

**RESPUESTA ESPECTRAL DE
CELDA SOLARES
MULTIJUNTURAS PARA
APLICACIONES ESPACIALES**

Fortin, Sebastian

(2005)

RESPUESTA ESPECTRAL DE CELDAS SOLARES MULTIJUNTURA PARA APLICACIONES ESPACIALES: DISEÑO DEL EQUIPO Y PRIMERAS MEDICIONES

Resumen: La Respuesta Espectral (RE) de una celda solar la caracteriza desde el punto de vista electrónico. En el caso de celdas solares multijuntura de estructura monolítica, cada subcelda está conectada en serie y no se tiene acceso a sus terminales eléctricos. Así es necesario modificar las componentes espectrales de la luz de polarización de manera tal que la subcelda cuya RE se quiere medir sea aquella que limite la corriente del conjunto. En este trabajo se muestra el desarrollo de una fuente de luz de polarización sobre la cual es posible modificar su espectro de modo tal de permitir la medición de cada subcelda en una celda de triple juntura de GaInP/GaAs/Ge. También se muestran las primeras mediciones, a partir de un arreglo experimental basado en filtros de interferencia ópticos de banda angosta y un amplificador lock-in concebido inicialmente para medir homojunturas de Si, de las subceldas de GaInP y GaAs así como una propuesta de extensión del intervalo de medición de modo de incluir la subcelda de Ge.

INTRODUCCIÓN

Parte de las actividades programadas en el desarrollo de paneles solares para misiones satelitales argentinas^{[3],[4],[5],[1]} está referida al estudio de celdas solares multijuntura y, en particular, a su caracterización eléctrica y electrónica. En este momento se encuentra en desarrollo un equipo para la medición de la respuesta espectral de celdas de triple juntura GaInP/GaAs/Ge de estructura monolítica. Los requerimientos de potencia y el área disponible determinaron que dichas celdas serán las utilizadas para la integración de los paneles de vuelo de las misiones satelitales SAOCOM y SAC-D de la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE).

Con anterioridad fue desarrollado en el Grupo Energía Solar (GES) de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) un equipo apto para la medición de la RE de celdas solares homojuntura de silicio cristalino con el cual se realizaron, por ejemplo, mediciones que fueron parte de la evaluación del daño por radiación sobre celdas de Silicio^{[10],[2]}. Este equipo está formado por dos fuentes luminosas, una para la radiación monocromática y otra para la luz de polarización, un conjunto de filtros ópticos de interferencia de banda angosta entre 340 y 1100 nm que definen la longitud de onda monocromática incidente sobre el dispositivo, un amplificador *lock-in* que permite medir la perturbación introducida por la radiación monocromática, un circuito externo que pone a la celda bajo estudio en condiciones de cortocircuito, y una base termostatazada que mantiene la temperatura de la celda a 25°C (condiciones normalizadas)^[8].

En las celdas solares multijuntura de estructura monolítica, cada subcelda está conectada en serie

y no se tiene acceso a sus terminales eléctricos. Para poder medir la RE de las subceldas que componen una celda multijuntura de estructura monolítica, es necesario introducir modificaciones en el equipo descrito en el párrafo anterior. A fin de seleccionar la subcelda a medir, se aprovecha la característica constitutiva de la multijuntura donde las subceldas están conectadas eléctricamente en serie entre sí, de manera tal que de acuerdo a las componentes espectrales de la iluminación incidente la subcelda que genera menos corriente será aquella que limite la corriente de cortocircuito del conjunto. Así la manera de seleccionar una subcelda dada es modificando el espectro de la luz de polarización de modo tal que dicha subcelda sea aquella que genere la menor fotocorriente^[7].

Una característica distintiva de una multijuntura GaInP/GaAs/Ge es el hecho de que su rango de respuesta se extiende hasta longitudes de onda de 1900nm debido a la respuesta de la subcelda de Ge. Por esta razón es necesario extender las longitudes de onda de la luz monocromática ya disponibles hasta dicho valor. Por otra parte, se debe disponer también de un fotodetector calibrado como referencia que cubra todo el intervalo de longitudes de onda de interés para permitir realizar mediciones de RE relativas y absolutas sin necesidad de tener conocimiento de las intensidades espectrales de la luz incidente.

Se presentan en este informe las modificaciones realizadas sobre la luz de polarización y las primeras mediciones de RE sobre dobles y triples junturas de GaInP/GaAs/Ge. En este último caso, hasta el momento, sólo es posible medir las dos primeras junturas (InGaP y GaAs), discutiéndose los próximos pasos que permitirán la medición de la subcelda de Ge.

Radiación Solar

Los dispositivos fotovoltaicos aprovechan la energía liberada en forma de radiación por el Sol convirtiéndola en energía eléctrica. El espectro de radiación emitido por el Sol es similar al de un cuerpo negro a 6000 K rodeado de un gas ionizado. Este gas tiene líneas de absorción características que introducen “pozos” en el espectro original. Esta es la radiación que se recibe del Sol fuera de la atmósfera terrestre y su intensidad que es esencialmente una constante que recibe el nombre de radiación *AMO* (*air mass zero*) y su valor es de $1,367 \text{ kW/m}^2$.

Celdas solares

Para entender el comportamiento de los semiconductores se desarrolló la teoría de bandas. Esta teoría, básicamente, reúne los niveles discretos de energía de un cristal en bandas. Los niveles de valencia pasan a conformar la banda de valencia y los primeros estados excitados conforman la banda de conducción. Estas dos bandas están separadas por un intervalo de energía denominado *band gap*. Ningún electrón puede encontrarse dentro de este intervalo, cuyo ancho corresponde precisamente a la energía mínima necesaria para que un electrón de la banda de valencia pase a la de conducción.

