



CONVENIO DE COOPERACIÓN CONAE-CNEA: DESARROLLO, FABRICACIÓN Y ENSAYO DE PANELES SOLARES PARA MISIONES SATELITALES ARGENTINAS - ACTIVIDADES DESARROLLADAS EN EL ÚLTIMO AÑO *

J.C. Durán¹ C.J. Bruno¹, M. Alurralde², F. Antonuccio¹, C.G. Bolzi¹, P. Cabot³, E. Carella³, J. Fernández Vázquez¹, A. Filevich¹, C.D. Franciulli⁴, E.M. Godfrin¹, V. Goldbeck², M.G. Martínez Bogado¹, E. Mezzabolta⁴, S.L. Nigro¹, J. Plá¹, S.E. Rodríguez¹ y M.J.L. Tamasi¹

¹Departamento de Física – Centro Atómico Constituyentes – CNEA

²Departamento de Materiales – Centro Atómico Constituyentes – CNEA

³Departamento de Ensayos No Destructivos y Estructurales - Centro Atómico Constituyentes – CNEA

⁴Profesional Independiente

Av. General Paz 1499 - (1650) San Martín - Argentina

Tel. (011) 6772-7132, Fax (011) 6772-7121, www.tandar.cnea.gov.ar, duan@tandar.cnea.gov.ar

RESUMEN

Se presentan los avances realizados durante el último año en el desarrollo de los paneles solares para el satélite de observación argentino SAOCOM. En particular, se analizan las actividades desarrolladas en los temas más relevantes: elaboración y caracterización de celdas solares, puesta a punto de los procesos de soldadura y pegado, y desarrollo de diversas técnicas y dispositivos para ensayos. Se describen el diseño preliminar de los paneles y los componentes que lo conforman. La instalación del laboratorio de integración y ensayo se encuentra prácticamente terminada, estimándose que el mismo estará operativo a fines de octubre de 2002.

paneles solares – uso espacial – silicio cristalino – soldadura – adhesivos – caracterización eléctrica

INTRODUCCIÓN

La Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE) y la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) suscribieron, a fines de marzo de 2001, un convenio de cooperación cuyo objetivo final es proveer los paneles solares de vuelo para el satélite de observación argentino SAOCOM (Bolzi et al., 2001). Este convenio, encuadrado dentro de la Ley N° 23.877 de innovación tecnológica, dio lugar a la iniciación en el Centro Atómico Constituyentes (CAC) del Subproyecto Paneles Solares como parte del Proyecto SAOCOM de la CONAE y con una duración prevista de 3 años. La ejecución de dicho subproyecto permitirá disponer en el país de las herramientas de diseño y de las técnicas de fabricación, caracterización, calificación y ensayo de paneles solares para usos espaciales. Para tal fin, se constituyó en el Centro Atómico Constituyentes un grupo de trabajo interdepartamental.

En este artículo se presentan primeramente las principales características de los paneles solares requeridos por la misión SAOCOM a fin de mostrar el grado de complejidad asociado con la fabricación y ensayo de los mismos. A continuación, se describen las actividades de desarrollo y puesta a punto de las tecnologías asociadas, realizadas en el período agosto de 2001 a agosto de 2002.

DISEÑO DE LOS PANELES SOLARES

El satélite SAOCOM se desplazará sobre una órbita polar, situada a 659 km. de altura, con una inclinación de 98° y un período orbital de 98 minutos, con períodos de eclipse de duración variable durante aproximadamente 4 meses por año, con una duración máxima de 19 minutos el 21 de diciembre.

El requerimiento de potencia media del satélite será algo superior a los 900 W, con picos de consumo que superan los 4 kW, y la tensión requerida para la carga de las baterías será de aproximadamente 90 V (ver Godfrin y Durán, 2002). Estos requerimientos de energía deberán ser provistos utilizando un área total de aproximadamente 8,7 m², distribuidos en 3 paneles que se desplegarán luego de la puesta en órbita del satélite (1 panel central de 1,96 m × 2,24 m y 2 laterales de 0,96 m × 2,24 m cada uno).

