

UNIVERSIDAD NACIONAL DE GENERAL SAN MARTÍN
COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA
INSTITUTO DE TECNOLOGÍA
"Prof. Jorge A. Sabato"

**Diseño, elaboración, caracterización y ensayos
de dispositivos fotovoltaicos para usos espaciales^(*)**

por Lic. Mónica G. Martínez Bogado

Director

Dr. Julio C. Durán

Colaborador

Cristián J. Bruno

(*)Tesis para optar al título de Doctor en Ciencia y Tecnología - Mención Física

República Argentina

2004

RESUMEN

En los últimos años, se registró en el país un renovado interés en el desarrollo de las denominadas fuentes alternativas de generación de energía, como consecuencia del agotamiento de los combustibles fósiles y de una creciente conciencia de la necesidad del cuidado del medio ambiente.

Por otra parte, dado que la Argentina cuenta con un Plan Espacial Nacional actualmente en ejecución, resulta de sumo interés desarrollar la tecnología de fabricación de dispositivos fotovoltaicos y paneles solares para futuras misiones satelitales, así como estudiar el comportamiento de estos dispositivos en ambiente espacial para predecir correctamente el funcionamiento de los mismos durante la misión.

La presente Tesis Doctoral fue realizada en el Grupo Energía Solar del Departamento de Física de la Comisión Nacional de Energía Atómica y los trabajos presentados se encuentran en el marco de un acuerdo de colaboración entre la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) y la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE), cuyo objetivo principal es el de contar en el país con técnicas específicas de diseño, fabricación, caracterización y ensayo de paneles solares para usos espaciales.

Las actividades realizadas dentro de la Tesis se centraron en la optimización de los procesos de elaboración de sensores de radiación y celdas solares, y la caracterización tanto eléctrica como electrónica de dispositivos fotovoltaicos sobre distintos materiales. En particular, se estudiaron homojunturas de *Si* cristalino y multijunturas basadas en GaAs.

En el Capítulo 1 se presenta una introducción a la fenomenología física de la conversión fotovoltaica de la energía solar, incluyendo las características de la radiación solar y los fenómenos que ocurren en el interior de los materiales semiconductores de uso fotovoltaico al producirse la absorción de radiación. Además, sobre el final del capítulo, se destaca la importancia de la Argentina como país espacial.

En el Capítulo 2 se hace una reseña de los mecanismos y las ecuaciones que regulan el transporte de carga en junturas realizadas sobre materiales de interés fotovoltaico.

El Capítulo 3 trata sobre la elaboración de sensores y celdas solares de silicio cristalino y la optimización de los procesos que llevan a obtener dispositivos con características eléctricas más repetibles y con mayor eficiencia de conversión. Se presenta también una breve descripción de la fabricación de celdas tandem multijuntura.

Como actividad complementaria, se elaboraron celdas de silicio cristalino para la fabricación del primer panel para uso terrestre realizado con dispositivos nacionales, el cual fue utilizado como fuente de alimentación de un sistema de seguimiento de una cocina solar desarrollada en el Instituto de Investigaciones en Energías no Convencionales (INENCO-CONICET) de la Universidad Nacional de Salta.

En el Capítulo 4 se presentan las diversas técnicas de caracterización desarrolladas en esta Tesis como así también la puesta a punto del equipamiento específico. Dichas técnicas de caracterización permiten determinar los parámetros eléctricos y electrónicos en los dispositivos fabricados.

En particular, se utilizaron la técnica PCD (*"PhotoConductance Decay"*) y una variante de la técnica OCVD (*"Open Circuit Voltage Decay"*) para evaluar distintos procesos de fabricación de celdas y también para analizar el daño producido por irradiación con protones y electrones.

El Capítulo 5 trata el diseño, la elaboración y los ensayos del primer módulo de ingeniería fabricado en el país con celdas avanzadas de triple juntura $\text{InGaP}_2/\text{InGaAs}_2/\text{Ge}$. En particular se muestra el cálculo estimativo del momento dipolar magnético del panel fabricado y los ensayos de vibración y termovació realizados sobre el mencionado módulo. Los ensayos sobre el panel de ingeniería en Tierra se llevaron a cabo en las instalaciones de la empresa rionegrina INVAP S.E.. El objeto de estos ensayos fue calificar tanto los procedimientos de elaboración como los componentes que conforman el módulo: celdas, adhesivos, interconectores, cables y diodos.

Finalmente, el último capítulo trata acerca de la calibración de sensores de radiación para mediciones terrestres, patrones secundarios para espectro AM0 extraterrestre y patrones secundarios de respuesta espectral.

ABSTRACT

There has been renewed interest in the development of so-called alternative sources of energy in our country in the last years as a consequence of the depletion of fossil fuels and an increasing awareness of the need to protect the environment.

Also, as a National Space Plan is currently being executed in Argentina, the development of the technology to manufacture photovoltaic devices and solar panels for future satellite missions has gained importance in order to predict their functioning during the mission with accuracy.

This Doctoral Thesis was done in the Solar Energy Group of the Physics Department of the National Atomic Energy Commission (CNEA) and all works submitted were carried out within the frame of the cooperative agreement between CNEA and the National Space Activities Commission (CONAE), whose main objective is to provide the country with specific techniques for the design, manufacture, characterization and testing of solar panels for space use.

The activities done as part of this Thesis focused on the optimization of the manufacturing processes of radiation sensors and solar cells, as well as both the electrical and electronic characterization of photovoltaic devices on different materials, mainly silicon crystalline homojunctions and multifunction based on GaAs.

The first Chapter offers an introduction to the physics involved in the photovoltaic conversion of solar energy, including characteristics of solar radiation and phenomena occurring in the interior of semiconductors materials for photovoltaic use when radiation absorption is produced. In addition, towards the end of the chapter, the importance of Argentina as a space country is highlighted.

In Chapter 2 there is a summary of the mechanisms and equations related with carrier transport in junctions done on materials of photovoltaic interest.

Chapter 3 deals with the production of silicon crystalline solar cells and sensors and the optimization of the processes to obtain devices with electric characteristics with higher repetitiveness and a higher conversion efficiency. There is also a brief description of multijunctions tandem solar cells manufacturing process.

As a complementary activity, silicon crystalline cells were produced for manufacturing of the first panel for terrestrial use done with national devices, which was utilized as a feeding source for a solar cooker follow-up system developed in the Unconventional Energy Research Institute (INENCO-CONICET) of the Salta National University (INENCO-CONICET).

Chapter 4 presents different characterization techniques developed in this Thesis as well as the start-up procedure of the specific equipment. The said characterization techniques enable the determination of electric and electronic parameters in the manufactured devices.

The PCD (PhotoConductance Decay) Technique was used and also a variation of the OCVD (Open Circuit Voltage Decay) Technique in order to assess different processes of cell manufacturing as well as to analyze the damage caused by proton and electron radiation.

Chapter 5 is about the design, elaboration and testing of the first engineering module manufactured in our country with advanced $\text{InGaP}_2/\text{InGaAs}_2/\text{Ge}$ triple junction solar cells. Focus is set on the estimation of the magnetic dipolar momentum of the manufactured panel and the vibration and thermo-vacuum test done on the said module. Terrestrial test on the engineering panel were carried out at the facilities of INVAP S.E., a company from Río Negro. The goal of these tests was to qualify both manufacturing procedures and module components: cells, adhesive, interconnectors, wires and diodes.

Finally, the last chapter deals with calibration of radiation sensors for terrestrial measurements, secondary patterns for extraterrestrial AM0 spectrum and secondary patterns of spectral response.

ÍNDICE

RESUMEN I

ABSTRACT..... III

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

1.1 RECURSO SOLAR.....3

1.2 MATERIALES DE INTERÉS FOTOVOLTAICOS5

 1.2.1 Silicio cristalino8

 1.2.2 Silicio amorfo hidrogenado (*a-Si:H*)10

 1.2.3 Arseniuro de galio (*GaAs*)12

1.3 EL PLAN ESPACIAL NACIONAL13

 1.3.1 Provisión de energía para satélites.....14

 1.3.2 Misiones de la serie SAC.....15

 1.3.2 Misión SACOCOM17

1.4 VINCULACIÓN ENTRE LA CNEA Y LA CONAE.....18

 1.4.1 SAC-A19

 1.4.2 SAOCOM21

Referencias Capítulo 128

Capítulo 2

PROPIEDADES BÁSICAS DE SEMICONDUCTORES Y JUNTURAS

2.1 PROPIEDADES ÓPTICAS DE SEMICONDUCTORES29

2.2 RECOMBINACIÓN EN SEMICONDUCTORES32

2.3	INTERFACES EN SEMICONDUCTORES.....	33
2.4	MODELO DE TRANSPORTE EN HOMIJUNTURAS	35
2.5	PROPIEDADES DE TRANSPORTE EN HETEROJUNTURAS.....	39
	Modelo de desplazamiento – difusión de Anderson.....	41
2.6	CELDA SOLARES MULTIJUNTURAS	43
	Celda simple juntura de <i>GaAs</i> sobre <i>Ge</i>	45
	Celdas tandem de doble juntura <i>GaInP₂/GaAs</i> sobre <i>Ge</i>	47
	Celdas tandem de triple juntura de <i>GaInP₂/GaAs/Ge</i> y <i>GaInP₂/InGaAs₂/Ge</i>	47
	Referencias Capítulo 2.....	53

Capítulo 3

CARACTERIZACIÓN DE DISPOSITIVOS FOTOVOLTAICOS

3.1	PROPIEDADES ELÉCTRICAS	54
	3.1.1 Características de la curva I-V bajo iluminación.....	54
	3.1.2 Características de la curva I-V en condiciones de oscuridad.....	57
3.2	ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES ELECTRÓNICAS	59
	3.2.1 Método de decaimiento de la tensión a circuito abierto (<i>OCVD</i>).....	60
	Técnica <i>OCVD</i> modificada.....	62
	Aplicación de la técnica <i>OCVD</i> modificada. Simulaciones para determinar el τ_{efectivo} en celdas de silicio irradiadas con protones.....	65
	3.2.2 Método de decaimiento de la fotoconductividad (<i>PCD</i>)	66
	Decaimiento de la fotoconductividad en el estado cuasi-estacionario (<i>QSSPCD</i>)	68
	Aplicación de la técnica <i>PCD</i> . Determinación del tiempo de vida media efectiva en obleas de Si irradiadas con protones.....	76
	3.2.3 Medición de la respuesta espectral	79
	3.2.3.1 Equipo de medición.....	79
	3.2.3.2 Análisis de resultados.....	85
	3.2.3.3 Determinación de la longitud de difusión, L_D a partir de los datos de respuesta espectral	86
	Referencias Capítulo 3.....	98

Capítulo 4

TÉCNICAS DE FABRICACIÓN DE DISPOSITIVOS FOTOVOLTAICOS

4.1 ELABORACIÓN DE CELDAS SOLARES Y SENSORES DE c-Si	99
4.1.1 Oxidación.....	97
4.1.2 Difusión de dopantes	98
4.1.3 Difusión de un paso	100
4.1.4 Formación de los contactos eléctricos	102
4.2 ELABORACIÓN DE CELDAS MULTIJUNTURAS.....	106
4.3 PROCESO DE COMPENSACIÓN Y CAPTURA DE IMPUREZAS	107
4.3.1 Extracción de impurezas en muestras de silicio no oxidadas	111
Caracterización estructural y química de muestras de silicio elaboradas	113
4.3.2 Extracción de impurezas en muestras de silicio oxidadas	118
4.4 APLICACIÓN DE LAS TÉCNICAS DESARROLLADAS A LA FABRICACIÓN DE UN PANEL SOLAR TERRESTRE	120
Referencias Capítulo 4.....	133

Capítulo 5

DISEÑO, FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UN MÓDULO DE INGENIERÍA PARA ENSAYOS DE CALIFICACIÓN

5.1 MOMENTO MAGNÉTICO DE UN PANEL SOLAR.....	134
5.1.1 Momento magnético del panel para la misión SAC-C	134
5.1.2 Momento magnético de los paneles para la misión SAOCOM	136
5.1.2.1 Momento magnético de una cadena de celdas en serie	136
5.1.2.2 Momento magnético total del panel solar	137
5.2 CARACTERIZACIÓN DE COMPONENTES.....	138
5.2.1 Inspección visual de celdas solares.....	139
5.2.2 Análisis estructural de celdas multijuntura	140
Celda DJ $GaInP_2/GaAs/Ge$ Spectrolab	140
Celda TJ $GaInP_2/InGaAs_2/Ge$ Emcore.....	143
5.2.3 Medición de la curva I-V de celdas individuales.....	146

Proceso de elaboración de los conjuntos CIC	146
5.2.4 Caracterización óptica de los vidrios de protección	150
5.2.5 Caracterización eléctrica de los diodos de paso.....	151
5.2.6 Estimación de la capacidad de juntura de una celda multijuntura	152
5.3 CARACTERIZACIÓN Y ENSAYO DE MÓDULO DE INGENIERÍA	154
5.3.1 Caracterización eléctrica – Medición de la curva I-V	155
5.3.2 Ensayos de vibración	156
5.3.3 Ensayo de termovació	158
5.3.4 Conclusiones	160
Referencias Capítulo 5	165

Capítulo 6

SENSORES DE RADIACIÓN Y CELDAS SOLARES DE REFERENCIA

6.1 MEDICIÓN DE RADIACIÓN SOLAR-GENERALIDADES	166
6.2 RADIÓMETROS FOTOVOLTAICOS	167
6.2.1 Diseño y armado de los sensores	167
6.2.2 Calibración de sensores de radiación.....	171
6.3 CELDA SOLAR DE REFERENCIA PARA LA MEDICIÓN DE LA RESPUESTA ESPECTRAL E IRRADIANCIA	173
Procedimiento de ensayo	176
6.4 CONCLUSIONES	177
Referencias Capítulo 6	182

CONCLUSIONES GENERALES.....	183
------------------------------------	------------

Agradecimientos.....	186
-----------------------------	------------

Lista de publicaciones.....	187
-----------------------------	-----

Capítulo 1

INTRODUCCION

Los sistemas solares fotovoltaicos son la fuente de potencia de la mayoría de los satélites, sondas y vehículos espaciales. Ello se debe a una combinación de factores: elevada confiabilidad, probada manufactura, buen comportamiento en ambiente espacial y costos razonables. En la actualidad, el mercado espacial se encuentra en expansión como consecuencia de numerosos proyectos de satélites de observación y comunicaciones. Las principales empresas internacionales han estimado que en un futuro no muy lejano, los sistemas de telecomunicaciones requerirán entre 15 y 20 kW de potencia [1].

Las aplicaciones fotovoltaicas para usos espaciales tienen características técnicas y perfiles productivos claramente diferenciados de las terrestres. En el espacio, las celdas solares están sometidas a condiciones ambientales mucho más severas que en la superficie terrestre. Por ello, las celdas deben ser capaces de soportar tanto la fatiga mecánica durante el despegue como así también operar en distintas condiciones ambientales: bombardeo con partículas cargadas, degradación por la intensa radiación ultravioleta (UV), daño producido por el oxígeno atómico y variaciones bruscas de temperatura al entrar y salir de la sombra de la Tierra. Estos factores hacen que las características eléctricas de los dispositivos fotovoltaicos se deterioren durante la misión, sufriendo pérdidas significativas en la potencia entregada.

Las celdas solares son generalmente la única fuente de potencia del satélite y, en consecuencia, deben tener las mejores características ya que el éxito de la misión depende críticamente de la potencia suministrada por estos dispositivos. En muchos casos los costos en las celdas son poco significativos en comparación con los costos involucrados en la misión espacial (típicamente, alrededor de decenas de millones de dólares).

Por otra parte, los materiales utilizado para la fabricación de las celdas solares tienen una incidencia fundamental sobre las propiedades eléctricas de las mismas y, en especial, sobre la eficiencia de conversión (η) de energía electromagnética en eléctrica. A lo largo de la

historia se han utilizado en el espacio distintos materiales y estudiado sus propiedades y resistencia al ambiente. En base a la experiencia adquirida [2, 3, 4, 5, 6, 7], la tendencia para futuras misiones es continuar utilizando el *Si* y semiconductores derivados del *GaAs* como los principales materiales para la fabricación de dispositivos fotovoltaicos de uso espacial [8].

