el DES, se encuentra acoplada a una de las líneas del acelerador de iones pesados TANDAR de la CNEA; más detalles de esta facilidad se pueden encontrar en [17].

Se llevó a cabo asimismo la irradiación con protones e iones de He, Li, y Be a determinadas energías de interés, en los aceleradores lineales de partículas ubicados en el CAB (Centro Atómico Bariloche) y el CAC (Centro Atómico Constituyentes), sobre muestras de InGaP/GaAs procedentes de una colaboración con la TU-Berlín (*Technical University of Berlin*). El material fue crecido epitaxialmente con orientación (001) e irradiado de canto, o sea, incidiendo el haz de costado, paralelamente al plano superior de las muestras (Figura 4); esto permite medir a lo largo de la superficie para determinar el rango de penetración de partículas y el perfil de daño generado.

El daño por radiación fue estudiado posteriormente aplicando las técnicas de fotoluminiscencia a temperatura ambiente y a baja temperatura, considerando las transiciones electrónicas radiativas entre bandas. Se utilizó también la técnica de espectroscopía Raman en configuración de retrodispersión, para analizar el comportamiento de modos vibracionales a lo largo del camino de los haces en las muestras; estas mediciones se realizaron tanto con luz no polarizada, como con luz polarizada, esta última teniendo en cuenta las correspondientes reglas de selección de Raman para el análisis de la simetría estructural de dicho material en las zonas implantadas con iones. Paralelamente se hicieron observaciones con TEM (*Transmission Electron Microscopy*) en las muestras luego de ser irradiadas.

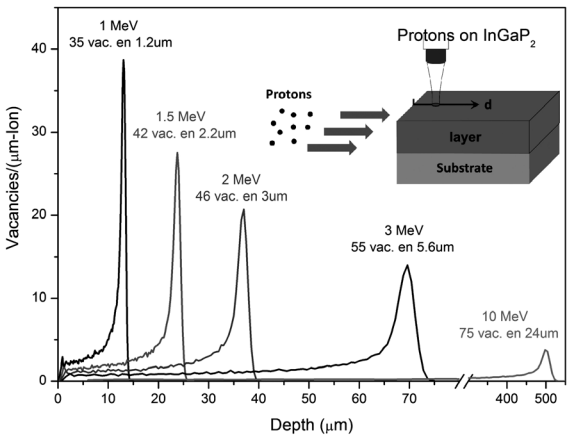

Figura 4: Simulaciones de la generación de vacancias por ion utilizando TRIM para varias energías del haz de protones incidente. En la inserción se puede advertir la configuración experimental utilizada en los ensayos de irradiación y caracterización.

De forma complementaria a las mediciones experimentales se realizaron simulaciones mediante el código TRIM (*Transport of Ions in Matter*) [18] (ver Figura 4). Este análisis exhaustivo ha permitido indagar acerca del comportamiento de estos materiales frente a la irradiación con partículas cargadas. Parte de los resultados obtenidos se encuentran publicados en [8] y [19].

PERSPECTIVAS

El objetivo de este proyecto, una vez puestos en operación los Laboratorios de Crecimiento Epitaxial y Caracterización, es obtener prototipos de celdas solares de alta eficiencia y calificadas para aplicaciones espaciales, desarrollando el proceso de fabricación de los mismos. En particular se aspira a optimizar la fabricación de una celda monojuntura de GaAs sobre la base de crecimientos epitaxiales propios. Para ello se planea, en una primera etapa, desarrollar el conocimiento de la epitaxía de fase vapor (MOCVD) conducente

al crecimiento de estructuras de semiconductores III-V de calidad electrónica compatible con dispositivos fotovoltaicos de alta eficiencia.

Complementariamente se desarrollarán los procesos conducentes a la obtención de un dispositivo completo, como ser el diseño y fabricación de contactos y películas antirreflectantes que a su vez se aplicarán, mientras no estén disponibles crecimientos propios, a crecimientos epitaxiales generados por terceros.

Se aplicarán asimismo les técnicas de caracterización de materiales y dispositivos, simulación numérica, y ensayo de irradiación ya desarrolladas y en desarrollo en el DES.

El objetivo final del proyecto es la obtención de prototipos calificados para aplicaciones espaciales de acuerdo a los estándares internacionales. En la medida de lo posible, estos prototipos serán probados en vuelo en futuras misiones satelitales de la CONAE, siendo el objetivo a largo plazo el reemplazo de componentes importados de alto costo en las misiones argentinas.

CONCLUSIONES

Se presentaron los antecedentes, avances y perspectivas del proyecto PDTS PCTI-253 para el desarrollo local de celdas solares de alta eficiencia para aplicaciones espaciales, proyecto que tiene como instituciones adoptantes a la CONAE y la CNEA.