Las necesidades de energía del satélite combinadas con el área disponible, permitieron determinar la necesidad de utilizar las celdas solares de mayor eficiencia disponibles en el mercado espacial internacional: celdas solares de triple juntura InGaP-GaAs-Ge, de 27,5 cm² de área activa y eficiencia media mínima de 27,5% (28°C, AM0). Teniendo en cuenta, además, las características de la órbita ya mencionadas, la geometría y la orientación del satélite y los requerimientos de alta

* Trabajo financiado fundamentalmente por la CONAE y la CNEA. Cuenta también con aportes de la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica a través del subsidio BID 1201/OC-AR, PICT N° 10-06981.

confiabilidad, se realizó un diseño preliminar de los paneles solares con las siguientes características principales:

- 58 cadenas de 45 celdas en serie cada una, o sea un total de 2610 celdas,
- 1 diodo de paso integrado en cada celda,
- 1 diodo de bloqueo por cadena,
- 3 interconectores de Mo plateado por celda,
- 1 cubierta de vidrio resistente a la radiación, de 100-150 μm de espesor, en cada celda,
- cableado y conexiones redundantes,
- configuración del circuito de celdas y cableado compatible con una minimización del momento dipolar magnético.

A fin de minimizar el peso de los paneles, los sustratos tendrán una estructura de tipo compuesto formada por una base tipo panel de abeja de Al, recubierta por fibra de carbono y con una capa de aislante eléctrico a definir (kapton, tedlar o fibra de vidrio).

PLAN DE TRABAJO

Las actividades de investigación y desarrollo que se realizan están relacionadas esencialmente con dos etapas del proceso de fabricación de paneles solares para satélites: (i) elaboración y ensayo de celdas solares de silicio monocristalino, y (ii) interconexión de las celdas y su integración al panel. Si bien al presente está claramente definido que las celdas de Si no son apropiadas para el satélite SAOCOM, se continuó y continuará trabajando en su desarrollo con dos objetivos principales: proveer dispositivos de bajo costo para la puesta a punto de los procesos de soldadura y pegado, y alcanzar la repetibilidad y confiabilidad que permitan calificar celdas de Si nacionales para futuros satélites con menores requerimientos de potencia.

Las tareas que conducen a la integración de los prototipos de ensayo y de vuelo para el SAOCOM son las siguientes:

- Montaje del laboratorio de desarrollo, integración y ensayo.
- Análisis teórico y ensayos en Tierra del daño por radiación sobre las celdas solares.
- Fabricación y ensayo de interconectores.
- Puesta a punto de los procesos de soldadura y de las técnicas de ensayo correspondientes.
- Desarrollo de técnicas de alineación y pegado de los vidrios sobre las celdas y de las celdas sobre el sustrato.
- Diseño del circuito eléctrico de los paneles y su interconexión al satélite, con las interfaces correspondientes.
- Estudio y desarrollo de modelos para la estimación de la energía generada por los paneles solares durante la misión espacial, al principio de la misma (*Beginning of Life, BOL*) y al final de su vida útil (*End of Life, EOL*).
- Elaboración de sensores de radiación solar, paneles de ingeniería y prototipo de panel de vuelo para la realización de ensayos de calificación en Tierra y/o en el espacio.
- Integración de paneles de vuelo.
- Realización de ensayos eléctricos, mecánicos y de termovació sobre los diferentes componentes y sobre los paneles de ingeniería y de vuelo.

LABORATORIO DE INTEGRACIÓN

La integración o armado de los paneles solares para usos espaciales puede resumirse en los siguientes procesos: clasificación de celdas solares, formación de cadenas de celdas en serie, pegado de vidrios a la cara frontal de las celdas, cableado eléctrico del panel, pegado de las cadenas de celdas al sustrato e interconexión al cableado, ensayos eléctricos.