Por lo tanto, en un semiconductor como el silicio, por ejemplo, a bajas temperaturas todos los electrones se encuentran en la banda de valencia, pero si se aumenta la temperatura del material puede ocurrir que algún electrón obtenga la energía necesaria para entrar a la banda de conducción. Cuando un fotón incide sobre un semiconductor, puede ser absorbido dentro del material usando su energía para excitar un electrón y pasarlo a la banda de conducción. Cada electrón que abandona la banda de valencia deja un hueco, el cual puede ser considerado un portador de carga positiva dentro de esta banda. Por lo tanto, si el silicio carece de impurezas, por cada electrón en la banda de conducción hay un hueco en la banda de valencia. A este Silicio se lo llama intrínseco. Las impurezas conocidas con el nombre de dopantes se introducen en el semiconductor para controlar las concentraciones relativas de electrones y huecos en las bandas respectivas a estos semiconductores se los llama extrínsecos. Si a un semiconductor intrínseco, por ejemplo el silicio, se le añaden algunos átomos que tengan cinco electrones en su última capa, como el antimonio, al tener el silicio valencia 4 esos átomos tendrán un electrón no enlazado, el

cual puede moverse dentro del semiconductor aumentando su conductividad. Así se forma un semiconductor tipo N. Estos átomos de impureza se llaman donores, porque dan al semiconductor extrínseco electrones no enlazados. Si los átomos añadidos como impureza al semiconductor intrínseco contienen tres electrones en su última capa, como el indio, estos átomos tendrán falta de un electrón para hacer un enlace; se dice entonces que aparece un hueco. Así se forma un semiconductor tipo P. Estos átomos de impurezas se llaman aceptores, porque aceptan a través de los huecos el paso de electrones.

Una celda solar es básicamente la unión de un semiconductor tipo P con un semiconductor tipo N. Debido a la temperatura, algunos electrones pasan del N al P (difusión) recombinándose con los huecos de este último y dejando huecos en el N. Una zona delgada del semiconductor N queda cargada positivamente y la zona cercana a la unión en el P queda cargada negativamente (Figura 1). Al quedar la zona N próxima a la unión cargada positivamente, rechazará a los huecos de la zona P que de lo contrario tenderían a atravesar la unión. Exactamente igual, la zona P próxima a la unión impedirá el paso de los electrones provenientes de la zona N. Por lo tanto en la zona próxima a la unión aparece una diferencia de potencial llamada “tensión de difusión”. El campo eléctrico producido por esta juntura permitirá la colección de los portadores fotogenerados. A la zona de separación de los dos semiconductores se llama región de vaciamiento o de colección ya que cuando dentro de ella se genera un par hueco-electrón, el campo eléctrico los separa y los envía a las respectivas zonas P y N donde podrán ser colectados por terminales metálicos para inducir corriente en algún circuito.

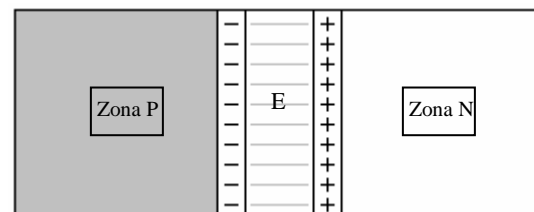


Figura 1. Creación de un campo eléctrico en la juntura.

Por otro lado la juntura P-N forma lo que se conoce como un diodo P-N. Si se le aplica a dicha unión una tensión exterior de signo contrario a la barrera de potencial interna, ésta irá disminuyendo en espesor. A mayor tensión aplicada

externamente corresponderá una barrera interna menor y se llegará a conseguir que dicha barrera desaparezca totalmente quedando el diodo conduciendo en polarización directa. Por el contrario si la tensión aplicada externamente al diodo es del mismo signo que la barrera de potencial interna se dice que el diodo está polarizado inversamente. El terminal positivo de la fuente atrae a los electrones del material N apartándolos de la unión, mientras que el negativo atrae a las cargas positivas del material P, apartándolos también de la unión. Se crea, por tanto, en la unión, una ausencia de carga, formándose una corriente que recibe el nombre de “corriente inversa de saturación” o “corriente de fuga” cuyo valor es prácticamente despreciable. La curva característica del diodo se construye graficando la corriente que circula por el diodo en función de la tensión que se aplica entre sus terminales, en la Figura 2 se muestra una típica curva característica para una juntura P-N iluminada y no iluminada.

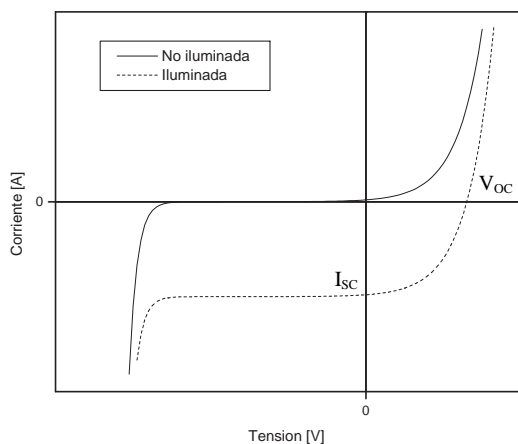


Figura 2. Curva característica para una juntura P-N iluminada y no iluminada.

Como puede observarse en la Figura 2 al iluminar la juntura, la corriente fotogenerada provoca que la curva característica se desplace. Los parámetros normalmente utilizados para la caracterización eléctrica de una celda son la corriente de cortocircuito I_{sc} (donde $V=0$) y la tensión de circuito abierto V_{oc} (donde $I=0$).

DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

Para la medición de la RE de celdas homojunturas son necesarios, básicamente, una luz

monocromática definida sobre un intervalo de longitudes de onda que incluya la respuesta de la celda, una luz de polarización, y un circuito eléctrico externo que ponga en condiciones de cortocircuito la celda. El procedimiento para la medición es el siguiente^[8]:

- Se hace incidir sobre la celda, con incidencia normal, un haz pulsado de luz monocromática. Simultáneamente, se ilumina la celda en la totalidad de su superficie, con un haz continuo de luz blanca (luz de polarización), de irradiancia aproximadamente igual a aquella que la celda recibe en sus condiciones normales de operación.
- El haz de polarización produce en la corriente de cortocircuito de la salida de la celda una componente de corriente continua (cc), mientras que el haz pulsado monocromático produce una componente de corriente alterna (ca). A medida que se varía la longitud de onda del haz monocromático, se registra la componente de corriente pulsada de la corriente de cortocircuito.
- La determinación de la respuesta espectral absoluta, requiere el conocimiento de la cantidad de energía contenida en el haz pulsado, por lo tanto debe medirse con un detector calibrado. De esta manera, la respuesta espectral absoluta puede calcularse a partir de la respuesta medida de la celda y la irradiancia de la fuente pulsada.