En este Capítulo, se presentan, a modo de introducción, las características de la radiación solar y una breve descripción acerca de los principales materiales para aplicaciones fotovoltaicas. Finalmente, se discutirá el Plan Espacial Nacional y sus alcances.

1.1 RECURSO SOLAR

El Sol es una fuente de energía con un flujo radiante de $3,8 \times 10^{26}$ W, equivalente a una densidad de 62,5 MW por cada m^2 de superficie solar. De esta emisión solar, llega a la Tierra aproximadamente $1\text{kW}/\text{m}^2$, debido a la distancia a que se encuentra del Sol. La radiación recibida por unidad de superficie procedente de un foco puntual de flujo radiante constante varía en razón inversa al cuadrado de la distancia entre el foco y el receptor (Sol y Tierra, respectivamente).

Las características que distinguen a la energía solar en aplicaciones terrestres dependen de las condiciones meteorológicas, atmosféricas y de la ubicación geográfica. Además, otra propiedad específica de la energía solar a nivel terrestre es su variabilidad como consecuencia de los efectos de absorción y dispersión producidos por la atmósfera y sus componentes (contaminación, nubosidad, aerosoles, etc.).

Por otra parte, los sistemas solares espaciales no presentan esa desventaja de baja disponibilidad por efecto de la nubes, aunque sí dependen de la secuencia día/noche.

El Sol emite radiación electromagnética con una distribución espectral que abarca desde 100 nm hasta 2500 nm, similar a la emisión de radiación de un cuerpo negro a 6000 K. Es por ello que el uso de la energía solar a través de sus aplicaciones diversas requiere de la caracterización de la radiación tanto en su densidad de energía como en su distribución espectral.

A nivel terrestre, tanto la irradiancia solar total como su distribución espectral varían de manera complicada. Las causas son evidentes: al atravesar la atmósfera los rayos solares son a la vez parcialmente absorbidos y dispersados. El espesor efectivo de atmósfera que los rayos solares deben atravesar varía en función del movimiento aparente del Sol sobre la bóveda celeste. También varía la composición de la atmósfera de unos días a otros e incluso de unos instantes a otros y la aleatoriedad en la existencia o no de nubes y en las características de éstas [9].

Puesto que el espesor de la atmósfera terrestre puede considerarse despreciable frente a la distancia Sol-Tierra, las características de la radiación en ausencia de atmósfera corresponden a las que pueden efectivamente medirse mediante satélites, globos aerostáticos, etc., en el espacio exterior inmediatamente próximo a la Tierra.

Los parámetros que caracterizan la radiación solar se establecen para condiciones de distancia media Sol-Tierra y éstos son: la constante solar y la distribución espectral de la radiación.

Se entiende por **constante solar** a la irradiancia sobre una superficie orientada normalmente a la dirección de los rayos solares y situada fuera de la atmósfera terrestre a la distancia astronómica unidad ($1 \text{ AU} \equiv 1,495 \cdot 10^{11} \text{ m}$, distancia media Sol-Tierra).

Desde comienzos del siglo XX se están realizando regularmente medidas de la constante solar mediante instrumentos colocados en globos meteorológicos, aeronaves, y más recientemente, en satélites artificiales. No existe aún evidencia de la constancia de esta magnitud. Algunos autores opinan que las diferencias observadas recientemente pueden deberse a variaciones de la actividad solar relacionadas con las manchas solares, mientras que otros consideran que la variación intrínseca no sería superior al 0,2 % debiendo atribuirse el resto a imprecisiones de las mediciones y del procesamiento de los datos [10].

El valor estándar admitido por la NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) para los criterios de diseño de vehículos espaciales y por la ASTM (*American Society for Testing Materials*) hasta 1986 era de 1353 W/m^2 , con un error estimado de $\pm 1,5\%$ [11]. Es el resultado de medidas efectuadas a una altura de 11,6 km sobre la superficie terrestre y corregidas por los efectos atmosféricos de las capas superiores. Medidas más recientes efectuadas desde satélites [12] así como la aplicación de nuevos métodos correctivos toman como valor aceptado internacionalmente al presente [13]:

$$G_{sc} = 1367 \text{ W m}^{-2} \quad (1.1)$$

Cuando la radiación solar atraviesa la atmósfera terrestre es absorbida y reflejada en forma selectiva, modificando su distribución espectral (Figura 1.1). Se define **masa de aire**, m , al espesor de atmósfera atravesado por la radiación solar para una dirección angular dada respecto del espesor correspondiente al Sol en el zenit (vertical del lugar) [10]. Para ángulos de elevación del sol, δ , comprendidos entre aproximadamente 30° y 90° , la variación de masa de aire atmosférica en función de δ se puede aproximar por:

$$m = 1 / \sin(\delta) \quad (1.2)$$

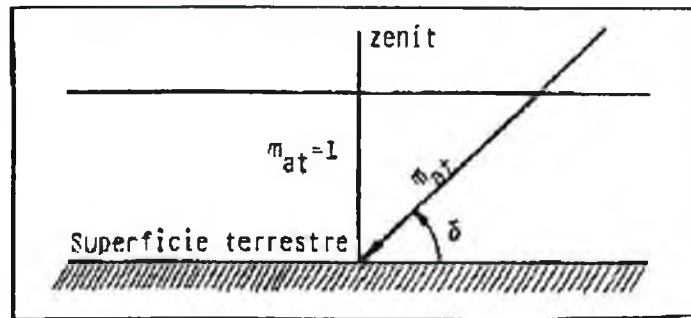


Figura 1.1. Masa de aire [10].

Es evidente que la menor masa de aire corresponde a la incidencia vertical de la radiación solar sobre un punto dado de la Tierra, ya que en tal caso, $\delta = 90^\circ$ y $m = 1$. La Figura 1.2 muestra los espectros AM0, AM1.5 y la contribución de la radiación difusa al espectro AM1.5. Se observan fuertes absorciones por los gases atmosféricos como el ozono (O_3), oxígeno molecular (O_2) y dióxido de carbono (CO_2), por el vapor de agua (H_2O) y por las partículas en suspensión.

La atmósfera en su conjunto reduce la intensidad de las radiaciones solares en todo el espectro, por los procesos de dispersión y absorción. Al primero de ellos, contribuyen principalmente las moléculas del aire, el polvo atmosférico y el vapor de agua.

La absorción de la radiación solar en la región de los rayos ultravioletas, UV, se debe esencialmente a la presencia de ozono estratosférico (entre los 15 km y los 50 km altura) y en el IR, al vapor de agua.

En cuanto a la distribución espectral de la radiación solar [11], también según el estándar NASA/ASTM, se representa gráficamente en la Figura 1.2. La integral sobre todas las longitudes de onda de la distribución de energía para la curva AM0 da como resultado la constante solar: 1367 W/m^2 .

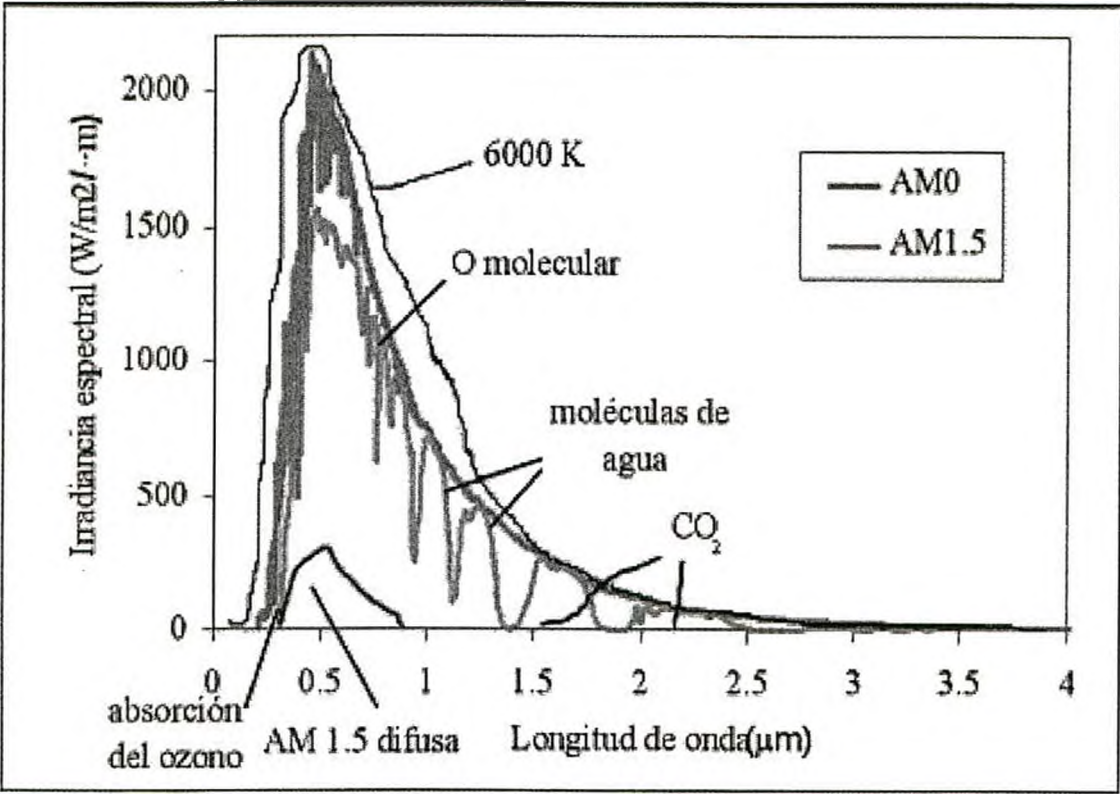


Figura 1.2. Irradiancia espectral de la radiación de cuerpo negro a 6000 K y de la radiación solar AM0 (fuera de la atmósfera terrestre), y AM.1.5 y AM1.5 difusa. Se muestra la absorción del O_3 atmosférico, O_2 molecular, moléculas de agua y CO_2 [14].

1.2 MATERIALES DE INTERÉS FOTOVOLTAICO

El elemento básico de un módulo fotovoltaico es la celda solar. Las celdas solares basan su funcionamiento en el efecto fotovoltaico, descubierto por Henry Becquerel en 1839, quien observó que se generaba una tensión cuando se iluminaba uno de los electrodos en una solución electrolítica. Este efecto fue observado por primera vez en un sólido en el año 1876 en experimentos con selenio [15].

La celda fotovoltaica de silicio se conoce a partir de 1941, pero recién en 1954 fue instrumentada como fuente de potencia marcando una evolución considerable por ser la primera estructura fotovoltaica que lograba convertir luz en electricidad con una eficiencia razonable (6% reportado por RCA y Bell Telephone Laboratories) [16].

Desde 1958 y hasta la primera crisis del petróleo en 1973, las celdas solares tuvieron principalmente aplicaciones en los campos espacial y militar. Algunos años después, los dispositivos fotovoltaicos de silicio tuvieron un gran desarrollo, con un incremento considerable en el uso terrestre y las reducciones en los costos llevaron a una continua expansión en las aplicaciones comerciales.

Hacia fines de la década del setenta, el volumen de celdas producidas para usos terrestres había superado ampliamente al destinado para el uso espacial, lo que produjo una disminución sustancial en los costos de las celdas solares. A pesar de su potencial importancia, los países desarrollados invirtieron cifras extremadamente bajas en investigación científica y tecnológica y en el desarrollo del mercado [17].

En lo que se refiere al funcionamiento de los dispositivos, la conversión fotovoltaica de la energía solar se basa en la propiedad que tienen algunos materiales de absorber radiación electromagnética y convertirla en portadores de carga eléctrica libres. Estos materiales, que son la base de las celdas solares, son los llamados semiconductores.

Los semiconductores (SC) son materiales cuyas bandas de valencia y conducción se encuentran separadas por un "*gap*" de energía, el cual es significativamente menor que en el caso de los aislantes. La cantidad de electrones disponibles a 0 K es tal que ocupan todos los niveles de la banda de valencia, dejando la banda de conducción vacía. Esto significa que el nivel de Fermi se encuentra dentro de la banda prohibida ("*band gap*"), es así que un semiconductor puro y perfecto, a 0K, se comporta como un aislante.

Con el aumento de la temperatura, algunos electrones se liberan del enlace dejando un estado de energía vacío (hueco) el cual puede ser ocupado por un electrón vecino. El movimiento de un electrón de valencia a un hueco como así también de los electrones en la banda de conducción es lo que permite generar una corriente eléctrica [18].

Así, dependiendo de la relación entre la posición del fondo de la banda de conducción y el tope de la banda de valencia en la relación de dispersión, los semiconductores pueden

dividirse en: semiconductores de "gap" directo o de "gap" indirecto.

En semiconductores absolutamente puros, la conducción por electrones y huecos es el producto de la rotura de los enlaces entre sus átomos. Entonces, la concentración de electrones n es igual a la concentración de huecos p ; a estas concentraciones se denominan concentraciones intrínsecas de portadores, n_i , de un semiconductor.

Cuando impurezas especiales, conocidas como dopantes, se introducen en un semiconductor, pueden controlar la concentración relativa de electrones en la banda de conducción y de huecos en la banda de valencia. Estas impurezas pueden ser donoras (cuando aportan electrones a la banda de conducción) o bien aceptoras (por defecto de electrones en la banda de valencia). En el primer caso, la concentración de electrones es mucho mayor que la de huecos y debido a que la corriente se debe esencialmente a los electrones se denomina semiconductores tipo n (negativo). En el segundo caso, la concentración de huecos es mucho mayor que la concentración de electrones, los portadores de la corriente son los huecos y el semiconductor es de tipo p (positivo). Los portadores de estas bandas pueden por lo tanto difundir cuando la perturbación sea apropiada.

Existen distintos tipos de semiconductores. Los semiconductores covalentes son elementos de la columna IV de la tabla periódica, como el Si y el Ge . Otros semiconductores son los compuestos formados por relaciones estequiométricas de elementos de las columnas III y V ($GaAs$, $InSb$, $InAs$), por elementos de los grupos II y VI ($ZnSe$); así como compuestos ternarios ($GaInP_2$, $GaInAs_2$), entre otros.

Los semiconductores cuyas propiedades físicas dependen de la presencia de impurezas se denominan extrínsecos. Para obtener semiconductores de este tipo se introduce en el cristal cierto número de impurezas con una concentración mucho menor que la del constituyente básico. A este proceso se lo llama dopaje.

Si bien el desarrollo tecnológico de la industria microelectrónica trajo aparejado el mayor énfasis en la investigación y desarrollo de las celdas solares de Si , existen otros materiales más apropiados que el Si con los cuales se obtienen celdas de eficiencias muy buenas [19].

Los materiales semiconductores que tradicionalmente han sido utilizados y que continúan en investigación para usos fotovoltaicos son [15]:

- silicio cristalino (mono y policristalino)
- silicio amorfo hidrogenado (*a-Si:H*)
- materiales del tipo III-V con *GaAs*, *InP*, *GaInP*, *AlGaAs*
- materiales del tipo II-VI: *CdS*, *CdTe*
- materiales compuestos: *Cu₂InGaSe₄*, *CuInSe₂* (CIS), *CuInGaSe* (CIGS)

La Tabla 1.1 muestra las eficiencias de conversión de energía solar en electricidad de las celdas de mayor interés en la actualidad.

Tabla 1.1. Eficiencias actuales de celdas a partir de distintos materiales FV.