Estos procesos se realizarán en un laboratorio montado específicamente a tal fin, ubicado en la planta baja del denominado Sector "C" del edificio TANDAR, en el Centro Atómico Constituyentes. El laboratorio propiamente dicho tiene una superficie de aproximadamente 180 m² y cuenta con dos áreas de ingreso/egreso de personal y de insumos/productos, sumando un total de alrededor de 220 m². Todo el sector estará acondicionado de manera de disponer de un área limpia Clase 10.000 (FED-STD-209D, "Clasificación de Áreas Limpias"), con temperatura y humedad controladas. El filtrado de aire se realizará mediante un sistema prefiltrante instalado en el conducto de inyección y filtros absolutos terminales (HEPA 99,99% de eficiencia para partículas de 0,3 μm) en cada boca de inyección de aire. El sistema en su conjunto proveerá 30 renovaciones de aire por hora y una presurización positiva respecto del exterior.

Las obras de adaptación y terminación del edificio existente se iniciaron en agosto de 2001. Al presente se ha prácticamente terminado la obra civil y las instalaciones eléctrica, sanitaria y de servicios, tanto del laboratorio cuanto de las zonas aledañas (oficina, sala de reunión, sala de máquinas, pasillo de ingreso y sanitarios). La instalación sanitaria y de servicios para el laboratorio incluye: agua fría y caliente, desagües cloacales y químicos, vacío, aire comprimido y agua ablandada-enfriada para refrigeración de equipos. Se ha iniciado la instalación de cañerías de acero inoxidable para la provisión de gases especiales (nitrógeno y argón de alta pureza) a los puestos de trabajo y de un sistema contra incendio (detección y matafuegos).

Se montaron 10 puestos de trabajo. Cada uno de ellos cuenta con un tablero eléctrico con alimentación monofásica y trifásica, y servicios según lo requerido por la función a la cual está destinado.

En cuanto al sistema de tratamiento de aire, se ha finalizado la instalación de los conductos de distribución e inyección de aire en el área limpia, y actualmente se está iniciando la instalación del equipamiento (equipo de frío, resistencias calefactoras, ventilador, sistema de control, etc.). Se estima que el laboratorio podrá estar operativo hacia fines de octubre del corriente año.

ELABORACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE CELDAS SOLARES

Como se mencionó previamente, se continuó trabajando en la puesta a punto de la tecnología de fabricación de celdas solares de silicio cristalino para usos espaciales. Se fabricaron celdas de 2 dimensiones (20mm × 40mm y 40mm × 40mm) sobre obleas de silicio comerciales de diferentes orígenes y características: Setec con $\rho = 1 \Omega\text{cm}$, Heliodinámica con $\rho = 7 \Omega\text{cm}$, Bayer con $\rho = 20 \Omega\text{cm}$ y Bayer con $\rho = 1 \Omega\text{cm}$. Todas las celdas fueron caracterizadas mediante la medición de la curva corriente-tensión (I-V) en el simulador solar y ajuste posterior de las curvas para la obtención de los parámetros del circuito equivalente. Se realizaron también mediciones de los coeficientes de temperatura para la tensión de circuito abierto y para la corriente de cortocircuito, en el intervalo 10-70°C, utilizando la base termostatizada desarrollada en la CNEA, obteniéndose valores sin diferencias significativas respecto a los presentados en Godfrin et al., 1999.

Se completó el montaje del equipo de medición de respuesta espectral y se lo utilizó para la caracterización de celdas de silicio, en particular para estimar la longitud de difusión de portadores minoritarios en la base de los dispositivos. Se construyeron dos celdas de Si con 4 terminales, cubierta de vidrio y todo el conjunto a su vez pegado en un soporte de latón diseñado y construido al efecto, para la medición de su respuesta espectral en el laboratorio Spasolab de España. Estas celdas servirán de referencia para la calibración del equipo desarrollado en el Grupo.

Se comenzó a trabajar en la caracterización eléctrica de celdas de GaAs de doble juntura sobre sustrato de Ge, provistas por la empresa Spectrolab de los EE.UU. Se midieron las curvas I-V a temperatura controlada de celdas de este tipo, con y sin vidrio protector. Se determinó asimismo el coeficiente de temperatura correspondiente a la tensión de circuito abierto, $V_{ca} = -4,1 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ con un espectro de iluminación AM1.5.