Para la medición de la RE de celdas multijunturas el procedimiento es análogo, pero la luz monocromática debe estar definida sobre un intervalo de longitudes de onda que incluya la respuesta de todas las subceldas, además el contenido espectral de la luz de polarización debe poder ser cambiado, y el circuito eléctrico externo debe poner en condiciones de cortocircuito la subcelda a medir.

Para la construcción del dispositivo se aprovechó la estructura preexistente diseñada para medir celdas homojuntura sobre el cual fue necesario modificar el subsistema que aporta la luz de polarización.

Debido a que aún no existe una norma para la medición de celdas multijuntura se tomó la norma de medición de celdas homojuntura^[8] como modelo para definir los requisitos de la luz de monocromática, la luz de polarización y demás condiciones. La luz monocromática se obtiene a partir de la interposición de filtros de interferencia óptica de banda angosta (típicamente 10nm) entre una fuente luminosa de espectro extendido y la celda a medir.

Luz monocromática

Como fuente luminosa se utiliza una lámpara de tungsteno de 250 W con ventilación forzada y filtros de interferencia cuadrados de 50,8mm de lado montados sobre una rueda de aluminio anodizado especialmente construida que permite seleccionar cada uno de los filtros. Previamente a su paso por los filtros, el haz de luz es acondicionado por un condensador formado por dos lentes plano-convexas de cuarzo de modo que pueda ser interceptado por el conmutador (*chopper*) del amplificador *lock-in*, la disposición puede observarse en la Figura 3.

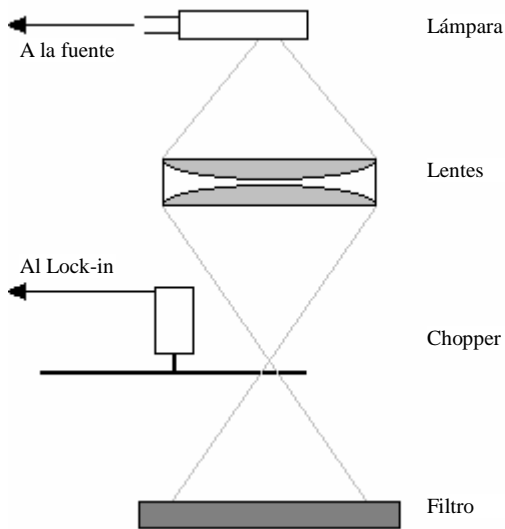


Figura 3. Disposición de la lámpara de tungsteno, las lentes, el chopper y el filtro.

La fuente de luz monocromática, el condensador, el conmutador y los filtros están montados sobre una columna en forma alineada, donde la distancia entre la fuente y el plano de medición es tal que asegura una homogeneidad de la intensidad de iluminación monocromática dentro de $\pm 2,5\%$ según lo requerido en la norma correspondiente^[8].

Como la distribución espectral de la lámpara no es homogénea, al interponer distintos filtros se obtienen como resultado haces monocromáticos de distintas intensidades. Por lo tanto, en la corriente generada por la celda tendrá más relevancia la intensidad del haz que la RE de la celda. De ahí la necesidad de usar un detector calibrado para medir la intensidad del haz monocromático y obtener la RE absoluta.

En el dispositivo original, pensado para medir celdas homojuntura, la luz de polarización está dada por tres lámparas dicróicas de 50W

montadas sobre un anillo a una altura y con una orientación apropiada para obtener la homogeneidad e intensidad acordes con las condiciones definidas en la norma^[8]. Dada la dificultad para producir modificaciones en el espectro de esta configuración, se reemplazaron por una única lámpara de 150W con ventilación forzada y un soporte especialmente diseñado para incluir hasta dos filtros de interferencia pasabanda con el fin de modificar su espectro de iluminación.

Soporte

Debido a que la homogeneidad de la lámpara no era muy buena (podían observarse a simple vista zonas de luz y de sombra) se decidió armar un soporte móvil para los filtros y la lámpara en una misma estructura, la cual permitiera orientar la lámpara en los seis grados de libertad. El mismo se construyó en aluminio y se lo pintó de negro para evitar reflejos que perjudiquen la medición. El portafiltros se diseñó de manera que permitiera el fácil reemplazo de los filtros. El mismo consiste en un bloque de 60x60x40mm con dos ranuras de 5x5mm forradas con felpa para evitar que los filtros se rallen al ser intercambiados, lo cual es una operación frecuente durante las mediciones. Un esquema del portafiltros puede observarse en la Figura 4.

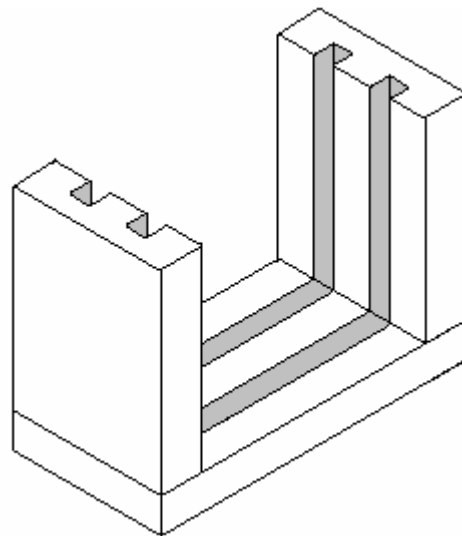


Figura 4. Vista del portafiltros.

El portálampara consiste en un conector constituido por dos piezas rectangulares de 24x11x6mm de bronce con dos cavidades cilíndricas donde encastran las patas de la lámpara que se fijan mediante tornillos laterales. El conector está montado sobre una placa aislante de

epoxi, la cual se fija a un soporte de aluminio que actúa a la vez de disipador. Para tener un control superior sobre la orientación de la lámpara se añadió al soporte un eje que permitiera girar la lámpara, el cual sería muy útil a la hora de buscar la homogeneidad requerida. Una vista general del portalámparas puede observarse en la Figura 5.