Se espera que en el futuro el proyecto pueda hacer una contribución relevante con un producto de alto valor tecnológico, en la medida que cambien las actuales condiciones macroeconómicas del país así como el escaso financiamiento estatal de la actividad de I+D, y que particularmente permitan la continuidad del Plan Espacial Nacional.

AGRADECIMIENTOS

El proyecto recibe financiación de los proyectos CONICET-PIP2015-2017 01006, ANPCyT-PICT2015 1961, y ANPCyT-PICT2015 1615, así como del CAT CNEA-CONAE “Integración y ensayo de los modelos de vuelo de las misiones SAOCOM 1A y 1B”.

Saint-André S. es becario doctoral de la ANPCyT. Torres A. y Reybet A.C. son becarias doctorales del CONICET.

REFERENCIAS

[1] Alurralde, M. et al. (2013). Development of solar arrays for Argentine satellite missions. *Aerospace Science and Technology*, 26, 38-52.

[2] Bailey, S.; Raffaelle, R. (2011). Space solar cells and arrays. En A. Luque y S. Hegedus (editores), *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, 2nd edition*, 365-401. John Wiley & Sons, Chichester.

[3] Barrera, M.; García, J.; Socolovsky, H.; Rubinelli, F.; Godfrin, E.; Plá, J. (2008). Activities on simulation and characterization of multijunction solar cells for space applications in Argentina. En *Proceedings of the 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 781-784.

[4] García, J.; Socolovsky, H.; Plá, J. (2017). On the spectral response measurement of multijunction solar cells. *Measurement Science and Technology*, 28, 055203 (10pp).

[5] Plá, J.; Barrera, M.; Rubinelli, F. (2007). The influence of the InGaP window layer on the optical and electrical performance of GaAs solar cells. *Semiconductor Science and Technology*, 22, 1122–1130.

[6] Barrera, M.; Rubinelli, F.; Rey-Stolle, I.; Plá, J. (2012).Numerical simulation of Ge solar cells using D-AMPS-1D code. *Physica B*, 407, 3282–3284.

[7] Ochoa, M. et al. (2017). 10 MeV proton irradiation effects on GaInP/GaAs/Ge concentrator solar cells and their component subcells. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 159, 576–582.

[8] Yaccuzzi, E.; Khachadorian, S.; Suárez, S.; Reinoso, M.; Goñi, A.R.; Strittmatter, A.; Hoffmann, A.; Giudici, P. (2016). Investigation of proton damage in III-V semiconductors by optical spectroscopy. *Journal of Applied Physics*, 119, 235702 (5pp).

[9] García, J.; Alurralde, M.; Plá, J. (2017). First deep level transient spectroscopy measurements for radiation damage studies in Ar-

gentina. Presentado en el *International forum on advances in radiation physics* (FORUM-BA), Buenos Aires.
[10] Byrnes, S.J. (2016). Multilayer optical calculations, arXiv:1603.02720 [physics.comp-ph]
[11] Python Software Foundation, https://www.python.org
[12] Niklasson, G.A.; Granqvist, C.G.; Hunderi, O. (1981). Effective medium models for the optical properties of inhomogeneous materials. *Applied Optics*, 20, 26-30.
[13] Glembocki, O.J.; Takarabe, K. (1991). Aluminum Gallium Arsenide ($Al_{xGa1-xAs).}$ En E. Palik (editor), *Handbook of optical constants of solids II*, 513-558. Academic Press.
[14] Palik, E. (1985). Gallium Arsenide. En E. Palik (editor), *Handbook of optical constants of solids*, 429-444. Academic Press.
[15] Rodríguez, D.F.; Perillo, P.M.; Barrera, M. (2017). High performance TiO2 nanotubes antireflection coating. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 71, 427-432.
[16] Jenkins, F.A.; White, H.E. (1981). *Fundamentals of Optics, 4th edition*, McGraw-Hill, New York.
[17] Ibarra, M.L.; Garcia, J.A.; Dato, A.;Yaccuzzi, E.; Prario, I.; Filevich, A.; Barrera, M.; Alurralde, M. (2019). E.D.R.A., the Argentine facility to simulate radiation damage in space. *Radiation Physics and Chemistry*, 154, 79–84.
[18] Biersack, J.P.; Haggmark, L.G. (1980). A Monte Carlo computer program for the transport of energetic ions in amorphous targets. *Nuclear Instruments and Methods,* 174, 257-279.
[19] Yaccuzzi, E.; Di Liscia, E.; Reinoso, M.; Alurralde, M.; Plá, J.; Strittmatter, A.;Giudici, P. (2017). Radiation damage in III-V semiconductors for space applications. En *Extended Abstract - 29th International Conference on Defects in Semiconductors*, Matsue, Japón, MoA3-4.