Se diseñó y construyó una base de temperatura controlada para la medición normalizada de las características eléctricas de las celdas solares. Esta base está realizada utilizando el efecto Peltier, o sea que es completamente de estado sólido, y sólo cubre el intervalo de temperaturas cercanas a la normalizada. Posee la ventaja de alcanzar la temperatura de referencia con rapidez, siendo a su vez fácilmente transportable debido a su pequeño tamaño y peso. Está controlada electrónicamente y alcanza una estabilidad de $\pm 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$ a 25 °C con una irradiancia incidente de 1000 W/m². Se dispone, además, de una base termostatizada mediante agua a temperatura controlada, el cual permite trabajar en el intervalo 5-70 °C.

ENSAYOS DE DAÑO POR RADIACIÓN

Utilizando el montaje experimental desarrollado, se realizaron ensayos de daño por radiación con protones de 10 MeV y fluencias entre 10^8 y 10^{13} p/cm^2 sobre celdas de Si, GaAs y heterojunturas a-Si/c-Si, utilizando un haz externo del acelerador TANDAR de la CNEA. Los resultados obtenidos se analizan en Tamasi et al., 2002.

FABRICACIÓN DEL PANEL SOLAR

Interconectores

Las celdas solares que componen los paneles solares espaciales se conectan eléctricamente entre sí mediante interconectores metálicos de unos pocos milímetros de ancho y con espesores comprendidos entre 10 y 40 μm . Dado que los cambios dimensionales producidos por el ciclado térmico dan lugar a la modificación de la separación entre celdas contiguas, los interconectores serán los elementos que, además de cumplir la función de conductores eléctricos, deberán absorber dicha modificación. A tal fin, su geometría incluye un lazo de deformación destinado a servir de aliviador de tensiones generadas por el ciclado térmico. En la Figura 1 se muestra un esquema de un interconector de doble paso con lazo de deformación.

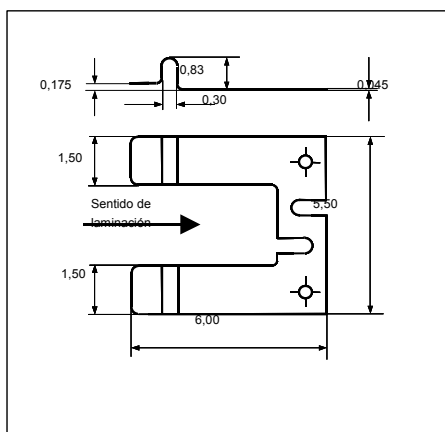


Figura 1: Esquema de un interconector.

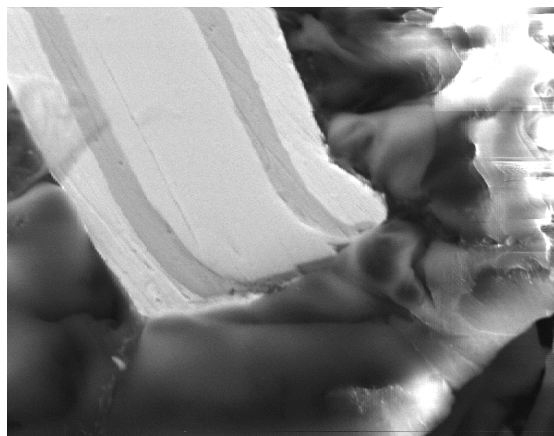


Figura 2: Imagen SEM de un interconector de Mo.

Se ha seleccionado el Mo como material de base para los interconectores a ser utilizados para los paneles solares del satélite SAOCOM, por su elevada resistencia a la fatiga y su carácter no magnético, requisito impuesto por otros subsistemas del satélite. La empresa Metal Finishing S. A. realizó un conjunto de experiencias de plateado (con capas intermedias de Ni o Cu) de láminas de Mo de 20 μm de espesor. Los resultados obtenidos fueron analizados con microscopía electrónica de

barrido (Figura 2), tanto en láminas planas cuanto en láminas conformadas con lazo aliviador de tensiones. Actualmente, se están iniciando ensayos de depósito de recubrimiento de 3 capas (Cu-Ni-Ag), similar al observado en interconectores de Mo utilizados comercialmente para paneles espaciales.