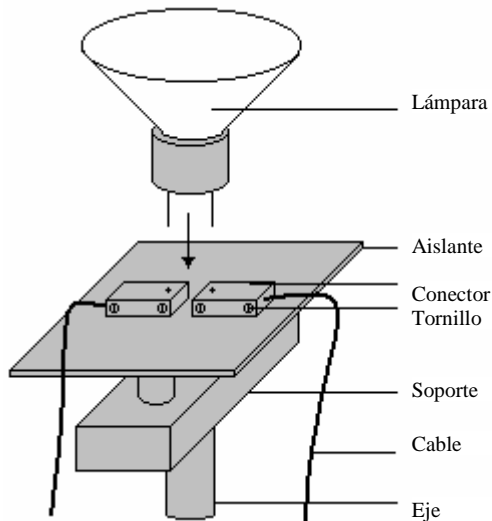


Figura 5. Esquema del portalámpara.

Como puede observarse en la Figura 6, el portalámpara y el portafiltros se fijaron sobre una estructura rígida que permitiera la ágil manipulación del conjunto.

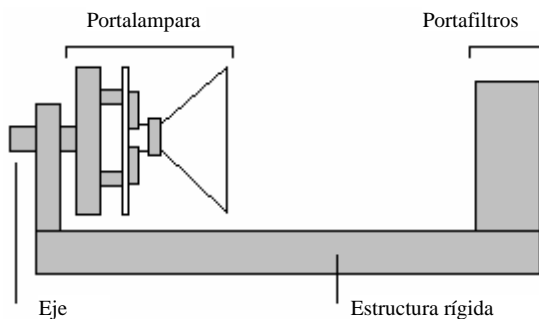


Figura 6. Diagrama de la estructura rígida sobre la que se monta el portafiltros y el portalámparas.

Detrás de la lámpara se colocó un ventilador cuadrado de 80x25mm y 2800rpm para refrigerar

la lámpara. La distancia entre la lámpara y los filtros, teniendo en cuenta que no puede ser pequeña porque los filtros se calentarían y se partirían, se fijó en 200mm. Esta distancia se determinó buscando la máxima posible sin que el portafiltros produjera sombra sobre el plano de prueba y según las pruebas realizadas con vidrios de espesor similar al filtro a esta distancia no hay peligro de rajadura.

La distancia al plano de prueba fue definida nuevamente en función de obtener una homogeneidad dentro de $\pm 10\%$ según la exige norma para la medición de celdas solares homojuntura^[8]. Los ventiladores, tanto para la luz monocromática como para la luz de polarización, fueron montados desde el punto de vista mecánico en forma independiente de la estructura principal. Se evita de esta forma la posible modulación de la señal a detectar por vibraciones de este origen. Cabe aclarar que la señal a medir, producida por la luz monocromática, es una perturbación sobre el valor continuo generado por la luz de polarización e implica la medición de tensiones hasta del orden del μV . En la fotografía de la Figura 7 puede observarse una vista general del dispositivo completo.

La alimentación de la lámpara de polarización puede realizarse con AC o CC, pero luego de la prueba correspondiente se eligió usar CC ya que de esta forma se introduce mucho menos ruido en la medición, lo cual representó un problema práctico. Debido a que la lámpara de polarización es de 21V y la de la luz monocromática de 24V, y sólo se disponía de una fuente de alimentación se decidió alimentar las dos lámparas con 21V. Esto provocó que la medición en las zonas donde la celda tiene baja RE se dificultara, pero no se volviera imposible. Por otro lado la corriente de las dos lámparas pone la fuente al límite de su capacidad, por lo que no pueden usarse por periodos prolongados de tiempo. Este es un inconveniente a ser solucionado en la siguiente etapa del proyecto.