MATERIALES FV	ESTADO ACTUAL	EFICIENCIAS DE LAS CELDAS EN LA ACTUALIDAD
		Máx $\eta_{\text{comercial}}$ / Máx $\eta_{\text{laboratorio}}$
<i>Si monocrystalino</i>	Producción	18% / 22%(CZ)- 25%(FZ)
<i>Si policristalino</i>	Producción	16% / 20%
<i>Si amorfo</i>	Producción	10% / 12-16% (iniciales)
<i>Si microcristalino</i>	Laboratorio	10% / 14%
<i>GaAs</i>	Producción (para uso espacial)	27% / 27-35%
<i>CuInSe₂</i> (CIS)	comienzo planta piloto	12% / 17%
<i>CdTe</i>	planta piloto/comienzo producción	9% / 14%

A continuación se describen los materiales más utilizados en la industria fotovoltaica, tanto en lo que se refiere a usos terrestres como a aplicaciones espaciales.

1.2.1 SILICIO CRISTALINO

Debido al desarrollo tecnológico de los dispositivos electrónicos, las celdas de *Si* cristalino son las más desarrolladas y usadas comercialmente, aunque las características

electrónicas de este material no son las óptimas. En cuanto a los requerimientos de pureza del *Si* para celdas, es menor que el que se requiere en la industria electrónica, pudiéndose utilizar el material de descarte de ésta última para los dispositivos solares.

Otra de las razones de la mayoritaria utilización y desarrollo de las celdas de *Si* es que éste es uno de los elementos más abundantes en la Tierra, como se observa en la comparación de la Tabla 1.2.

Tabla 1.2. Abundancia en la corteza terrestre de elementos utilizados para la fabricación de celdas solares [9].

Elemento	Abundancia (p.p.m)
<i>Si</i>	$2,6 \times 10^5$
<i>Ge</i>	7
<i>Ga</i>	15
<i>As</i>	5
<i>Cd</i>	0,15
<i>Te</i>	0,003

Tanto las celdas de *Si* monocristalino como las de policristalino se elaboran a partir de obleas cortadas de lingotes (mono o policristalinos). Los lingotes de *Si* monocristalino pueden ser de dos tipos: Czochralski (CZ) o Zona Flotante (FZ) [20]. El método Czochralski es el más usado comercialmente y el más económico. El crecimiento CZ consiste en fundir el *Si* en un crisol con trazas del dopante (por ejemplo boro para obtener un material tipo *p*), y usando una semilla cristalina con la orientación requerida, y bajo condiciones controladas de temperatura y en ambiente de argón se extraen de la fundición lingotes cristalinos de hasta 20 pulgadas de diámetro y 2 metros de largo.

Los cristales tipo zona flotante son mucho más costosos y de mayor pureza. Estos se obtienen por una refundición en forma localizada (≈ 2 a 3 cm) del lingote. De esa forma las impurezas del cristal son expulsadas hacia la superficie del mismo, de tal manera que eliminando ésta se obtiene un lingote de mayor calidad que el original.

Una vez obtenido el lingote se cortan las obleas de un espesor de 300 μ m aproximadamente, siendo el desperdicio ocasionado por el corte uno de los problemas que

inciden en el costo de las celdas de este material.

El *Si* monocristalino se utiliza también para fabricar celdas de alta eficiencia para usos espaciales, aunque presentan el inconveniente de un peso relativamente elevado debido al espesor requerido. La eficiencia más alta alcanzada en celdas a nivel laboratorio de *Si*-FZ es de 25% y en *Si*-CZ es de 22%. Para celdas iluminadas con radiación concentrada se obtuvieron eficiencias de hasta 29% [21].

Las técnicas de fabricación de silicio policristalino son, en general, más sencillas que las requeridas para producir silicio monocristalino, mientras que la pureza del material de partida es similar.

Las distintas etapas del proceso de elaboración de celdas solares a partir de obleas de silicio cristalino se presentan en el Capítulo 4.

Las ventajas de las celdas de *Si* cristalino (mono y poli) se resumen a continuación:

- el *Si* es uno de los elementos más abundantes en la Tierra,
- su estabilidad temporal en la eficiencia es superior a 30 años,
- son las celdas más desarrolladas y estudiadas debido a los avances tecnológicos de la industria electrónica,
- la industria está bien establecida y son celdas utilizadas comercialmente,
- sus cualidades eléctricas, químicas y mecánicas son uniformes,
- el armado del sistema, los costos de mantenimiento e inversión son bastante bajos
- y, en comparación con otros materiales fotovoltaicos (celdas de *a-Si:H*, *CdTe* y *CIS*), el silicio posee una eficiencia relativamente alta.

Entre las desventajas del silicio mono y policristalino se enumeran las siguientes:

- el sustrato de *Si* es todavía relativamente caro debido a las pérdidas en el corte,
- los módulos no pueden obtenerse por integración monolítica, ya que las celdas están limitadas por las medidas y deben soldarse e interconectarse en serie,
- el *Si* tiene "*gap*" indirecto lo cual hace que las obleas deban ser relativamente gruesas ($\approx 300\text{-}400\mu\text{m}$), resultando una limitación para las aplicaciones en satélites.

1.2.2 SILICIO AMORFO HIDROGENADO (*a-Si:H*)

Las condiciones para crecer el *Si* amorfo son mucho menos críticas que las del *Si* policristalino. El *Si* amorfo difiere del cristalino en que no posee un orden de largo alcance en la estructura atómica del material. Los ángulos entre las ligaduras son similares a las del *Si* cristalino, pero pequeñas desviaciones resultan en la rápida pérdida del orden de largo alcance. Por ello, existen dentro de la estructura del cristal, ligaduras no saturadas que producen una gran densidad de defectos dentro de la banda prohibida.

El silicio amorfo puede depositarse sobre distintos sustratos, tales como metal [22], vidrio [23] o *Si* cristalino [24, 25] facilitando la interconexión de los dispositivos.

Para el crecimiento de la película de *a-Si:H* se utiliza la deposición química en fase vapor asistido por plasma (*PECVD-Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition*) a relativamente baja temperatura (alrededor de 200°C) siendo típicamente el espesor de película obtenido del orden de las decenas del nm [26, 27].

Dado que la conductividad de los materiales que conforman el emisor es baja, se deposita un contacto transparente, comúnmente óxido de indio dopado con estaño, ITO (*Indium Tin Oxide*), sobre la cara frontal, el cual actúa también como capa antirreflectante. La técnica más usual para el depósito del mismo es el “*sputtering*” con el sustrato a una temperatura de alrededor de 250°C [28].

Las primeras celdas comerciales basadas en *a-Si:H* aparecen en 1980 y su eficiencia rondaba el 5% [15]. A partir de allí, este tipo de dispositivo comienza a utilizarse en productos como relojes, calculadoras, juguetes, etc. En los años 90, la eficiencia alcanzada en celdas de *a-Si:H* a nivel laboratorio es de aproximadamente 12% [29].

Las celdas basadas en *a-Si:H* permiten obtener dispositivos de eficiencia razonable con técnicas sencillas. Entre las ventajas que presenta este tipo de celdas se encuentran el bajo costo del material debido al poco requerimiento del mismo en la celda y la posibilidad de depositar el *a-Si:H* en áreas grandes (del orden del m²).

Entre las desventajas de este material para su uso en dispositivos fotovoltaicos se encuentran, por ejemplo que la eficiencia del módulo disminuye de un 10 a 30% hasta alcanzar su valor estable y la relativamente baja eficiencia de las celdas elaboradas a escala industrial.

1.2.3 ARSENIURO DE GALIO (*GaAs*)

El arseniuro de galio (*GaAs*) es un semiconductor cuyo ordenamiento cristalino se denomina estructura “*zinc-blende*” similar a la estructura diamante y del *Si* cristalino pero con dos átomos diferentes por celda unidad del cristal.

Sus propiedades electrónicas permiten lograr celdas con mayor eficiencia de conversión. En particular, poseen un “*gap*” más apropiado y un coeficiente de absorción de la radiación solar más elevado.

Como el “*gap*” del *GaAs* está cerca del ideal, como se muestra en la Figura 1.3, y dado su desarrollo tecnológico, las celdas solares con mayor eficiencia están realizadas a partir de este material [31].

En condiciones terrestres se alcanzaron eficiencias superiores al 27% [30], mientras que con estructuras más complicadas tipo tandem (*GaAs/GaSb*) se obtuvieron eficiencias de 35% bajo iluminación concentrada (100X) [31].

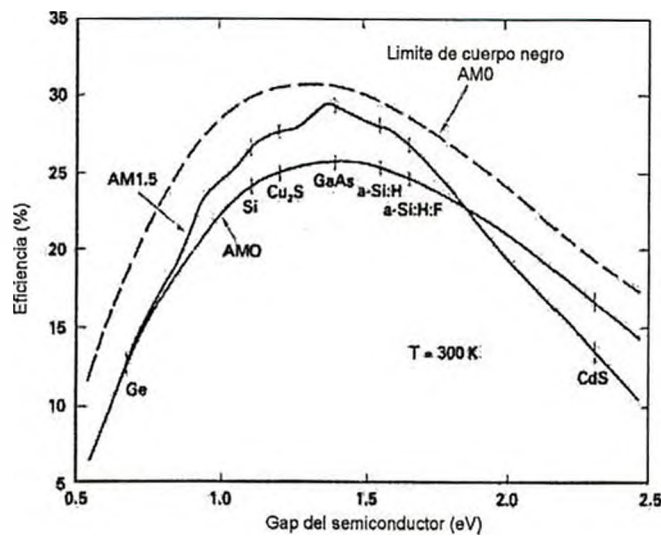


Figura 1.3. Eficiencia de una celda solar en función del ancho del “*gap*” [15].

Dado que el *GaAs* es un semiconductor de “*gap*” directo, la luz es absorbida muy cerca de la superficie del dispositivo, necesitando unos pocos micrones de espesor para la fabricación de una celda.

Como desventajas se pueden mencionar la escasez del galio en la naturaleza, lo que hace que el *GaAs* sea un material costoso, y la toxicidad del arsénico involucrado en la

fabricación. Por ello es importante estudiar cuidadosamente las consecuencias ambientales de la instalación de grandes sistemas solares basados en este semiconductor.

La formación del arseniuro de galio se realiza en un horno en el cual se colocan el *Ga* y el *As* en distintas naves y a distintas temperaturas ($\approx 1238^\circ\text{C}$ y 610°C , respectivamente). Se transporta el vapor de *As* en cantidad controlada hacia el *Ga*, formando *GaAs*. En general, en este proceso se obtiene un material policristalino. Este policristal puede ser recrystalizado por distintas técnicas y obtener *GaAs* monocristalino. Los dopantes utilizados comúnmente para el *GaAs* son *Zn* y *Cd*, tipo *p*, y *Te*, *Se*, *S* y *Sn* como dopante tipo *n*. La formación de la juntura en el *GaAs* se realiza mediante crecimiento epitaxial en lugar de por difusión de dopantes.

La tecnología del *GaAs* ha sido bien desarrollada ya que tiene un interés comercial para la fabricación de *LEDs* (“light-emitting diode”) y en láseres de semiconductores. Otro aspecto en esta tecnología ha sido la utilización de aleaciones de *GaAs* y *AlAs*. Este último material tiene una estructura similar al *GaAs* con un “gap” indirecto ($E_g = 2,2 \text{ eV}$), y un parámetro de red similar, que solo difiere en 0,14 %. Este tipo de aleaciones, denominadas generalmente como $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ (donde *x* es la proporción de *Al*), tienen un parámetro de red y un “gap” intermedio entre el *GaAs* y el *AlAs*. Debido a esta similitud entre los parámetros de red, las heterojunturas entre *GaAs*, *AlAs* y $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ tienen baja densidad de defectos en las interfaces, y consecuentemente, están cerca de las propiedades ideales.

1.3 EL PLAN ESPACIAL NACIONAL

El Plan Espacial Nacional, actualmente en ejecución y cuyo organismo ejecutor es la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE), define el marco que orienta las actividades para que la Argentina acceda al espacio exterior con medios e instrumentos propios. La gran extensión geográfica, una actividad económica dominada por explotaciones primarias extensivas, las necesidades de telecomunicaciones y la existencia de grandes zonas productivas vulnerables a catástrofes naturales, entre otros aspectos, permiten afirmar que la Argentina es una “país espacial”: hace y hará un uso intensivo de los productos de la ciencia y la tecnología espaciales [32].

El Plan Espacial Nacional prevé misiones que involucran dos tipos de satélites: de

aplicaciones científicas (SAC), y de observación y comunicaciones (SAOCOM).

El **Plan Espacial Nacional** debe considerarse como parte y continuación de los esfuerzos de desarrollo tecnológico realizados en el país. Desde su mismo punto de partida aprovecha un importante umbral de conocimientos y logros científicos y tecnológicos obtenidos por instituciones del quehacer científico y tecnológico nacional. Estas son: INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria), INTI (Instituto Nacional de Tecnología Industrial), CONICET (Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas), CNEA (Comisión Nacional de Energía Atómica), Universidades y otros organismos.

El programa espacial argentino ha obtenido buenos resultados con métodos asociativos, que permiten a todos los países participantes de una misión argentina reducir sus costos de acceso y operación en el espacio. Esto, más una ingeniería de muy buena calidad y costos de construcción muy moderados han hecho que las agencias espaciales de los **Estados Unidos, Francia, Italia, Dinamarca y Brasil** colocaran sus propios aparatos o servicios en satélites argentinos.

Por su disposición para las alianzas estratégicas y el buen funcionamiento de sus misiones (que van desde el diseño de la plataforma a la fabricación de sus partes, y desde la integración final de éstas hasta el control del satélite ya instalado en órbita), la Argentina empieza a ser vista como socio espacial confiable por muchos países desarrollados.

1.3.1 Provisión de energía para satélites

Un satélite artificial consta básicamente de dos partes que corresponden a dos funciones bien diferenciadas: el equipamiento encargado de cumplir con la misión específica y la plataforma de servicios, que incluye el subsistema de generación, almacenamiento y distribución de energía a los componentes del satélite.

La potencia eléctrica es uno de los recursos claves de los sistemas espaciales. La demanda de potencia ha ido aumentando con el correr de los años, siempre dentro de las limitaciones que impone una misión espacial en cuanto al peso admisible y disponibilidad de espacio para el subsistema de generación. Los generadores solares fotovoltaicos (FV) han sido y continuarán siendo la mejor opción como fuente de potencia para satélites de órbita baja (LEO – *Low Earth Orbit*) y geoestacionaria (GEO – *Geostationary Earth Orbit*). Su

utilización se remonta a los comienzos de la carrera espacial, más precisamente al lanzamiento del Vanguard I en 1958 [8]. Las características de la órbita (altura, excentricidad, frecuencia y duración de los eclipses, etc.) determinan la disponibilidad de energía solar y, fundamentalmente, el tipo de radiación que deberán soportar los paneles FV.

Los principales parámetros que caracterizan un panel solar para uso espacial son la disponibilidad de potencia en condiciones de operación y la relación peso/potencia. La evolución del diseño de este tipo de paneles ha pasado por diversas variantes, aunque en general el avance ha sido relativamente lento (comparado con aplicaciones terrestres de la energía FV) debido a los requerimientos de alta confiabilidad de las misiones espaciales. Los materiales casi excluyentes utilizados en la elaboración de las celdas solares espaciales son el *Si* y los compuestos basados en el *GaAs*, como se ha mencionado anteriormente.

1.3.2 Misiones de la serie SAC

Como contratista principal de la CONAE, la empresa rionegrina Investigaciones Aplicadas (INVAP SE) ha desarrollado para la agencia espacial argentina plataformas sumamente compactas, pero de muy alto nivel de integración: son capaces de alojar muchas cargas útiles de distintos países y de diversos propósitos, privilegiando la observación de la Tierra [33].

A la fecha se han construido y puesto en órbita tres satélites de la línea SAC (Satélite de Aplicaciones Científicas): en el año 1996 se lanzó el SAC-B, un satélite astronómico; en 1998, el SAC-A, destinado a ensayar sistemas ópticos, de energía, de guiado y control, y por último, se construyó el SAC-C, el cual fue lanzado en el año 2000 y continúa funcionando correctamente. Para este satélite, se triplicó el nivel de integración habitual en la industria espacial ya que en una plataforma de apenas 460 kilogramos, el SAC-C reúne ocho cargas útiles pertenecientes a cinco de los seis países asociados en la misión. De dichas cargas, las más importantes son sus tres cámaras ópticas de observación de la superficie terrestre ya que fueron desarrolladas en la Argentina. Se empleó una combinación de bandas ópticas, resoluciones y sensibilidades que resulta óptima para el monitoreo del ambiente terrestre y marítimo del país (Figura 1.4).