Soldadura

Los procesos de soldadura empleados para la interconexión de celdas solares para paneles fotovoltaicos de uso espacial deben producir soldaduras que aseguren un óptimo contacto eléctrico junto con una resistencia mecánica adecuada a las severas condiciones que se producen durante el despegue y la operación en órbita. Si bien en numerosas oportunidades se continúa usando la soldadura blanda (*soldering*), los fabricantes de celdas solares de alta eficiencia recomiendan fuertemente el uso de soldadura por resistencia con electrodos paralelos (*resistance parallel gap welding*), especialmente para la unión del interconector al contacto frontal de la celda.

Hasta el momento se ha trabajado exclusivamente con soldadura blanda para ambos contactos de las celdas, dado que no se cuenta aún con el equipamiento para soldadura por resistencia. La soldadura blanda requiere efectuar una selección precisa del aporte para asegurar conductividad eléctrica y resistencia mecánica adecuadas, evitar la formación de residuos corrosivos y facilitar la limpieza posterior. Se ha seleccionado el metal de aporte en base a su conductividad eléctrica, su resistencia mecánica y su punto de fusión, habiéndose trabajado con aleaciones Sn-Pb-Ag y Sn-Ag. Asimismo, se han realizado ensayos con aleación con y sin fundente.

A fin de controlar con precisión el aporte de metal, se desarrollaron matrices de corte tipo “sacabocados” para la preparación de preformas de aleación de diferentes espesores y diámetros. Asimismo, se diseñaron y construyeron un conjunto de matrices para posicionamiento y alineación de interconectores y celdas requerido durante los procesos de soldadura (ver Figura 3).



Figura 3: Dispositivos de alineación para soldadura de cadenas de celdas en serie.

Se diseñó y construyó un dispositivo para la realización de ensayos de tracción, tendientes a determinar la resistencia mecánica de la soldadura de los interconectores con la cara frontal de las celdas solares. En una primera etapa, la aplicación de las cargas se realizan en forma manual. Actualmente, se está diseñando el dispositivo para aplicación automática de la carga.

Mediante el dispositivo desarrollado, se realizaron ensayos de tracción a 45° sobre interconectores de plata soldados, con material de aporte de bajo punto de fusión, a la cara frontal de celdas de GaAs. Se realizaron pruebas con interconectores planos y con interconectores conformados con lazo aliviador de tensión. Estas primeras experiencias muestran en general una buena resistencia a la tracción, hasta cargas superiores a 300 g.

En lo que respecta a la técnica de soldadura por resistencia mediante electrodos paralelos, se encuentra en proceso de compra el equipo correspondiente.

Pegado

Las actividades relacionadas con técnicas de pegado pueden dividirse esencialmente en dos: pegado de la cobertura de vidrio (de 80-150 μm de espesor) en forma individual sobre cada celda y pegado de celdas sobre el sustrato. Los métodos, dispositivos y equipamiento desarrollados tienen por objetivo definir procesos que permitan una alta confiabilidad, minimizando a su vez la introducción de contaminantes en las uniones. Para ello, se continuó trabajando en el diseño de dispositivos de alineación y de dosificación y distribución del adhesivo. Asimismo, se diseñaron y construyeron nuevas pinzas neumáticas para la manipulación de celdas, vidrios e interconectores, y para la manipulación de conjuntos de celdas ya interconectadas. En las Figuras 4 y 5 se muestran algunos de los dispositivos desarrollados.

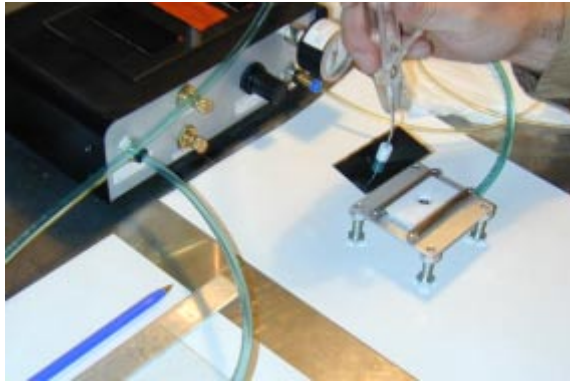


Figura 4: Dispositivo de alineación para pegado de vidrio.