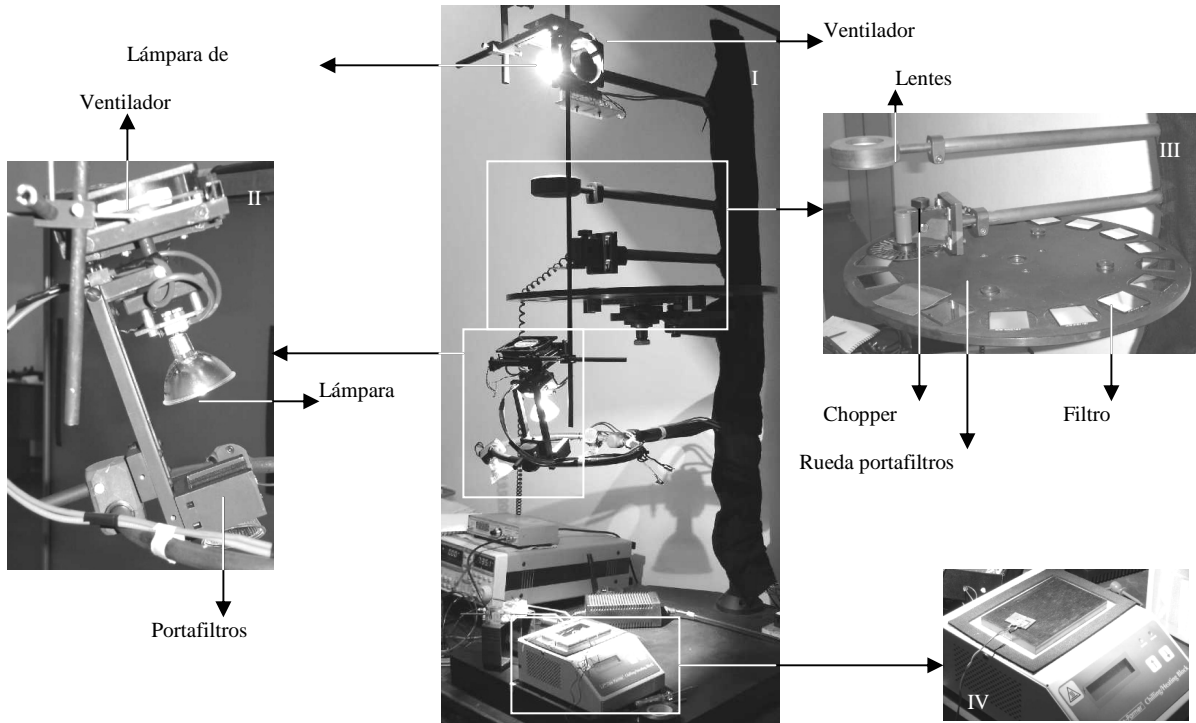


Figura 7. I. Vista general del dispositivo. II. Detalle de la lámpara de polarización y el portafiltros. III. Detalle del condensador y conmutador de filtros que proveen la luz monocromática. IV Detalle de la base que mantiene la celda a una temperatura estable de 25°C^[8].

Circuito eléctrico

Para poner la celda en condiciones de cortocircuito se utilizó el circuito eléctrico de la Figura 8.

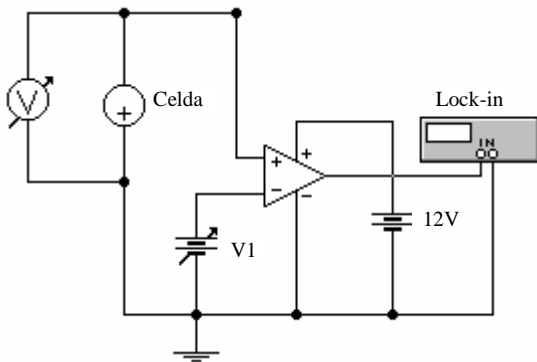


Figura 8. Circuito eléctrico que pone la celda en cortocircuito.

La tensión de la fuente V1 (en serie con la celda) se ajusta de manera que la caída de tensión en la celda sea nula. Para el ajuste se conecta el voltímetro V en paralelo con la celda. El amplificador, cuya resistencia interna está en serie con la celda entrega a su salida una tensión proporcional a la corriente que circula por el

circuito y se mide con un amplificador *lock-in* ya que durante la medición se registran valores en un rango que incluye varios órdenes de magnitud (9μV-30mV).

Selección de la celda a medir

Dado un espectro de iluminación $S(\lambda)$, la corriente fotogenerada por la subcelda i será igual a la integral de la RE de dicha subcelda $RE^i(\lambda)$ multiplicada por la mencionada distribución espectral, de acuerdo a la expresión (1)

$$J_{sc}^i = \int RE^i(\lambda)S(\lambda)d\lambda \quad (1)$$

donde la integral se extiende entre los límites entre los cuales las cantidades $RE^i(\lambda)$ y $S(\lambda)$ sean no nulas.

El espectro de iluminación de la luz de polarización puede ser modificado mediante la interposición de filtros pasabanda, de modo tal que si $T(\lambda)$ es la transmitancia espectral de dicho filtro, el espectro modificado será $S_m(\lambda) = S(\lambda) \times T(\lambda)$. Se dispone de un juego de filtros pasabanda (pasaltos y pasabajos) con frecuencias de corte

entre 400nm y 750nm. La transmitancia de los filtros pasabanda fue medida utilizando un espectrofotómetro Shimadzu UV-Vis-IR. Teniendo en cuenta estas consideraciones, es posible calcular la corriente fotogenerada por cada subcelda conociendo el espectro de la luz de polarización, su RE y la transmitancia de los filtros a interponer. La $RE^i(\lambda)$ es justamente la cantidad a medir pero, dado que lo que se busca es una estimación de las corrientes fotogeneradas para encontrar una condición general a aplicar en las mediciones, es posible utilizar datos típicos extraídos de la literatura para realizar los cálculos.

En la Figura 9 pueden verse las RE correspondientes a una celda de triple juntura GaInP/GaAs/Ge^[6]. Estas celdas están diseñadas de modo tal que la corriente está limitada por la subcelda de InGaP para el espectro espacial AM0^[9]. Esto se debe a que la subcelda de GaAs es más susceptible al daño por radiación, definiéndose entonces un espesor menor para la celda de InGaP para que al final de la vida útil determinada por el daño por radiación ambas subceldas generen la misma fotocorriente.

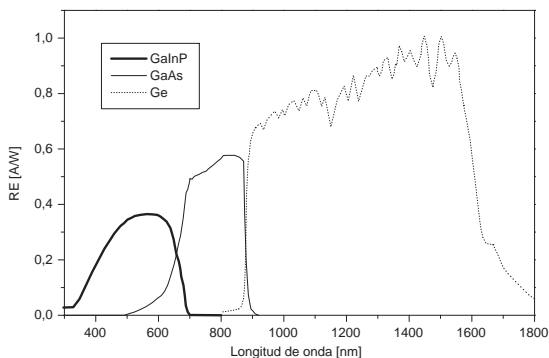


Figura 9. RE de una celda triple juntura GaInP-GaAs-Ge obtenida de la literatura^[6]. La tabla fue recuperada con técnicas de tratamiento grafico.

A fin de calcular las fotocorrientes generadas por cada subcelda, se midió el espectro generado por la nueva luz de polarización a la distancia elegida para obtener la homogeneidad apropiada utilizando un espectrofotómetro portátil CVI SM32Pro. Dada la limitación en longitud de onda de este espectrofotómetro, los datos obtenidos se limitan hasta los 1000nm, lo cual permite encontrar las condiciones para seleccionar las subceldas de GaInP y GaAs bajo la hipótesis de que la subcelda de Ge no esté generando una corriente menor. Esta hipótesis resulta razonable

dado que para el espectro AM0 la subcelda de Ge ya genera una mayor fotocorriente que las otras dos^[6] y, estando el espectro de la lámpara dicróica desplazado hacia el IR respecto al AM0, se puede suponer que esta fotocorriente será aún mayor.