Tanto la construcción como los ensayos de los tres satélites resultaron exitosos y dos

de ellos fueron puestos en órbita sin inconvenientes, mientras que la misión del SAC-B se malogró por deficiencias del vehículo estadounidense de puesta en órbita, el lanzador **Pegasus XL** (Figura 1.5).

Hay prevista una nueva misión SAC: el **SAC-D**, un satélite de mucho mayor tamaño y peso que los anteriores. El SAC-D llevará cámaras ópticas provistas por INVAP y un sensor radar en banda L llamado **Aquarius**. Este instrumento será utilizado por la **NASA** para monitorear y realizar un mapa de la salinidad superficial oceánica, como parte de sus estudios científicos globales sobre la biosfera.



Figura 1.4. Imagen satelital tomada por el SAC-C de las Islas Malvinas [33].



Figura 1.5. SAC-B dentro del lanzador Pegasus XL [33].

Por su parte, la Argentina se beneficiará con la importante información práctica que obtendrá del Aquarius sobre sus propias pesquerías marítimas y sus aguas subterráneas.

1.3.3 Misión SAOCOM

Los satélites SAOCOM, de los cuales se fabricarán al menos dos ejemplares, pesarán aproximadamente 1600 kilogramos cada uno.

Su principal objetivo será el monitoreo y la prevención de catástrofes naturales, y su instrumento más importante será el Radar de Apertura Sintética, **SAR**. El radar del SAOCOM emitirá microondas a alta potencia, con una antena de 2,5 m x 10 m.

Como vigía de catástrofes, la antena SAR podrá pronosticar situaciones de emergencia e inspeccionar mientras suceden, en forma independiente de la hora o la meteorología. A diferencia de las cámaras comunes, el radar es capaz de “ver” a través de las nubes o de noche, y así detectar agua bajo cobertura de árboles, medir los cambios de altura de un domo volcánico a punto de reventar, e incluso penetrar profundamente en el suelo y discernir ríos o estructuras subterráneas, o estimar si la profundidad de las napas freáticas supone riesgo de inundación, o de sequía.

El radar del SAOCOM permite apuntar o hacer oscilar el haz de una antena fija como si ésta fuera móvil. Esto permite enfocar lo que se desee en la superficie terrestre sin el riesgo y las complicaciones mecánicas de tener que mover una gran antena a centenares de kilómetros de altura, o gastar energía moviendo todo el satélite. Como emitirá microondas en la banda L, esta antena SAR podrá detectar objetos mayores de ocho metros.

Es probable que esta capacidad del SAOCOM de generar imágenes de radar finas y en tiempo real se combine con los resultados de al menos dos cámaras ópticas a bordo. Habrá una cámara infrarroja, capaz de detectar fuentes de calor y prevenir incendios en zonas despobladas, y una cámara nocturna, capaz de funcionar de noche con luz residual proveniente de la Luna o de las estrellas.

Cabe destacar que el SAOCOM dará acceso a las imágenes de otros satélites. Así como el SAC-C vuela en constelación, la primera del mundo, con tres satélites ópticos estadounidenses cuya información se comparte, los de la serie SAOCOM volarán con cuatro

aparatos italianos, los **RADARSAT**, los cuales serán dotados de radar que usan una frecuencia complementaria (la X en lugar de la L). La combinación de bandas X y L es excelente para el tipo de emergencias que suelen ocurrir en Argentina: en caso de una inundación en zona boscosa, por ejemplo, la X de los satélites italianos puede detectar la copa de los árboles, sin penetrarla, y la L de los SAOCOM argentinos, detectar el agua debajo. Es probable que la **NASA**, socia habitual de la **CONAE**, intervenga también en los SAOCOM con componentes críticos de la plataforma.

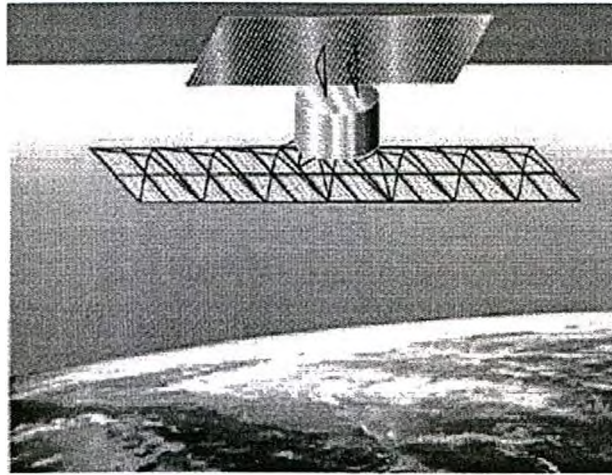


Figura 1.6. Esquema del satélite SAOCOM 1 [34].

El trabajo realizado para esta Tesis, en cuanto a la elaboración y caracterización de celdas y paneles solares, se enmarca dentro de la misión satelital SAOCOM. En la próxima sección se describe la participación de la CNEA en esta misión para dar el marco de referencia a los temas específicos desarrollados en este trabajo.

1.4 VINCULACION ENTRE LA CNEA Y LA CONAE

Teniendo en cuenta las elevadas inversiones requeridas para la provisión de energía eléctrica en los satélites argentinos mediante sistemas FV importados y la experiencia previa del Grupo Energía Solar (GES) de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) en el tema, a fines de 1995, la CNEA y la Comisión Nacional de Actividades Espaciales suscribieron un Acuerdo para la realización del primer “Experimento de celdas solares argentinas en el espacio”. Dicho convenio posibilitó que en diciembre de 1998 se concretaran

dicho experimento a bordo del satélite SAC-A.

Luego, la CNEA y la CONAE suscribieron, a fines de marzo de 2001, un nuevo convenio de cooperación cuyo objetivo es proveer los paneles solares de vuelo para el satélite de observación argentino SAOCOM, por el cual se inició el Subproyecto Paneles Solares como parte del Proyecto SAOCOM de la CONAE. El **Convenio Específico** mencionado se encuadra en el marco de la Ley No 23.877, actuando como Unidad de Vinculación Tecnológica la Asociación Cooperadora del Departamento de Física de la CNEA (ACDEF).

Su ejecución 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.

1.4.1 SAC-A

El segundo satélite construido para la CONAE fue el **SAC-A**, un aparato pequeño de demostración que sirvió para poner a prueba los sistemas ópticos, de energía, de navegación, de transmisión de datos y de control terrestre de las futuras plataformas SAC y verificar el funcionamiento de las celdas de *c-Si* elaboradas en el GES. Su construcción demandó 8 meses, con un costo total de la misión de 15 millones de dólares.

El SAC-A fue puesto en órbita por el Transbordador Espacial **Endeavour** el 14 de diciembre de 1998, con una vida útil estimada de 8 meses. Este satélite cayó y ardió en la atmósfera en octubre de 1999. El instrumental a bordo del SAC-A era:

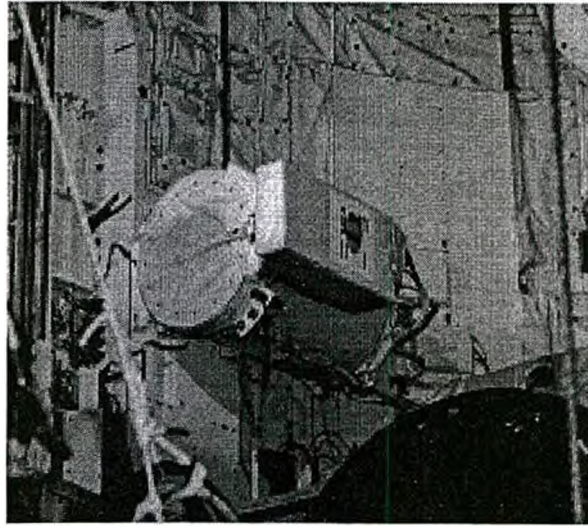


Figura 1.7. SAC-A en la bodega de carga del Shuttler Endeavour.

- **Sistema de Posicionamiento Global Diferencial (DGPS):** Este experimento suministró datos actualizados para la calibración de la posición y actitud de la nave en sus tres ejes, además de su situación orbital.
- **Cámara Terrestre (CCD):** Esta cámara, construida sobre la base de una cámara fotográfica comercial, fue acondicionada para operar en el espacio y suministrar imágenes para la observación de la Tierra.
- **Paneles solares de celdas de silicio:** Para realizar ensayos de rendimiento y calificación de los Paneles de Celdas de Silicio en la Comisión Nacional de Energía Atómica, se instaló un panel solar secundario y sensores gruesos de posición elaborados a partir de silicio monocristalino. Durante la misión se logró analizar el rendimiento y la degradación de las características eléctricas de las celdas en un medio de microgravedad. Estos dispositivos proveyeron información sobre la corriente de cortocircuito (I_{cc}), la tensión a circuito abierto (V_{ca}) y la potencia eléctrica entregada ($P_{máx}$) con el propósito de validar el diseño y el rendimiento. Otro panel de idénticas características fue ensayado en tierra y estos resultados se encuentran en buen acuerdo con los datos medidos en vuelo.
- **Magnetómetro:** Este instrumento provisto por la NASA, sirvió para medir escalarmente el campo magnético de la Tierra y proveyó datos para el control de actitud.

La Tabla 1.3 resume las principales características del satélite SAC-A.

Tabla 1.3. Características del satélite SAC-A

Perfil de la Misión	Características
Vida media de diseño	1 año
Masa del satélite	68 kg
Carga útil	Instrumentos científicos y de observación terrestre
	Características de la órbita
Tipo	Circular
Altura	380 km
Inclinación	51,6 grados
Error seguimiento terrestre	± 10 km (EOL – “ <i>End of Life</i> ”)

En el marco de este primer convenio se desarrollaron técnicas de caracterización electrónica de obleas difundidas, para la determinación de la vida media y la longitud de difusión de portadores minoritarios. Se realizó un estudio teórico del daño por irradiación de celdas solares con protones y se llevaron a cabo experiencias en el país de bombardeo de celdas con protones y neutrones.

La misión del SAC-A dejó más de 10 meses de experiencia tanto en la CONAE, como en el GES-CNEA y en INVAP. Para la CONAE, en la bajada de datos e imágenes, así como en las maniobras de control desde la Estación Terrena Córdoba (ETC). Para el GES-CNEA permitió el análisis de los datos recibidos por telemetría, que llevaron a probar el desempeño de las celdas argentinas en el espacio y a conocer el comportamiento de los parámetros característicos del panel y de los sensores gruesos de posición [4, 5].

1.4.2 SAOCOM

La CNEA tiene una participación relevante en el proyecto SAOCOM a través de los subproyectos **Paneles Solares** y **Antena Radar de Apertura Sintética (SAR)**, los que involucran aproximadamente 50 profesionales y técnicos del Centro Atómico Constituyentes

(CAC). Estos subproyectos tienen por objetivo realizar actividades de investigación y desarrollo tecnológico que permitan diseñar, fabricar, ensayar y calificar los paneles solares y la antena radar para dicho satélite. La antena SAR es el principal instrumento de la misión mientras que los paneles solares constituyen el componente principal del subsistema de potencia. Los desarrollos en ejecución tendrán su continuidad a través de la participación de la CNEA en las próximas misiones satelitales, en particular la del SAC-D.

Los objetivos del subproyecto Paneles Solares son:

- Montaje de un laboratorio para la integración de paneles solares (Área Limpia CLASE 10 000) [36].
- Diseño y elaboración de celdas solares de *c-Si* para su calificación en el espacio.
- Desarrollo de los procesos de caracterización de celdas y paneles y la integración de las celdas al módulo solar.
- Montaje de laboratorios para ensayos sobre componentes, dispositivos y paneles.

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. Los períodos de eclipse serán 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 nominal de carga de las baterías será de 50 V [6]. 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.

El consumo de energía del satélite combinado con el área disponible, determinaron la necesidad de utilizar las celdas solares de mayor eficiencia disponibles en el mercado espacial internacional: celdas solares avanzadas de triple juntura *InGaP₂/InGaAs₂/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 confiabilidad, se realizó un diseño preliminar de los paneles solares con las siguientes características principales:

- 80 cadenas de 32 celdas en serie cada una, o sea un total de 2560 celdas.
- 1 diodo de paso integrado en cada celda.
- 1 diodo de bloqueo por cadena.
- 2 interconectores de Mo plateado por celda.
- 1 cubierta de vidrio resistente a la radiación, de 100 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 panal de abeja de Al, recubierta por fibra de carbono y con una capa de aislante eléctrico a definir (kapton, tedlar o fibra de vidrio).

Tanto la integración de los paneles para ensayos como así también los módulos de ingeniería y de vuelo se elaborarán en el Laboratorio de Integración de Paneles Solares del Grupo Energía Solar de la CNEA [7, 35, 36].

Para poner a punto los procesos de integración, se elaboraron celdas de silicio cristalino y este trabajo formó parte de la presente Tesis, el tema se discutirá en detalle más adelante.

Si bien al presente está claramente definido que las celdas de *c-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 *c-Si* nacionales para futuros satélites con menores requerimientos de potencia [37].

En el GES se desarrolló un programa de simulación del funcionamiento de sistemas de potencia para satélites cuyo objetivo es predecir la evolución temporal del estado de carga de la batería, la corriente y la tensión del sistema a lo largo de la vida del satélite. La verificación del correcto funcionamiento del programa se realizó a partir de datos experimentales de las curvas corriente-tensión de celdas de doble y triple juntura.

Las actividades realizadas durante la Tesis, algunas de ellas hechas en colaboración, incluyen la caracterización de celdas, sensores y paneles de homojuntura de silicio cristalino, como así también de celdas comerciales de triple juntura para aplicaciones espaciales y de módulos de ingeniería para ensayos. Los detalles se darán en los capítulos subsiguientes.

Referencias Capítulo 1

- 1 M. Raja Reddy. *Space solar cells-tradeoff analysis*, Solar Energy Materials & Solar Cells **77**, pág. 175 (2003).
- 2 C.G. Bolzi, C.J. Bruno, J.C. Durán, E.M. Godfrin, M.G. Martínez Bogado, L.M. Merino, J.C. Plá, M.J.L. Tamasi y M.P. Barrera. *SAC-A satellite first experiment of argentine solar cells in space*, Proceedings of the 28th. IEEE Photovoltaic Specialists Conference, pág. 1344 (2000).
- 3 C.G. Bolzi, L.M. Merino, M.J.L. Tamasi, J.C. Plá, J.C. Durán, C.J. Bruno, E.M. Godfrin, A. Lamagna, M.P. Barrera, L.B. Quintero. *Elaboración y caracterización de celdas y paneles solares de silicio cristalino para su ensayo en el satélite SAC-A*, Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente **1** (2), pág. 1 (1997).
- 4 E.M. Godfrin, M.G. Martínez Bogado, M.J.L. Tamasi y J.C. Durán. *Determinación de parámetros característicos de celdas solares en el espacio a partir de mediciones recibidas por telemetría*, Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente **4** (1), pág 04.17 (2000).
- 5 C.G. Bolzi, C.J. Bruno, J.C. Durán, E.M. Godfrin, M.G. Martínez Bogado, L.M. Merino, J.C. Plá, M.J.L. Tamasi y M.P. Barrera. *First experiment of Argentine solar cells in space: modules fabrication, characterisation, and telemetry data analysis from SAC-A satellite*. Solar Energy Materials & Solar Cells **73**, pág. 269 (2002).
- 6 E.M. Godfrin y J.C. Durán. *Paneles solares para la misión satelital SAOCOM: Primeras etapas de diseño*, Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente **6**, pág 04.19 (2002).
- 7 C.G. Bolzi, C.J. Bruno, E.M. Godfrin, M.G. Martínez Bogado, J.C. Plá, S.E. Rodríguez, M.J.L. Tamasi, M.A. Alurralde, P. Cabot, E. Carella, J. Fernández Vázquez, C.D. Franciulli, V. Goldbeck, E. Mezzabolta, F. Antonuccio, S.L. Nigro y J.C. Durán. *Convenio de cooperación CONAE-CNEA: desarrollo, fabricación y ensayo de paneles solares para misiones satelitales argentinas*, Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente **5**, 04.07 (2001).
- 8 P.A. Iles. *Evolution of space solar cells*, Solar Energy Materials & Solar Cells **68**, pág. 1

(2001).