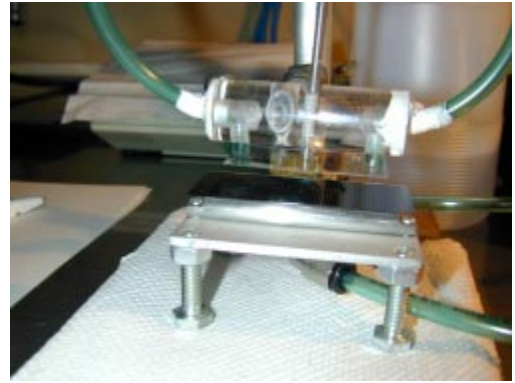


Figura 5: Primeras pruebas de aplicación del adhesivo.

Se desarrollaron procedimientos para el pegado de los vidrios a las celdas y de éstas al sustrato con resultados satisfactorios. Se inició la realización de ensayos de tracción para la calificación de los procedimientos y de los adhesivos utilizados. Se prevé también la ejecución de ensayos de vibraciones. Las estaciones de trabajo y “retrabajo” (acciones correctivas) para el pegado de vidrios están en etapa de construcción y optimización. En lo que respecta al pegado de las celdas al sustrato, se diseñaron máscaras para la aplicación del adhesivo con diferentes patrones (Figura 6), y se construyó y probó un nuevo aplicador del adhesivo.

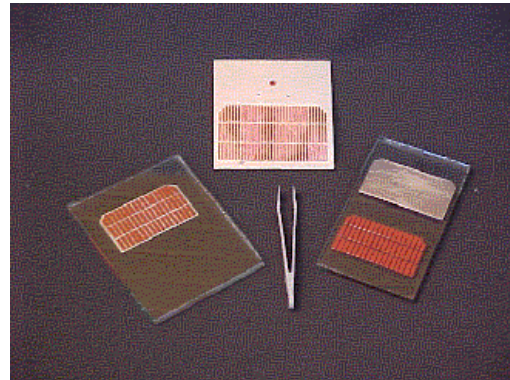
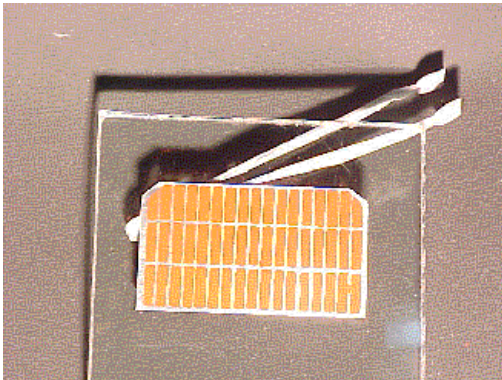


Figura 6: Patrones de aplicación del adhesivo para el pegado de las celdas sobre el sustrato.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a C. Alonso (Jefe del Proyecto SAOCOM), D. Gestal (Representante Técnico de la CONAE) y G. Bisaccio por su permanente disposición para resolver los problemas que se suscitan durante la ejecución del Subproyecto.

REFERENCIAS

- 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.
- Godfrin E.M. y Durán J.C. (2002). Paneles solares para la misión satelital SAOCOM: primeras etapas de diseño, enviado a *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* **6**.
- Godfrin E.M., Martínez Bogado M.G., Tamasi M.J.L. y Durán J.C. (1999). Primera experiencia de celdas solares argentinas en el espacio: Análisis preliminar de los resultados, *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* **3**, 4.25-4.28.
- Tamasi M.J.L., Martínez Bogado M.G., Plá J.C. y Alurralde M. (2002). Estudios de daño por radiación con protones de 10 MeV, enviado a *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* **6**.

ABSTRACT The activities concerning to the development of the solar modules for the Argentine observation satellite SAOCOM are presented. Particularly, main subjects are analyzed: fabrication and characterization of solar cells, set up of soldering and bonding procedures, and development of techniques and devices for testing. Preliminary design of modules and its constitutive components are described. Installation of the integration and testing lab is almost finished, and this lab is estimated to be operative by the end of October 2002.

Keywords: solar modules– space applications – crystalline silicon – soldering – adhesives – electrical characterization