Para agilizar el cálculo de la fotocorriente generada en las subceldas se armó una macro en una hoja de cálculo en el que se cargó la transmitancia de todos los filtros disponibles, el espectro de la lámpara y la RE de las tres subceldas. El programa permite elegir una combinación de filtros y utiliza la ecuación (1) para calcular rápidamente la corriente fotogenerada por cada una de las tres subceldas, informa cuál es la menor y muestra un gráfico de la densidad de corriente en función de la longitud de onda. El cálculo de la fotocorriente generada en las subceldas de GaInP y GaAs utilizando el programa en la opción sin interponer filtros, da el siguiente resultado: $J_{sc}(\text{InGaP}) = 56,09 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ y $J_{sc}(\text{GaAs}) = 69,85 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. Esto implica que el espectro de la lámpara dicróica define que la celda de InGaP es la que limita la corriente y en consecuencia aquélla a ser medida en estas condiciones.

Para la selección de la subcelda de GaAs, se eligió el filtro pasa-altos con longitud de onda de corte en 750nm. Esta elección se realizó a priori dada la necesidad de seccionar parte del espectro donde la subcelda de GaAs tiene respuesta (aproximadamente entre 700nm y 900nm) con el fin de disminuir su fotocorriente respecto a la generada por la subcelda de InGaP. En la Figura 10 se pueden observar la transmitancia del filtro, el espectro de la luz de polarización y el producto de ambos.

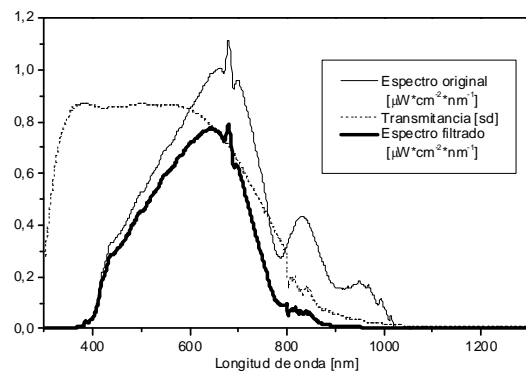


Figura 10. Transmitancia del filtro, el espectro de la luz de polarización y el producto de ambos.

Aplicando el programa para este nuevo espectro, se obtiene $J_{sc}(\text{InGaP}) = 46,79 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ y $J_{sc}(\text{GaAs}) = 34,99 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, con lo cual en este caso la que limita la corriente es la celda de GaAs como se quería.

Cabe aclarar que esta elección es válida en el caso de una celda doble junta donde el sustrato de Ge es inactivo, dado que el filtro con frecuencia de corte en 750nm no deja pasar longitudes de onda más allá de este valor. Si se utilizara este filtro en el caso de una triple junta, automáticamente pasaría a limitar la corriente la subcelda de Ge. Para este caso se eligió otro filtro disponible que tiene la longitud de onda de corte en 650nm pero transmite para longitudes de onda mayores que 1000nm. Considerando este nuevo filtro se obtienen $J_{sc}(\text{InGaP}) = 47 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ y $J_{sc}(\text{GaAs}) = 16 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, con lo cual también en este caso la que limita la corriente es la celda de GaAs. En la Figura 11 se pueden observar la transmitancia del filtro, el espectro de la luz de polarización y el producto de ambos. Como el espectrofotómetro utilizado no alcanza longitudes de onda mayores a 1100nm el cálculo del espectro filtrado es nulo en el infrarrojo pero se sabe que la energía irradiada por la lámpara dicróica en este sector es máxima y el filtro tiene alta transmitancia por lo que es seguro que la corriente generada por la subcelda de Ge será la mayor.

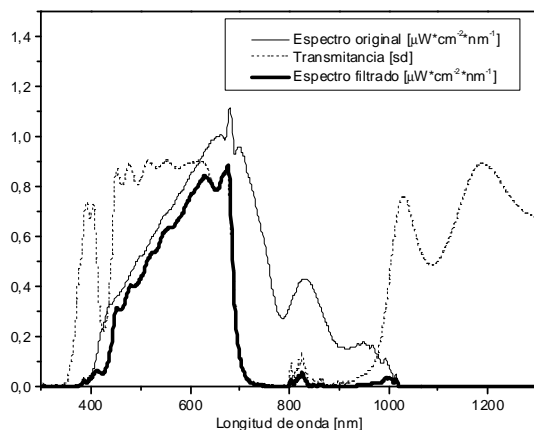


Figura 11. Transmitancia del filtro, el espectro de la luz de polarización y el producto de ambos.

Homogeneidad de la lámpara de polarización

Para asegurar las condiciones de homogeneidad de la lámpara que exige la norma^[8] se utilizó un radiómetro previamente construido por el GES y se buscó que la intensidad recibida en un área de 100x90mm no se desviara más de un 10% del

promedio. Para esto se dividió el área seleccionada en rectángulos de 10x10mm, se midió sobre cada uno y se realizó un gráfico de intensidad como se muestra en la Figura 12. La posición de la lámpara fue modificada hasta lograr un gráfico de homogeneidad satisfactorio.

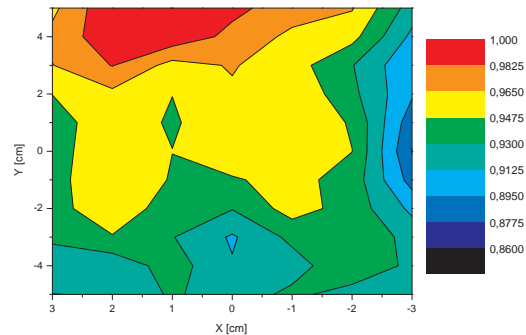


Figura 12. Homogeneidad del área seleccionada en unidades normalizadas al máximo valor de intensidad.