9 D.H. Ford et al.. *High Power, Commercial Silicon-FilmTM Solar Cells*. Proc. of 25th. IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington, D.C., pág. 601 (1996).

10 R. Piacentini. *Solarimetría III Jornadas Iberoamericanas en Energías Renovables, AECI-CIF*, Santa Cruz de la Sierra, Bolivia (2001).

11 ASTM-2000: ASTM E490 *Solar Constant and zero air mass solar spectral irradiance tables*; ASTM West Conehohocken US, pp. 1–16 (2000).

12 S. J. Fonash. *Solar Cell Device Physics*, Academic Press (1981).

13 ISO/TC 20/SC 14 N 165. ISO/DIS 15387 (1997). Compilado por C. Wehrli, Physikalisch-Meteorologisches Observatorium World Radiation Center, Davos, Suiza (1985).

14 S.R. Wenham, M.A. Green, M.E. Watt. *Applied Photovoltaics*, ed. University of New South Wales, Australia (1992).

15 M.A. Green. *Solar cells-Operating Principles, Technology and System Applications*, Published by The University of New Soth Wales (1996).

16 G.L. Pearson and W.H. Brattain. *History of Semiconductor Research*, Proc. IRE, vol. 43, pp. 1794-1806, (1955).

17 Informe elaborado por el Grupo Energía Solar. *Energía Solar Fotovoltaica*, Departamento de Física, Centro Atómico Constituyentes, Comisión Nacional de Energía Atómica (2000).

18 A. Haug. *Theoretical Solid State Physics 2*, Pergamon Press (1979).

19 J.C. Plá, E. Centurioni, C. Summonte, R. Rizzoli, A. Migliori, A. Desalvo, F. Zignani. *Homojunction and heterojunction silicon solar cells deposited by low temperature-high frequency plasma enhanced chemical vapour deposition*, Thin Solid Films **405**, pág. 248 (2002).

20 M.A. Green. *Solar Cells – Operating Principles, Technology and System Applications*, ed. University of New South Wales, Australia (1986).

21 Renewable Energy World. *Photovoltaic technology, performance manufacturing, cost and markets*, pag. 62 (1999). Renewable Energy World, James & James (Science Publishers) Ltd.,

- 35-37 William Road, London NW1 3ER, Reino Unido, Vol. 3, N° 1 (enero-febrero 2000) y 2 (marzo-abril 2000).
- 22 S. Guha, et al. Proceedings of 26th. IEEE Photovoltaic Specialists Conference, pág. 607 (1997).
- 23 T. Sasaki et al. *Deposition of microcrystalline silicon by electron beam excited plasma*, Solar Energy Materials & Solar Cells **49**, pág. 81 (1997).
- 24 M. Imaizumi et al. *Growth of microcrystalline silicon film by electron beam excited plasma CVD without hydrogen dilution*, 2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion, Viena, Austria, pág. 1758 (1998).
- 25 T. Ito et al. *Hydrogen content in microcrystalline silicon films formed by electron beam excited plasma CVD*, 2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion, Viena, Austria, pág. 774 (1998).
- 26 E. Centurioni. *Tesis de Doctorado: Deposizione e Caracterizzazione di leghe de silicio nano-microcristallino ottenuto mediante VHF PECVD: Applicazione a dispositivi fotovoltaici*, Università degli Studi di Bologna, Facoltà di Ricerca in Ingegneria dei Materiali (1999).
- 27 G. Ambrosone et al. *Influence of R.F. Power on Optical, Electrical and Structural Properties of a-Si:H Alloy Grown in SiH₄+CH₄ and SiH₄+C₂H₂*, 2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion, Viena, Austria, pag. 770 (1998).
- 28 J.C. Plá et al. *Optimization of ITO for applications in a-Si/c-Si heterojunction solar cells*, Thin Solid Films **425** 1(2), pág. 185 (2002).
- 29 Y. Ashida et al. *Preparation of High Quality Wide Gap a-Si:H films an its Application to A-Si Solar Cells*, Conference Record, 21st IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Hawaii, pág. 452 (1994).
- 30 M.A. Stan, D.J. Aiken, P.R. Sharps, N.S. Fatemi, F.A. Spadafora, J. Hills. *27.5% Efficiency InGaP/InGaAs/Ge advanced triple junction (ATJ) space solar cells for high volume manufacturing*, Proc. 29th IEEE, PVSC (2002).
- 31 A.W. Bett et al.. *Development of Ga_{0.51}In_{0.49}P/GaAs Tandem Solar Cells on an Industrial*

Size MOVPE Reactor, 16th. European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Glasgow, United Kingdom (2000).

32 Plan Espacial Nacional - Argentina en el Espacio, 1995-2006. Comisión Nacional de Actividades Espaciales. Decreto (1994). Actualizaciones para los períodos 1997-2008 y 2004-2015.

33 <http://www.invap.com.ar>

34 <http://www.conae.gov.ar>

35 Informe técnico interno Subproyecto Paneles Solares para Uso Espacial. *Instalación del laboratorio e integración – Obra civil: descripciones técnicas y especificaciones*. CAC-PSE-OCEM-0030A-IN.

36 Informe técnico interno Subproyecto Paneles Solares para Uso Espacial. *Clasificación de Áreas Limpias FED-STD-209D Instalación del laboratorio e integración – Obra civil: descripciones técnicas y especificaciones*. CAC-PSE-OCEM-0030A-IN.

37 Informe técnico interno Subproyecto Paneles Solares para Uso Espacial. *Clasificación de celdas solares de Si*. CAC-PSE-SIMUL-0010A-IN.

Capítulo 2

PROPIEDADES BÁSICAS DE SEMICONDUCTORES Y JUNTURAS

En este Capítulo se presentan en forma resumida las propiedades físicas de semiconductores e interfaces relacionadas con los temas centrales de la Tesis.

En particular, se describen los distintos tipos de interfaces de semiconductores, con especial énfasis en aquéllas que se emplean en la fabricación de celdas solares [1]. Se presentan también los modelos de transporte tanto para las homojunturas como para las heterojunturas.

2.1. PROPIEDADES ÓPTICAS DE SEMICONDUCTORES

Se analizan a continuación las propiedades ópticas de los semiconductores (SC) empleados para la fabricación de dispositivos fotovoltaicos y se realiza una breve descripción de los mecanismos que conducen a la absorción de radiación electromagnética en dichos materiales, los cuales están fuertemente relacionados con las propiedades electrónicas de los mismos [1].

1. **Absorción por portadores libres:** se caracteriza por un coeficiente de absorción, α , con transiciones del electrón (o el hueco) desde un estado simple de una partícula a otro dentro de una misma banda (transiciones intrabanda). Es importante si hay un número significativo de dichos portadores en una banda.
2. **Absorción por fonones:** ocurre normalmente en la región del infrarrojo del espectro y es causada, en materiales covalentes, por el cambio en el momento dipolar por procesos de un fonón [1]. Asimismo, los defectos e impurezas pueden permitir un proceso de absorción de un fonón ya que destruyen la periodicidad.
3. **Transiciones interbanda:** los electrones van desde estados de una partícula de la

banda de valencia, a estados de una partícula en la banda de conducción por la absorción de un fotón.

4. **Otros:** formación de excitones, transiciones banda-estado localizado, transiciones estado localizado-estado localizado.

La forma de caracterizar la absorción de radiación en un material es a través del coeficiente de absorción $\alpha = \alpha(\lambda)$, donde λ es la longitud de onda de la radiación en cuestión. El coeficiente de absorción se define como la tasa relativa de decrecimiento de la intensidad de la radiación a lo largo de su camino de propagación [2]:

$$\alpha(\lambda) = - \frac{1}{I(\lambda)} \frac{d[I(\lambda)]}{d(x)} \quad (2.1)$$

En semiconductores cristalinos, la absorción por transiciones interbanda está caracterizada por un marcado incremento en el coeficiente de absorción para frecuencias ν tales que $h\nu \geq E_g$. La Figura 2.1 muestra la variación del coeficiente de absorción en función de la longitud de onda para algunos SC de interés fotovoltaico.

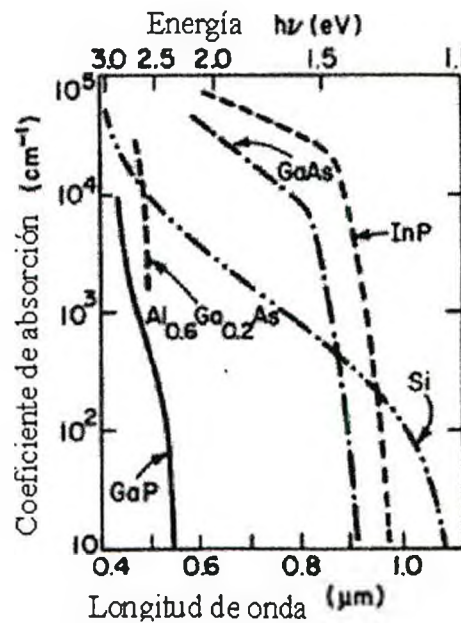


Figura 2.1. Coeficiente de absorción en función de la longitud de onda [1].

La forma funcional de $\alpha = \alpha(\lambda)$ dependerá de si el semiconductor es de “gap” directo

ó indirecto. Dicha forma funcional, en la zona definida por las transiciones interbanda, es una propiedad del material muy importante para celdas solares, pues este tipo de procesos generan portadores libres en estados deslocalizados.

En los ejemplos de la Figura 2.2 se tienen las estructuras de bandas correspondientes a un semiconductor cristalino de “gap” directo (*GaAs*) y otro de “gap” indirecto (*Si*).

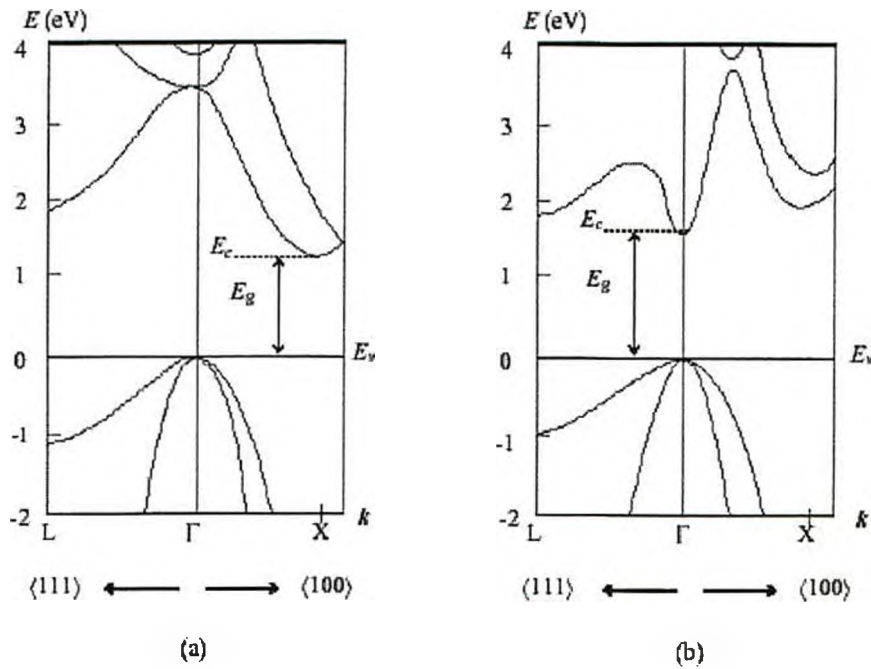


Figura 2.2. Estructura de bandas para semiconductores cristalinos: (a) *Si* y (b) *GaAs* [1]

Para el caso del material de “gap” directo, un electrón puede ser excitado desde el tope de la banda de valencia hasta el fondo de la banda de conducción sin que se requiera ningún cambio en el vector k . Dado que en la escala de la figura puede decirse que el momento de un fotón es prácticamente nulo, no hay problemas para la conservación del vector k en interacciones electrón-fotón que resulten en un electrón excitado a través de un “gap” directo.

Este no es el caso en un semiconductor de “gap” indirecto. Un electrón excitado a través de un “gap” indirecto debe cambiar su vector k . El fotón no puede proveer dicho cambio, de modo que es necesaria la participación de un fonón. Los fonones pueden suministrar el momento necesario, pero ahora se deben conservar la energía y momento totales para las tres partículas: electrón, fotón y fonón. Esta necesidad de una interacción de tres partículas en un material de “gap” indirecto, tiende a disminuir la magnitud de α .

Además, el espesor necesario del material absorbente en un dispositivo depende fuertemente de su coeficiente de absorción $\alpha = \alpha(\lambda)$. Por ejemplo, es necesario tener alrededor de 100 μm de *Si* cristalino para absorber casi la totalidad de los fotones incidentes con energía mayor que E_g ; mientras que basta 1 μm de *GaAs* cristalino para el mismo fin.

2.2. RECOMBINACIÓN EN SEMICONDUCTORES

Como se verá más adelante, la recombinación de portadores de carga en el SC tiene una incidencia importante en el funcionamiento de los dispositivos fotovoltaicos y en particular en parámetros característicos tales como la vida media y la longitud de difusión de los portadores de carga minoritarios. Por tal motivo, a continuación se enumeran los mecanismos de recombinación que pueden darse en un material semiconductor [1, 3]:

- **Recombinación radiativa:** Se produce cuando un electrón de la banda de conducción decae a un estado de menor energía y se recombina con un hueco de la banda de valencia, emitiendo un fotón. La velocidad de recombinación es proporcional al producto de las densidades de portadores de carga.
- **Recombinación Auger:** Se da, por ejemplo, cuando un electrón de la banda de conducción transfiere su energía a otro electrón de la banda de conducción, resultando una recombinación del primer electrón con un hueco de la banda de valencia y una posterior liberación de energía del electrón excitado por medio de emisión de fonones. Esta es una colisión de tres cuerpos en la que no hay emisión de fotones. Existen diferentes tipos de procesos Auger, dependiendo de las transiciones posibles y de la concentración de portadores. La recombinación Auger es importante en el caso de semiconductores altamente dopados.
- **Recombinación por niveles trampa o Shockley-Read-Hall (SRH):** La presencia de impurezas o defectos en la red cristalina del SC genera niveles intermedios de energía en el “gap” aumentando en consecuencia la probabilidad de recombinación de portadores. La velocidad de recombinación asociada es proporcional al número de trampas existentes [32]. Este es un proceso donde los electrones pueden tener transiciones no radiativas a través de la emisión de fonones. Dado que la energía de los fonones es del orden de los 0,1 eV, la recombinación banda-banda directa implicaría la emisión múltiple y simultánea de

fonones, la que resulta sumamente improbable. Sin embargo, la situación aquí es distinta pues existen estados localizados del material involucrados en el proceso. Los portadores de carga pueden entregar su energía en colisiones con la entidad física que produce el nivel localizado y quedar atrapados en él, esto se conoce como “*trapping*”. La energía puede ser entregada en esta colisión como fonones, fotones o ambos [1].

Un caso particular de la recombinación SRH es la recombinación superficial en donde las superficies representan un defecto severo en la estructura cristalina, produciendo una gran cantidad de estados permitidos dentro de la banda prohibida. De esta manera los pares electrón-hueco se recombinan eficientemente en las superficies vía el mecanismo SRH antes descrito. Así la tasa neta de recombinación superficial depende de la velocidad de recombinación de electrones y huecos respectivamente.

Estos procesos de recombinación determinan que el tiempo de vida media de los portadores minoritarios de carga - tema que se verá en detalle en el próximo Capítulo - se componga de varios términos asociados a cada uno de estos mecanismos [3].

2.3. INTERFACES EN SEMICONDUCTORES

Las interfaces de SC pueden clasificarse en homojunturas y heterojunturas SC-SC, uniones metal-SC e interfaces aislante-SC. Se dan a continuación sus principales características [1].

a) ***Homojuntura semiconductor-semiconductor***: Consiste en junturas con el mismo semiconductor a ambos lados y con un cambio en el tipo y/o en la concentración de dopante en la interfaz. Pueden darse homojunturas $p-n$, n^+-n o p^+-p y están representadas por un diagrama de bandas como el indicado en la Figura 2.3.

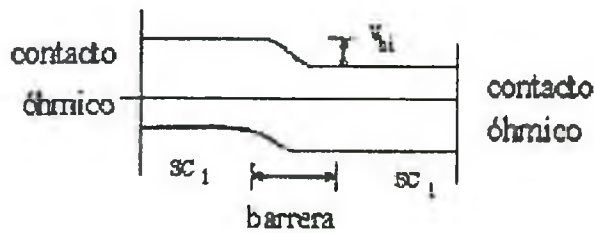


Figura 2.3. Esquema del diagrama de bandas de energía de una homojuntura.

- b) **Heterojuntura semiconductor-semiconductor:** Se trata de dos semiconductores diferentes a ambos lados de la juntura. Las heterojunturas pueden cambiar de tipo de dopante en la interfaz (de igual o de distinto tipo) y también se las clasifica en abruptas y graduales. En la interfaz, para densidades menores a $10^{10} \text{ cm}^{-2} - 10^{11} \text{ cm}^{-2}$, la curvatura de las bandas de energía no se modifican con respecto a una juntura libre de defectos. En cambio para densidades mayores, la curvatura de las bandas depende del valor. Las heterojunturas *n-n* o *p-p* se emplean en celdas solares para modificar las propiedades asociadas a los portadores minoritarios de carga, cambiando, por ejemplo, la velocidad de recombinación superficial posterior.
- c) **Interfaz metal-semiconductor:** La barrera que produce el campo eléctrico se encuentra esencialmente en el semiconductor debido al corto alcance del apantallamiento de Thomas-Fermi del metal. Si la barrera vacía la densidad de portadores mayoritarios (comportamiento rectificante), se llama barrera Schottky. Si la barrera no rectifica, puede acumular portadores mayoritarios o permitir la circulación de una corriente por efecto túnel. Si, además, la barrera es lo suficientemente delgada, entonces la misma sirve como contacto óhmico. Este tipo de estructura usualmente está dominada por los estados de la interfaz. La Figura 2.4 muestra el diagrama de bandas de este tipo de interfaz.

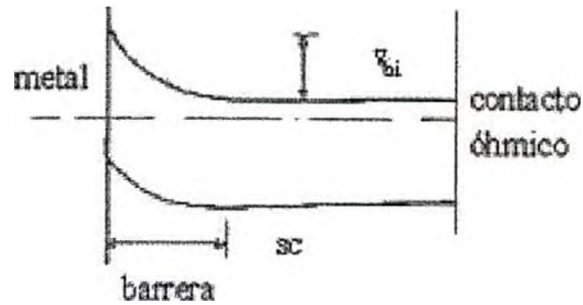


Figura 2.4. Diagrama de bandas de energía de una interfaz metal-semiconductor.

- d) **Interfaz aislante-semiconductor:** Es básicamente un sistema de una única interfaz, dado que espesor de la película aislante es, en general, ≤ 3 nm y se la emplea para modificar la barrera permitiendo el transporte a través de la juntura. Es una estructura por tanto conductora donde los estados de la interfaz pueden ser importantes (Figura 2.5).

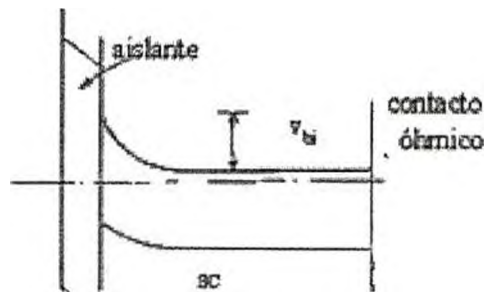


Figura 2.5. Diagrama de bandas de energía de una interfaz aislante-semiconductor [1].

Todas las celdas solares usan alguna de las estructuras antes mencionadas como principal fuente de fototensión. Entre las configuraciones de celdas solares de Si, una de las más importantes es la juntura *p-n*.

2.4. ELECTROSTÁTICA DE EQUILIBRIO DE UNA JUNTURA P-N

Para aprovechar los portadores fotogenerados en un material semiconductor, es necesario construir con él un dispositivo fotovoltaico, básicamente una juntura *p-n* de gran

área. La juntura producirá un campo eléctrico en el interior del dispositivo, el cual permitirá la colección de los portadores fotogenerados.

Una juntura p sobre n presenta una asimetría electrónica en su estructura; en la región n la vida media de los electrones es mucho mayor que la de los huecos, es decir existe gran cantidad de electrones libres pero la densidad de huecos es baja. El nivel de Fermi se encuentra cerca de la banda de conducción. Caso contrario ocurre en la región p , donde existe gran cantidad de huecos y pocos electrones.

Al formarse la unión $p-n$ se produce un reacomodamiento de cargas debido al gradiente de concentraciones presentes para cada tipo de portadores. Huecos de la región p se desplazan a la región n donde se recombinan generando una zona de carga espacial, los electrones se mueven en sentido contrario y se establece un campo eléctrico debido al desbalance de cargas producido. El campo eléctrico favorece el flujo de cargas que se oponen a la corriente por difusión, permitiendo llegar a una situación de equilibrio dinámico entre las dos corrientes. El potencial resultante está dado por el desplazamiento energético, el cual se obtiene teniendo en cuenta que en un sistema en equilibrio térmico existe un único nivel de Fermi.

El dispositivo queda dividido en tres regiones: dos cuasi neutras correspondiendo al grueso del SC tipo p y del tipo n , y otra región de transición o zona de carga espacial, la cual es generalmente mucho más delgada que el resto de la estructura.

El modelo de transporte utilizado habitualmente en homojunturas, en particular para la juntura $p-n$, se basa en tres suposiciones [4]:

1. La corriente total de los portadores de carga es constante a lo largo de todo el dispositivo.
2. Las corrientes individuales de electrones y huecos son funciones continuas a través de la estructura $p-n$.
3. Las corrientes individuales de electrones y huecos son constantes a través de la región de vaciamiento, si se desprecia la recombinación en la zona de vaciamiento.

Las ecuaciones básicas que, en su forma unidimensional, determinan las características ideales de los dispositivos semiconductores son: la ecuación de Poisson, que relaciona el campo eléctrico con la densidad de carga, las ecuaciones de la densidad de corriente, que dan

cuenta del movimiento de portadores debido al campo eléctrico (corriente de “*drift*”) y al gradiente de la concentración (corriente de difusión) y, finalmente, las ecuaciones de continuidad, que establecen la conservación de la carga.

$$\frac{d\xi}{dx} = \frac{q}{\varepsilon} (p - n + N_D - N_A) \quad (2.2)$$

$$J_e = q\mu_e n\xi + qD_e \frac{dn}{dx} \quad (2.3)$$

$$J_p = q\mu_p p\xi - qD_p \frac{dp}{dx} \quad (2.4)$$

$$\frac{1}{q} \frac{dJ_n}{dx} = U - G \quad (2.5)$$

$$\frac{1}{q} \frac{dJ_p}{dx} = -(U - G) \quad (2.6)$$

En las ecuaciones de continuidad (2.5) y (2.6), U representa la tasa neta de recombinación debida a todos los mecanismos, en tanto que G es la tasa neta de generación por procesos externos tales como la iluminación.

En la ecuación de Poisson (2.2), ξ es el campo eléctrico y las impurezas se consideran completamente ionizadas, de modo que todas contribuyen a la densidad de carga; q es la carga del electrón. En las ecuaciones (2.3) y (2.4) (correspondientes al flujo de electrones y huecos respectivamente), en el miembro derecho se tienen dos términos: el primero corresponde a la corriente debida al campo eléctrico asociada a la movilidad μ , en tanto que el segundo representa la corriente de difusión. La movilidad y los coeficientes de difusión están relacionados a través de las conocidas relaciones de Einstein [1,8]: $D_n = (kT/q) \mu_n$; $D_p = (kT/q) \mu_p$.

Las ecuaciones (2.2) a (2.6) forman un sistema de ecuaciones diferenciales acopladas para el cual no es posible encontrar soluciones generales analíticas, aunque pueden resolverse en forma numérica [1].

Sin embargo, es posible encontrar una solución aproximada para las corrientes de

portadores tal que:

- El dispositivo se divide en dos regiones: regiones cuasi-neutrales donde la densidad de carga espacial se asume nula (regiones fuera de la zona de transición entre el material tipo n y el tipo p), y la región de transición, más conocida como zona de carga espacial (o región de vaciamiento de carga volumétrica espacial), W , donde la concentración de portadores se supone lo suficientemente pequeña como para considerar que la contribución a la densidad de carga espacial proviene sólo de las impurezas ionizadas (Figura 2.6).
- En la región de vaciamiento, para una polarización directa moderada, el flujo neto de corriente es una pequeña diferencia entre el término de campo eléctrico y el de difusión en las ecuaciones (2.4) y (2.5) [1].



Figura 2.6. Esquema de las concentraciones de portadores en equilibrio térmico de una juntura p - n .

Los huecos libres difunden desde el material tipo p hacia el material tipo n , mientras que los electrones se difunden desde el lado n hacia el lado p . Idealmente, el proceso de difusión continuará hasta que las concentraciones de portadores se hiciesen iguales a ambos lados de la unión p - n . En consecuencia, la región de la juntura quedará sin portadores mayoritarios libres y los portadores minoritarios cargados sin ser neutralizados. El campo eléctrico producido en la zona de vaciamiento se opone a la densidad de corriente de difusión, favoreciendo así a la densidad de corriente de desplazamiento.

En equilibrio térmico, es decir sin iluminación ni tensión de polarización aplicada, las

densidades de corriente de desplazamiento de electrones (J_n) y de huecos (J_p), respectivamente, son nulas y el nivel de Fermi es constante a través de todo el dispositivo.

$$J_n = 0 = q \mu_n \left(n E + \frac{kT}{q} \frac{\partial n}{\partial x} \right) = \mu_n n \frac{\partial E_F}{\partial x} \quad (2.7)$$

$$J_p = 0 = \mu_p p \frac{\partial E_F}{\partial x} \quad (2.8)$$

donde q es la carga del electrón; k , la constante de Boltzmann; T , la temperatura en grados K; E , el campo eléctrico; n y p , las densidad de electrones y huecos y μ_n y μ_p , la movilidad de los electrones y huecos, respectivamente.

Dadas estas condiciones de corriente neta igual a cero se requiere que el nivel de Fermi sea constante a través de la muestra. El potencial de difusión o “*built-in potencial*” (V_{bi}) viene expresado por [1]:

$$qV_{bi} = kT \ln \left[\frac{n_{no} p_{po}}{n_i^2} \right] = kT \ln \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right) \quad (2.9)$$

donde n_{no} es la concentración de electrones en el material n en equilibrio térmico, p_{po} es la concentración de huecos en el material p en equilibrio térmico, n_i es la concentración intrínseca de portadores ($\# / \text{cm}^3$), N_A es la concentración de impurezas aceptoras y N_D es la concentración de impurezas donoras.

Dado que en equilibrio $n_{no} p_{no} = n_{po} p_{po} = n_i^2$,

$$V_{bi} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{p_{po}}{p_{no}} \right) = \frac{kT}{q} \ln \left[\frac{n_{no}}{n_{po}} \right] \quad (2.10)$$

y donde p_{no} es la concentración de huecos en el material n en equilibrio térmico y n_{po} es la concentración de electrones en el material p en equilibrio térmico. De esta última se obtiene una relación entre la densidad de huecos y electrones a ambos lados de la juntura en equilibrio térmico,

$$p_{no} = p_{po} \exp \left(\frac{-qV_{bi}}{kT} \right) \quad (2.11)$$

$$n_{po} = n_{no} \exp \left(\frac{-qV_{bi}}{kT} \right) \quad (2.12)$$

De esta manera, el dispositivo puede considerarse dividido en tres regiones: una región frontal o emisor, una región de transición o juntura; y una región posterior o base [7] (Figura 2.6). Tanto la primera como la última región son zonas neutrales. En general, la juntura es de un espesor mucho menor que el resto del dispositivo, típicamente de algunas décimas de μm .

Así en la región cuasi neutral p, la densidad de corriente total está dada por:

$$J_p = q\mu_p p \varepsilon - qD_p \frac{dp}{dx} \quad (2.13)$$

donde el primer término corresponde a la densidad de corriente de desplazamiento y el segundo término corresponde a la densidad de corriente de difusión.

En la región n, la densidad de corriente de desplazamiento y de difusión vienen dadas en la expresión de la corriente total:

$$J_n = q\mu_n n \varepsilon + qD_n \frac{dn}{dx} \quad (2.14)$$

Se obtiene la densidad de corriente de huecos y electrones en la región de vaciamiento como:

$$J_{p \text{ VACIAMIENTO}} = J_p(x_n) = J_p(0) = q \frac{D_p}{L_p} p_{n0} (e^{qV_A/kT} - 1) \quad (2.15)$$

$$J_{n \text{ VACIAMIENTO}} = J_n(-x_p) = J_n(0) = q \frac{D_n}{L_n} n_{p0} (e^{qV_A/kT} - 1) \quad (2.16)$$

La densidad de corriente total se obtiene sumando las ecuaciones (2.15) y (2.16) resultando la ecuación del diodo ideal:

$$J = q \left[\frac{D_p}{L_p} p_{n0} + \frac{D_n}{L_n} n_{p0} \right] (e^{qV_A/kT} - 1) \quad (2.17)$$

2.5. PROPIEDADES DE TRANSPORTE EN HETEROJUNTURAS

Las heterojunturas son uniones de semiconductores con distinto ancho de banda de energía prohibida (“*band gap*”), esto hace que exista una discontinuidad en la interfaz de la juntura. En 1951, Shockley propuso que una heterojuntura abrupta podía usarse como una eficiente juntura emisor-base de un transistor bipolar [5].

Desde entonces, las heterojunturas han sido ampliamente estudiadas y sus aplicaciones son muy importantes como, por ejemplo, en los diodos emisores de luz (*Light-Emitter Diode*, *LEDs*), los fotodetectores y, por supuesto, las celdas solares.

En esta sección sólo se tratarán los dispositivos fotovoltaicos basados en heterojunturas, haciendo énfasis en aquellos empleados en aplicaciones espaciales.

Al igual que en una homojuntura *p-n*, al formarse la heterounión *p* sobre *n* se reacomodan las cargas: los huecos de la región *p* difunden hacia la región *n* recombinándose y generando una región de vaciamiento de cargas. El campo eléctrico producido favorece el movimiento de las cargas que se oponen a la corriente por difusión, así se llega a una situación de equilibrio dinámico entre las corrientes.

En la Figura 2.7 se muestra el diagrama de bandas, en equilibrio térmico, de una heterojuntura *p-n* de un semiconductor (SC_1) sobre un semiconductor (SC_2) con $E_{g1} > E_{g2}$.

La luz que incide sobre la juntura con energía menor que E_{g1} pero mayor que E_{g2} pasará a través del primer semiconductor (SC_1), el cual actúa como ventana, y será absorbida por el segundo semiconductor. Los portadores de carga creados en la región de vaciamiento y a una distancia de la juntura comparable con la longitud de difusión (L_{D2}) serán colectados del mismo modo que ocurre en las celdas solares de homojunturas *p-n*, tratadas en la sección anterior. Los fotones incidentes con energía mayor que E_{g1} serán absorbidos por el SC_1 y los portadores que se generen a una distancia de la juntura del orden de L_{D1} o en la región de carga espacial serán los colectados.