Procedimiento de medición

Para la medición de la respuesta espectral se utilizó el equipo descrito más arriba, utilizándose una frecuencia de conmutación de aproximadamente 770Hz, una base termostatizada y un preamplificador para mejorar el aprovechamiento del rango dinámico del *lock-in*. La constante de tiempo del amplificador *lock-in* se elige en cada caso según la relación señal-ruido que se tenga, comenzando típicamente en 300ms para una más rápida aproximación al valor final de la medición para luego ir aumentándola. Los valores utilizados varían entre 1 y 10 s. El nivel de ruido medido en ausencia de señal (obturando el haz monocromático) resultó de $9\mu\text{V}$, mientras que las señales medidas variaron entre $37\mu\text{V}$ y 27mV . Como celda de referencia se utilizó una celda solar de silicio cristalino elaborada en el GES y calibrada en el laboratorio Spasolab de España.

La medición se realizó siguiendo el siguiente procedimiento:

- 1) Se posiciona la celda de referencia en el plano de prueba y se deja termalizar según los requerimientos de la norma IRAM^[8] (a $25^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$).
- 2) Se procede a la medición de la señal producida por el haz monocromático para todas las longitudes de onda disponibles entre 340nm y 1100nm manteniendo la celda en condiciones de cortocircuito

- 3) Se reemplaza la celda de referencia por la celda a medir y se deja termalizar.
- 4) Se fija el espectro de la luz de polarización de acuerdo a la subcelda a medir.
- 5) Se mide la señal producida por el haz monocromático para las distintas longitudes de onda en condiciones de cortocircuito.
- 6) Se cambia el espectro de luz de polarización para la medición de otra subcelda.
- 7) Se repite el paso 5).

Una vez obtenidos los valores de tensión medidos para cada longitud de onda, se calcula la respuesta espectral absoluta de acuerdo a la ecuación (2):

$$RE^{cel}(\lambda) = \frac{A^{ref}}{A^{cel}} \times \frac{V^{cel}(\lambda)}{V^{ref}(\lambda)} \times RE^{ref}(\lambda) \quad (2)$$

donde V^{cel} y V^{ref} son las tensiones medidas (proporcionales a la corriente de cortocircuito) con el *lock-in* para las celdas a medir y de referencia respectivamente, A^{cel} y A^{ref} son las áreas de la celda a medir y la celda de referencia respectivamente y RE^{ref} es la respuesta espectral absoluta de la celda de referencia.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se realizaron las primeras mediciones de dos celdas multijuntura de origen comercial: una doble juntura GaInP/GaAs/Ge Spectrolab y una triple juntura GaInP/GaInAs/Ge Emcore. Los resultados obtenidos se pueden ver en las Figuras 13 y 14. Según puede verse, ambas mediciones resultan consistentes cualitativa y cuantitativamente con aquellas reportadas en la bibliografía. En el caso de la celda de doble juntura, la subcelda de GaAs presenta mayor respuesta en la zona correspondiente a la subcelda de InGaP que en el caso de la triple juntura. La presencia de esta respuesta se debe al hecho de que el espesor de la celda de InGaP es menor al óptimo para que sea esta la celda que limite la corriente de la multijuntura según se explicó con anterioridad, mientras que la mayor respuesta observada en el caso de la doble juntura podría deberse a que la subcelda de InGaP es de menor espesor que en el caso de la triple juntura.

La presencia de respuesta de la subcelda de InGaP entre 700 y 850nm, observado sólo en el caso de la doble juntura, parece ser algún problema asociado a esta medición en particular que deberá ser analizado con detenimiento.

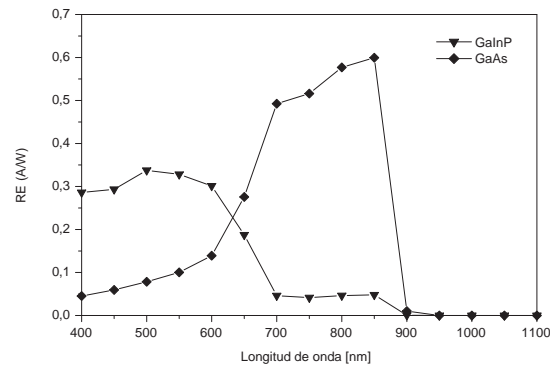


Figura 13. RE medida en la celda doble juntura GaInP/GaAs Spectrolab.

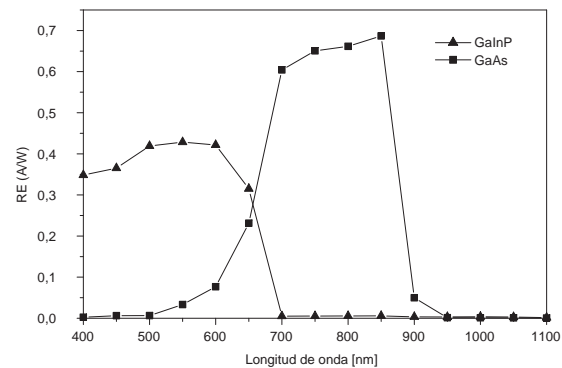


Figura 14. RE medida en la celda triple juntura GaInP/GaInAs/Ge Emcore.

Extensión de la capacidad del equipo

Un punto a tener en cuenta en sucesivas mediciones es la condición de cortocircuito determinada por el circuito externo. En las mediciones realizadas esta condición se impone variando la tensión de una fuente variable hasta compensar la caída de tensión en continua en la celda a medir ($V^{cel} \cong 0$). Si bien esto es correcto para una homojuntura, en el caso de un multijuntura imponer esta condición *no implica que cada subcelda esté en cortocircuito*, sino que cada una resulta polarizada en inversa por las otras dos ya que, por ejemplo en una triple juntura, si $V^{cel} = V^{InGaP} + V^{GaAs} + V^{Ge} \cong 0$ entonces $V^{InGaP} = -(V^{GaAs} + V^{Ge})$ y así sucesivamente en los casos restantes. Si la tensión de ruptura no es demasiado pequeña y las celdas tienen una resistencia paralelo razonablemente alta, esto no representa un problema y la medición puede hacerse de esta forma sin inconvenientes, como de

hecho resultó en los casos presentados en este trabajo. Sin embargo, estas condiciones no se suelen satisfacer para la subcelda de Ge, lo cual implica la necesidad de tener un cuidado particular en este caso. Una discusión pormenorizada acerca de los problemas que pueden aparecer en la medición de la RE en multijunturas se encuentra en Meusel et al. 2003^[7].