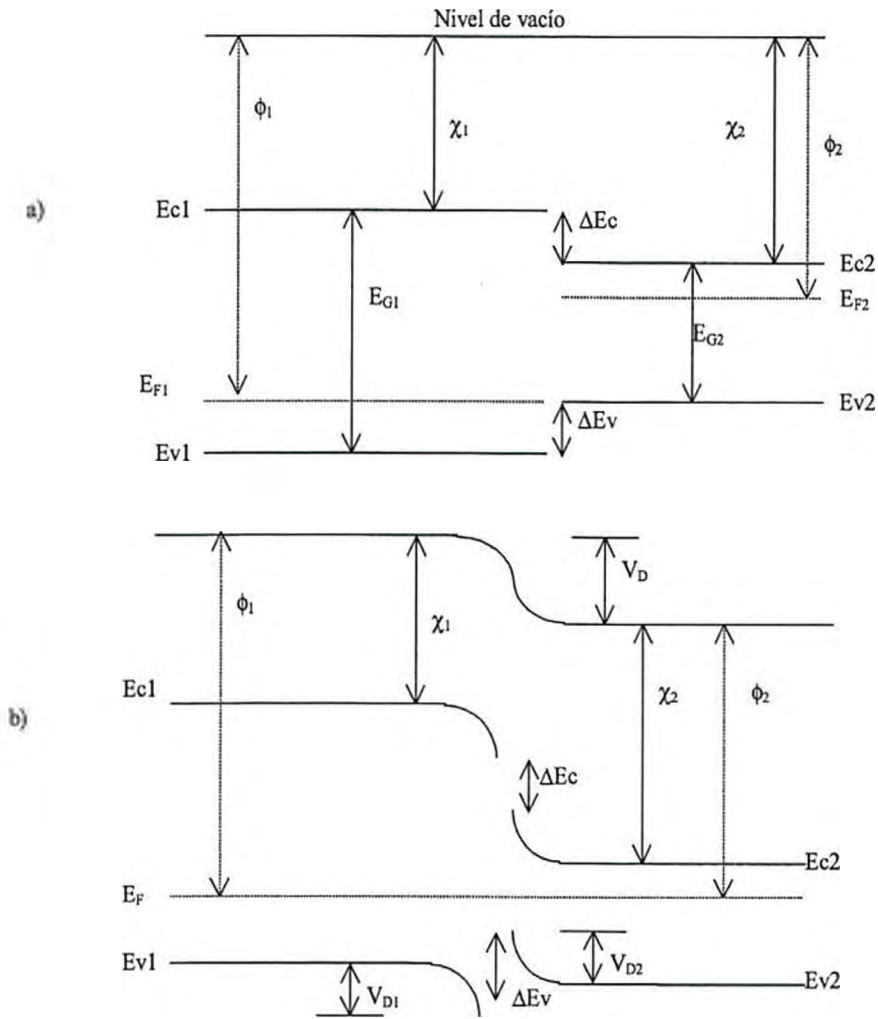


Figura 2.7. Arriba: Diagrama de bandas de energía de una HJ p-n formada por dos SC con distinto "gap" antes de la unión y abajo: diagrama de bandas en equilibrio térmico después de la unión [6].

Modelo de desplazamiento-difusión de Anderson

Anderson [7] generalizó el modelo de desplazamiento-difusión para las heterojunturas formadas por dos materiales semicristalinos. Aunque existen aún muchas discrepancias entre datos experimentales y este modelo, se usa para predecir en primera aproximación el alineamiento de las bandas de energía de algunas heterojunturas.

En cada semiconductor hay tres parámetros de interés: la **función trabajo** ϕ (energía requerida para remover un electrón desde el nivel de Fermi del semiconductor), la **afinidad electrónica** χ (energía necesaria para remover un electrón localizado en la banda de conducción) y la **energía del "gap"**. Además del dopaje distinto en los dos semiconductores,

también estas tres energías son diferentes. Al estar en contacto esos materiales en equilibrio térmico el nivel de Fermi debe ser constante en el sistema, como se indica en la Figura 2.7. En consecuencia el potencial electrostático es continuo si no existen dipolos en la interface y el campo eléctrico es continuo si no existen cargas en la interface. De esta manera, el campo eléctrico debe distribuirse a lo largo del dispositivo a fin de igualar la función trabajo.

Un parámetro importante que distingue a las heterojunturas de las homojunturas es la discontinuidad de las bandas en la interfaz. El uso de dos materiales diferentes para la formación de la juntura introduce discontinuidades en el borde de la banda de valencia y de conducción en la interfaz, el cual aumenta la barrera de potencial para el transporte de portadores. Estos corrimientos de las bandas pueden influir fuertemente sobre el transporte electrónico en estos dispositivos. En principio, la discontinuidad de la banda de valencia depende de la diferencia en el “gap” y la afinidad electrónica de los dos semiconductores que forman la heterojuntura.

Se considera una heterojuntura p-n en donde el material tipo *p* tiene un “gap”, E_{g1} mayor que el del material tipo *n*, E_{g2} (Figura 2.7). Anderson realiza las siguientes suposiciones en este modelo. El nivel de vacío es continuo en la interfaz si se desprecia cualquier carga o dipolo en la misma. Como resultado, la afinidad electrónica (χ_1 y χ_2) y los “gaps” (E_{g1} y E_{g2}) definen la discontinuidad de las bandas en la interfaz:

$$\Delta E_c = \chi_2 - \chi_1 \tag{2.18}$$

$$\Delta E_v = (\chi_1 + E_{g1}) - (\chi_2 + E_{g2}) \tag{2.19}$$

considerando que el “gap” y la afinidad electrónica son independientes del dopaje.

Las bandas de valencia y de conducción del material de “gap” más chico están entre las bandas del material con “gap” más ancho (Figura 2.7), es decir, $\chi_1 < \chi_2$ y $\chi_1 + E_{g1} > \chi_2 + E_{g2}$. Para una heteroestructura de GaAs/Ge, por ejemplo, esta suposición es válida (Tabla 2.1).

Tabla 2.1. Valores de energía del gap y afinidad electrónica para Ge, GaAs y InP [8].

	Ge	GaAs	InP
Afinidad electrónica χ	4,13 eV	3,63 – 4,07 eV	4,40 eV
Energía del "gap" E_G	0,67 eV	1,43 eV	1,26 eV

El modelo de Anderson predice la distribución del potencial interno y la tensión aplicada en ambos materiales y, en consecuencia, el cambio de curvatura de las bandas en la interfaz. La discontinuidad de la banda de valencia o de la de conducción en la interfaz puede formar barreras para el transporte de portadores y sólo podrán pasar aquéllos que tengan la energía cinética suficiente. En una primera aproximación (con densidad de estados constante) la fracción de portadores (F) que pasan esa barrera de energía de altura E_B es $F = \exp(-E_B/kT)$.

Esta barrera tiene distinta forma y magnitud para huecos y para electrones en oscuridad y cuando se aplica una tensión que polariza el dispositivo en directa, los electrones tienen que atravesar la discontinuidad en la banda de conducción (ΔE_c) y el curvamiento de las bandas cuando son inyectados desde el material n al p . En cambio, los huecos fluyen en dirección opuesta experimentando solamente el curvamiento de las bandas.

La naturaleza de la barrera depende de los niveles de dopaje (N_A y N_D) y de las afinidades electrónicas de los materiales. La teoría de Anderson conduce a la siguiente ecuación:

$$J = A \exp(-qV_{B1}/kT) - B \exp(-qV_{B2}/kT) \quad (2.20)$$

donde V_{B1} (V_{B2}) es la barrera que los portadores en el material 1 (2) deben sobrepasar para llegar al material 2 (1). Los coeficientes A y B dependen del nivel de dopaje, de la masa efectiva de los portadores y de los mecanismos de flujos de corrientes. En la ecuación (2.20) el primer término representa el flujo de huecos del material p al n , y el segundo término el flujo de huecos en dirección contraria.

2.6. CELDAS SOLARES MULTIJUNTURAS

Históricamente, la potencia eléctrica, en el espacio exterior fue, en gran parte, provista por celdas solares basadas en silicio. Desde hace unos años, se emplean celdas solares multijunturas de alta eficiencia [9, 10 y 11] basadas en otros materiales fotovoltaicos como una alternativa tecnológica para el suministro de energía. Además, las celdas multijunturas (MJ) combinan homojunturas con heterojunturas.

Las ventajas que presentan las celdas solares multijunturas (MJ) de muy alta eficiencia basadas en semiconductores de los grupos III-V sobre las celdas solares avanzadas basadas en

Si son [12]:

- **mejor aprovechamiento del espectro solar**, ya que los dispositivos fotovoltaicos multijuntura están compuestos por dos o más subceldas elaboradas de materiales con distintos “*gaps*” para poder aprovechar mejor el espectro solar [13];
- **mayor tolerancia a la radiación** [14]; y
- **mayor eficiencia de conversión.**

Las celdas *MJ* presentan la desventaja de ser más costosas. Una *MJ* de muy alta eficiencia (sin integrar) cuesta aproximadamente 300 u\$/W respecto de las celdas de *Si* (100 u\$/W) para aplicaciones espaciales [15].

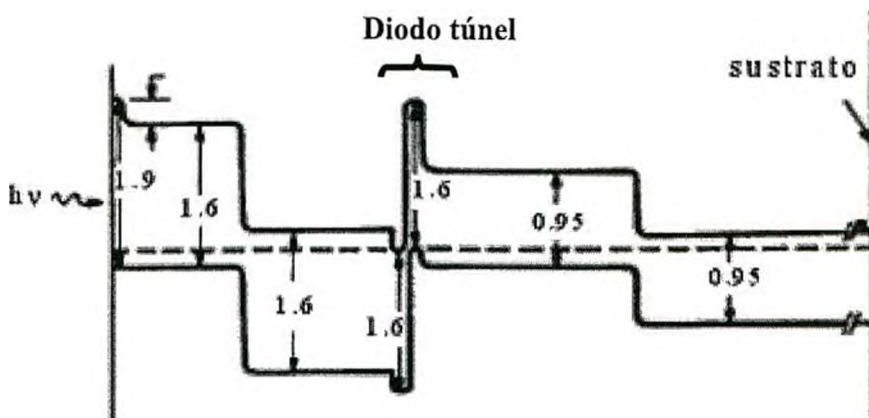


Figura 2.8. Diagrama de bandas de heterojunturas en celdas tandem conectadas por un diodo túnel.

La estructura de celdas tipo tandem es una serie de celdas apiladas unas sobre otras de manera tal de tener el material con el mayor *gap* en la parte más alta y luego los siguientes materiales en energías decrecientes. La máxima eficiencia que se puede obtener con esta configuración depende del número de celdas con distinto “*gap*” que conforman el tandem. La Figura 2.8 muestra el diagrama de bandas de HJ en celdas tandem conectadas por un diodo túnel.

En la Tabla 2.2 se muestran los “*gaps*” óptimos y las eficiencias teóricas máximas para el caso particular de iluminación con radiación solar concentrada [3].

Tabla 2.2. Energías de "band gap" y eficiencias óptimas para celdas MJ (AM1 X 1000) [3].

Nº de celdas	η (%)	Energía de "banda gap" (eV)					
1	32,4	1,4					
2	44,3	1,0	1,8				
3	50,3	1,0	1,6	2,2			
4	53,9	0,8	1,4	1,8	2,2		
5	56,3	0,6	1,0	1,4	1,8	2,2	
6	58,5	0,6	1,0	1,4	1,8	2,0	2,2

Para formar un sistema "multigap", por ejemplo, el Si combinado con otro material con una E_G entre 1,6 hasta 2,1 eV sería una elección óptima para una multijuntura de 2 o tres subceldas. Experimentalmente se obtuvieron resultados de celdas "multigap" en 1978 [16] para un sistema formado por una celda de Si y una celda heterojuntura de $Al_x Ga_{1-x} As$. Bajo iluminación concentrada, la eficiencia del sistema combinado era de 28,5 %.

Las celdas MJ pueden estar conectadas en serie como el gráfico de la Figura 2.9 o simplemente, apiladas unas sobre otras. Con esta última combinación de celdas, la tensión y la corriente de salida para cada subcelda son, en general, diferentes. Por el contrario, las celdas MJ de tipo conexión en serie tienen una única corriente que circula por todas las subceldas, de manera tal que dicha corriente se encuentra limitada por la menor corriente de cortocircuito.

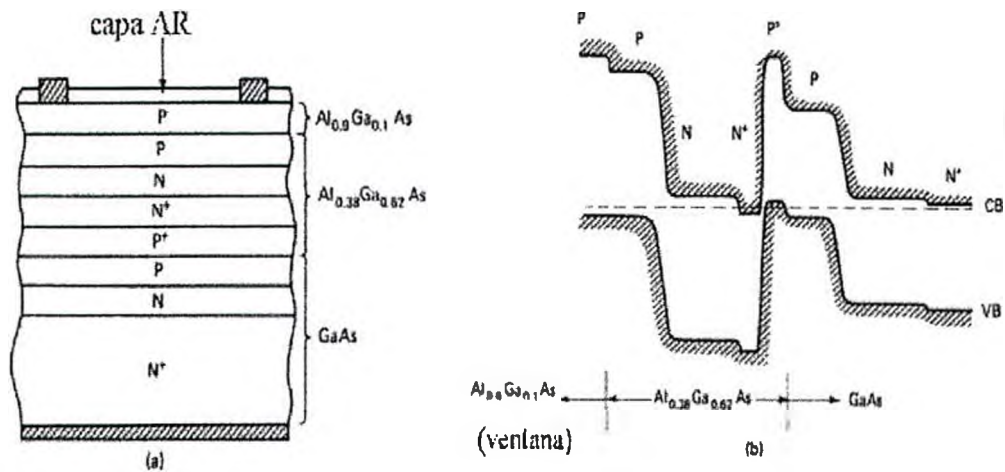


Figura 2.9. (a) Dos celdas tandem conectadas en serie formada por crecimiento epitaxial sobre un sustrato y (b) su correspondiente diagrama de bandas de energía [3].

La tecnología de fabricación de celdas multijunturas sobre sustrato de *Si*, *Ge* y *GaAs* ha sido desarrollada por compañías estadounidenses [17, 18] y por la NASA [19]. Hacia fines de los años '90 se obtenían a escala de producción celdas de muy alta eficiencia, desde 23 a 26% a AM0 y de áreas mayores que 20 cm². Actualmente, existen celdas avanzadas de triple juntura cuya eficiencia media es de 27,5% a AM0.

A continuación, se describen las celdas basadas en compuestos III-V estudiadas y medidas durante el desarrollo de la Tesis.

Celda de simple juntura de GaAs sobre sustrato de Ge

La Figura 2.10 muestra la estructura de una celda de simple juntura de *GaAs* crecida sobre una oblea de *Ge*, donde el germanio sólo cumple la función de sustrato mecánico. El uso de *Ge* como sustrato tiene dos ventajas sobre otros sustratos de compuestos SC III-V como el *GaAs*: menor costo y mayor resistencia a la rotura.

Las principales características del sustrato son: de 200 μm aproximadamente, dopaje tipo *n*, baja resistividad (del orden de 0,01 Ω cm), y orientación cristalográfica (100).

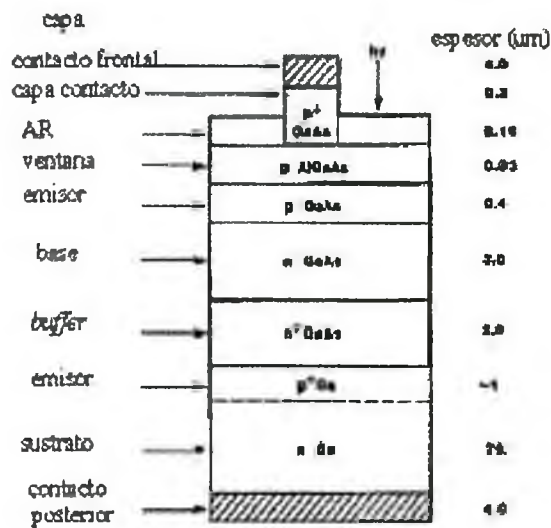


Figura 2.10. Estructura de una celda solar GaAs/Ge de unión simple monolítica y alta eficiencia [20].