La extensión del intervalo de longitudes de onda para incluir la medición de la subcelda de Ge implica la solución de al menos tres problemas: la medición del espectro de la luz de polarización para todas las longitudes de onda donde dicha subcelda tiene respuesta (es decir hasta 1900nm), y tener un haz monocromático y un fotodetector calibrado que cubran este intervalo de longitudes de onda.

Está prevista, en consecuencia, la compra de un conjunto filtros de interferencia de banda angosta centrados entre 1200nm y 1900nm. Los mismos, por un problema de costo y espacio disponible, serán circulares de 254mm de diámetro, y estarán montados en una rueda giratoria que permita su selección y una integración adecuada al equipo preexistente. Además, se adquirirá una celda de Ge calibrada Emcore que oficiará como patrón de referencia primario. Por último, está prevista próximamente la medición del espectro de la luz monocromática en el intervalo de interés por medio de un espectrofotómetro apropiado.

CONCLUSIONES

Se realizaron las primeras mediciones de respuesta espectral de celdas multijuntura. Dichas celdas, de estructura GaInP/GaAs/Ge son de dos terminales y están construidas en forma monolítica; por lo tanto, para acceder a la RE de cada subcelda fue necesario modificar experimentalmente en forma apropiada el espectro de la luz de polarización. Las mediciones preliminares realizadas sobre las subceldas de InGaP y GaAs en celdas de doble y triple juntura, resultaron compatibles con otras mediciones reportadas en la literatura, mostrando un correcto funcionamiento del arreglo experimental y de las hipótesis de trabajo.

Se identificaron asimismo puntos clave a tener en cuenta para la extensión de la capacidad del equipo para poder medir la respuesta espectral de la subcelda de Ge, para los cuales se consideraron propuestas a realizar próximamente.

La implementación de este tipo de mediciones tendrá, además de la profundización del estudio de las celdas solares multijuntura, una aplicación directa en la evaluación de la degradación de cada subcelda en futuros ensayos de daño por radiación.

REFERENCIAS

- [1] Alurralde, M., Barrera, M., Bolzi, C.G., Bruno, C.J., Durán, J.C., Fernández Vázquez, J., Filevich, A., Godfrin, E.M., Goldbeck, V., Iglesias, A., Martínez Bogado, M.G., Mezzabolta, E., Nigro, S.L., Plá, J., Prario, I., Raffo Calderón, M.C., Rodríguez, S.E., Tamasi, M.J.L., Vertanessian, A., Antonuccio, F., Cabot, P., Carella, E., Franciulli, C.D., Moglioni, A. (2004a). Últimos desarrollos relacionados con la fabricación y el ensayo de paneles solares y componentes para usos espaciales. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 8, 4.01-4.06.
- [2] Alurralde M., Tamasi M.J.L., Bruno C.J., Martínez Bogado M.G., Plá J., Fernández Vázquez J., Durán J., Schuff J., Burlon A.A., Stoliar P. y Kreiner A.J. (2004b). Experimental and theoretical radiation damage studies on crystalline silicon solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 82, 531-542.
- [3] Bolzi C.G., Bruno C.J., Godfrin E.M., Martínez Bogado M.G., Plá J., Rodríguez S.E., Tamasi M.J.L., Alurralde M., Cabot P., Carella E., Fernández Vázquez J., Franciulli C.D., Goldbeck V., Mezzabolta E., Antonuccio F., Nigro S.L. y Durán J.C. (2001). Convenio de cooperación CONAE-CNEA: desarrollo, fabricación y ensayo de paneles solares para misiones satelitales argentinas. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 5, 4.07-4.12.
- [4] Bolzi C.G., Bruno C.J., Cabot P., Carella E., Durán J.C., Fernández Vázquez J., Franciulli C.D., Godfrin E.M., Goldbeck V., Martínez Bogado M.G., Moglioni A., Plá J., Rodríguez S.E., Tamasi M.J.L., Alurralde M., Antonuccio F., Filevich A., Iglesias A., Mezzabolta E. y Nigro S.L. (2003). Desarrollo, fabricación y ensayo de paneles solares para misiones satelitales argentinas - primer módulo para ensayos. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 7, 04.07-04.12.
- [5] Durán J.C., Bruno C.J., Alurralde M., Antonuccio F., Bolzi C.G., Cabot P., Carella E., Fernández Vázquez J., Filevich A., Franciulli C.D., Godfrin E.M., Goldbeck V., Martínez Bogado M.G., Mezzabolta E., Nigro S.L., Plá J., Rodríguez S.E. y Tamasi M. (2002). Convenio de

cooperación CONAE-CNEA: desarrollo, fabricación y ensayo de paneles solares para misiones satelitales argentinas-Actividades desarrolladas en el último año. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente 6, 04.13-04.17.

[6] King D. L., Hansen B. R., Moore J. M. y Aiken D. J. (2000). New methods for measuring performance of monolithic multi-junction solar cells. Proceedings of the 28th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Alaska, EE.UU., 1197-1201.

[7] Meusel M., Baur C., Bett A.W., Warta W. y Fernández E. (2003). Spectral response measurements of monolithic GaInP/Ga(In)As/Ge triple-junction solar cells: measurement artifacts and their explanation. Progress in Photovoltaics: Research and Applications 11, 499-514.

[8] Norma IRAM 210013-12 (2000). Métodos normalizados para la medición de la respuesta espectral de celdas fotovoltaicas.

[9] Stan M.A., Aiken D.J., Sharps P.R., Fatemi N.S., Spadafora F.A., Hills J., Yoo H. y Clevenger B. (2002). 27.5% efficiency GaInP/InGaAs/Ge advanced triple junction (ATJ) space solar cells for high volume manufacturing. Proceedings of the 29th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, New Orleans, EE.UU., 816-819.

[10] Tamasi M.J.L., Martínez Bogado, M.G., Alurralde, M., Plá, J.C. (2002). Estudio teórico-experimental de daño por radiación con protones de 10MeV en celdas solares de Silicio cristalino. Energías Renovables y Medio Ambiente 11, 19-24.