La Figura 2.11 muestra una curva característica de la densidad de corriente en función de la tensión para una celda elaborada sobre Ge y otra sobre GaAs. Se observa que la tensión a circuito abierto (V_{ca}) de la celda sobre Ge es menor que la de la celda sobre GaAs.

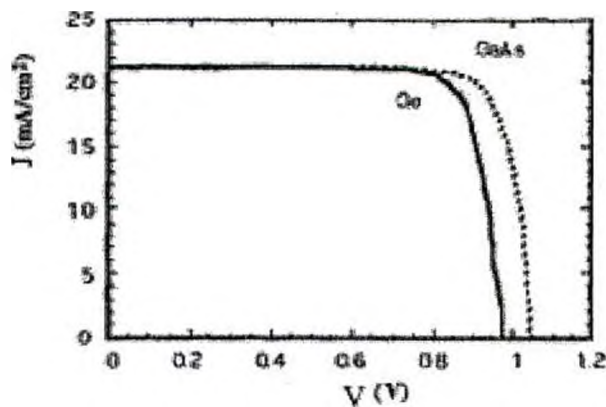


Figura 2.11. Curvas I-V de una celda de simple unión GaAs sobre Ge y sobre GaAs[20].

Las celdas de $GaInP_2/GaAs$ son otra alternativa tecnológica para aplicaciones espaciales debido a su alta eficiencia y resistencia al daño por radiación.

La estructura de la celda de simple unión n/p que se muestra en la Figura 2.12, consiste en un emisor frontal tipo n (dopado con Sn), una base de $GaInP_2$ dopada tipo p (por

ejemplo, con Zn) y un emisor posterior de GaAs tipo p, sobre un sustrato de GaAs de 5-7 cm de diámetro y orientación cristalográfica (100) [21].

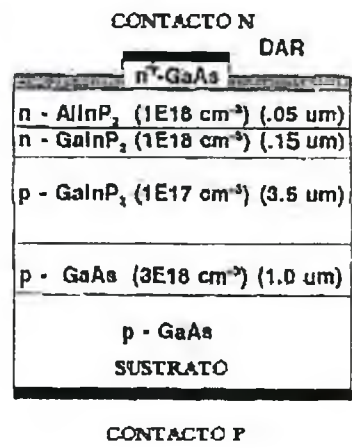


Figura 2.12. Estructura de la celda simple juntura de GaInP₂. [21].

Celda tandem de doble juntura GaInP₂/GaAs sobre sustrato de Ge

La estructura de una celda tandem de doble juntura GaInP₂/GaAs sobre sustrato de germanio inactivo se muestra en la Figura 2.13. Consiste en una subcelda de GaInP₂ cuyo emisor es tipo n (dopado con Si, por ejemplo), la base es tipo p (dopada con Zn), una juntura túnel o diodo túnel de GaAs dopado p⁺⁺/n⁺⁺ y una segunda subcelda n-p de GaAs.

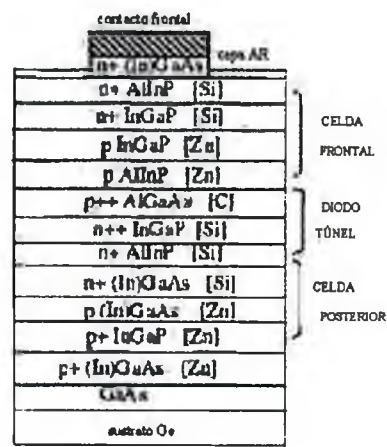


Figura 2.13. Estructura de una celda tandem doble juntura GaInP₂/GaAs.

Celdas tandem de triple juntura GaInP₂/GaAs/Ge y GaInP₂/GaInAs₂/Ge

Las celdas de triple juntura pueden presentarse en diversas estructuras y composiciones, siendo las más estudiadas las siguientes: GaInP₂/GaAs/Ge (Figura 2.14) y

$GaInP_2/InGaAs_2/Ge$ (Figura 2.15)[22,23]. La estructura de la Figura 2.14 está compuesta por tres subceldas y dos diodos o junturas túnel.

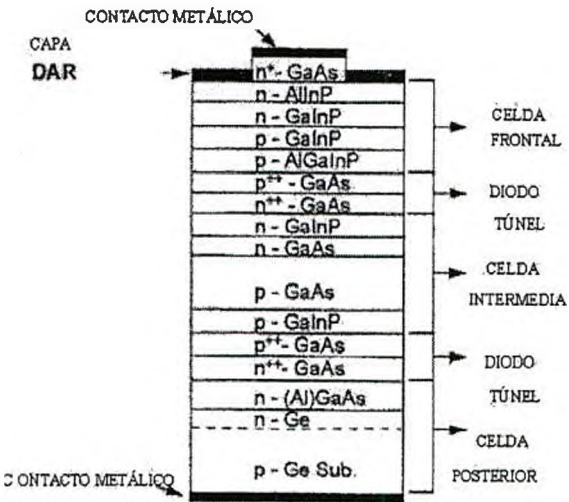


Figura 2.14. Esquema de la estructura de una celda solar triple juntura $GaInP_2/GaAs/Ge$.

La celda tandem de la Figura 2.15 presenta también tres subceldas y dos junturas tipo túnel y además mejoras en cuanto al diseño de la estructura: junturas que funcionan como ventana para los fotones incidentes, formación de un campo superficial posterior en las dos primeras subceldas y doble capa de superficie antirreflectante optimizadas.



Figura 2.15. Estructura de una celda solar tandem TJ avanzada $GaInP_2/InGaAs/Ge$.

En general, las celdas solares de alta eficiencia $n/p GaInP_2/InGaAs_2/Ge$ de triple juntura (3J) están diseñadas para que las subceldas tengan la misma corriente de cortocircuito

al final de su vida útil (“*end-of-life*“, *EOL*).

Referencias Capítulo 2

- 1 S.J. Fonash. *Solar Cell Device Physics*, Academic Press (1981). B.L. Sharma y R.K. Purohit. *Semiconductor Heterojunctions*, International Series of Monographs in the Science of Solid State **5**, Pergamon Press (1974).
- 2 J.I. Pankove. *Optical processes in semiconductors*, Dover Publications (1975).
- 3 M.A. Green, *Solar cells: operating principles, technology and system applications*, ed. University of New South Wales, Australia (1992)
- 4 M.A. Green. *Advanced principles, technology and systems applications*, ed. University of New South Wales, Australia (1992).
- 5 W. Shockley. *U.S. Patent 2, 569, 347* (1951).
- 6 S.M. Sze. *Physics of Semiconductor devices*, John Wiley & Sons (1981).
- 7 R.L. Anderson. *Experiments on Ge-GaAs electronics*, Solid-State Electronics **5**, p. 341 (1962).
- 8 B.L. Sharma and R.K. Purohit. *Semiconductor heterojunctions*, Pergamon Press Ltd., (1974).
- 9 N.S. Fatemi, et al. *Development, space qualification, and production of high-efficiency large area InGaP/GaAs dual-junction solar cells on Ge at Emcore Photovoltaics*, 16th. Space Photovoltaic Research and Technology Conference (SPRAT), Cleveland, Ohio, (1999).
- 10 N.H. Karam, et al. *High efficiency GaInP₂/GaAs/Ge dual and triple junction solar cells for space applications*, 2nd. World Conference & Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion, Vienna, Austria, pág. 3534 (1998).
- 11 Y.C.M. Yeh, et al. *Advances in production of cascade solar cells for space*, 26th. PVSC, Anaheim, California, pág. 827, (1997).
- 12 D.L. Feucht. *Heterojunction in Photovoltaic Devices*, J. Vac. Sci. Technol., **14**, 57 (1977).
- 13 J. Granata, J. Ermer, P. Hebert, M. Haddad, R.R. King, D.D. Krut, L. Lovelady, M. Gillanders, N.H. Karam, B. Cavicchi. *Triple junction GaInP/GaAs/Ge solar cells-production status, qualification results and operational benefits*. Proc. of the 28th IEEE Photovoltaic

Specialists Conference, pág. 1181 (2000).

14 P.R. Sharp, C.H. Thang, P.A. Martin, and H.Q. Hou. *Proton and electron radiation analysis of GaInP₂/GaAs solar cells*, Proc. of the 28th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, pág. 1098 (2000).

15 M. Raja Reddy. *Space solar cells-tradeoff analysis*, Solar Energy Materials & Solar Cells 77, pp. 175-208 (2003).

16 R.C. Moon et al. *Multigap Solar Cell Requirements and the Performance of AlGaAs and Si Cells in Concentrated Sunlight*, Conference Record 13th. IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington D.C., pp. 859-867 (1978).

17 Spectrolab Inc. <http://www.spectrolab.com>

18 Emcore Photovoltaics. <http://www.emcore.com>

19 NASA, National Aero Space Agency. <http://nasa.gov>

20 S.P. Tobin et al. and R.E. Hart Jr. et al. *High efficiency GaAs/Ge monolithic tandem solar cells*, 20th PVSC Proc. (1988).

21 P.K. Chiang, et al.. *Large area GaInP₂/GaAs tandem cell development for space power systems*, 22nd. IEEE PVSC, Washington, D.C., pág. 659, (1993).

22 N.S. Fatemi, H.E. Pollard, H.Q. Hou and P.R. Sharps. *Solar array trades between very high-efficiency multi-junction and Si space solar cells*, 28th. IEEE PVSC (2000).

23 M.A. Stan, D. Aiken, P.R. Sharp, J. Hills, B. Clevenger, & N.S. Fatemi. *The development of > 28% efficiency triple-junction space solar cells at Emcore Photovoltaics*, 28th. IEEE PVSC (2000).

Capítulo 3

CARACTERIZACIÓN DE DISPOSITIVOS FOTOVOLTAICOS

En los últimos años ha crecido el interés en el estudio de las celdas de multijuntura (*MJ*) basadas en *GaAs* para aplicaciones espaciales, razón por la cual es de suma importancia caracterizar apropiadamente estas nuevas estructuras. Asimismo, es necesario continuar optimizando los procesos de fabricación de monojunturas de *c-Si* en el laboratorio del Grupo Energía Solar, lo cual requiere también el desarrollo de técnicas de caracterización apropiadas.

Se presentan en este Capítulo, las técnicas de caracterización desarrolladas y utilizadas durante el transcurso de la Tesis para la caracterización óptica, eléctrica y electrónica de obleas y celdas solares. En particular, se caracterizaron obleas de silicio cristalino (ver resultados en este mismo Capítulo), celdas de *c-Si* (en este Capítulo y en Capítulos 4 y 6) y se obtuvieron los parámetros eléctricos de celdas solares avanzadas de multijunturas de *GaAs* sobre sustrato de *Ge* (Capítulo 5).

3.1 PROPIEDADES ELÉCTRICAS

Como se ha visto en el Capítulo 2, una celda solar sencilla consta básicamente de una juntura *p-n*, la cual produce un campo eléctrico en el interior del dispositivo que permite la colección de los portadores fotogenerados. En esta sección se considerarán las ecuaciones y aproximaciones que determinan las características eléctricas de una celda solar tanto en condiciones de iluminación como de oscuridad.

3.1.1 Características de la curva I-V bajo iluminación

Las mediciones de las características eléctricas de celdas solares pueden realizarse tanto bajo iluminación solar natural o bien empleando un simulador solar de estado estacionario o pulsado. Hasta el momento, la normalización de la medición de la curva I-V en

celdas solares de aplicaciones espaciales está en desarrollo. A nivel mundial, la ISO (*International Standard Organization*) y en E.E.U.U., la ASTM (*American Standard Testing and Materials*) [1, 2] están desarrollando las normas de medición para aplicaciones espaciales.

Existen en cambio normas ya establecidas para mediciones en aplicaciones terrestres [3, 4], que son utilizadas como referencias para la confección de normas para aplicaciones espaciales [5].

Cuando se ilumina la juntura *p-n* existe una generación de pares electrón-hueco además de los pares térmicos, apareciendo un término constante que no depende de la tensión. Es la corriente fotogenerada, I_L , que establece una polarización en directa de la juntura, por lo cual la corriente del diodo se la puede considerar como una pérdida en el dispositivo.

La ecuación de la corriente total que circula a través de una celda solar (o juntura *p-n*), I , empleando el modelo de dos exponenciales se puede expresar como [6]:

$$I = I_L - I_o \left[\exp \left(\frac{q(V + R_s I)}{kT} \right) - 1 \right] - I_o' \left[\exp \left(\frac{q(V + R_s I)}{n k T} \right) - 1 \right] - \frac{1}{R_p} (V + R_s I) \quad (3.1)$$

donde I_L es la corriente fotogenerada; I_o , la corriente de saturación del diodo ideal; I_o' , la corriente debida a la recombinación en la zona de vaciamiento; R_s y R_p , las resistencias serie y paralelo respectivamente y V , la tensión externa. En particular, el primer término de la ecuación proviene de la difusión de los portadores minoritarios y de la recombinación en las zonas cuasi – neutras.

Si se tienen en cuenta efectos tales como la recombinación en la zona de vaciamiento o condiciones de alta inyección, se pueden considerar dentro de la expresión de la ecuación (3.1) a través de la variable n llamada factor de idealidad [7].

La resistencia serie, R_s , es consecuencia de la resistividad del emisor n (o p) y de la base p (o n), además de las resistencias de contacto entre el SC y los contactos metálicos. Por tanto, cuanto mayor sea esta resistencia, mayor es la potencia disipada en el dispositivo y menor la tensión a través de la carga. La resistencia paralelo, R_p , es esencialmente debida a pérdidas por los bordes del dispositivo.

Si se considera el modelo de una única exponencial para la corriente total que circula a través de la celda y suponiendo que $R_s \rightarrow 0$ y que $R_p \rightarrow \infty$, entonces:

$$I = I_L - I_o \left[\exp \left(\frac{q(V)}{kT} \right) - 1 \right] \quad (3.2)$$

donde $(kT/q) = V_T$ es el potencial asociado a la agitación térmica cuyo valor es de $\cong 25$ mV a 25 °C, I_L es la corriente fotogenerada e I_o es la corriente de saturación del diodo. I_o está dada por:

$$I_o = q n_i^2 \left[\frac{D_n}{N_A L_n} + \frac{D_p}{N_D L_p} \right] \quad (3.3)$$

donde n_i^2 es la concentración de portadores intrínsecos, L_n y L_p son las longitudes de difusión de los portadores minoritarios, y D_n y D_p son los coeficientes de difusión de las regiones n y p , respectivamente.

El circuito equivalente de un dispositivo fotovoltaico (Figura 3.1) está constituido por una fuente de corriente que representa la fotogeneración, una impedancia no lineal dada por la juntura (el diodo), y las resistencias serie y paralelo. R_c representa la resistencia de carga del circuito externo.

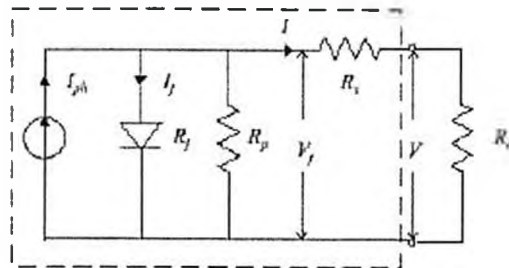


Figura 3.1. Circuito equivalente de una celda solar en condiciones de iluminación.

Los parámetros normalmente utilizados para la caracterización eléctrica de una celda solar son: la corriente de cortocircuito I_{CC} , la tensión a circuito abierto V_{CA} , y el factor de forma FF .

La corriente de cortocircuito es el punto de la curva I-V (Figura 3.2) correspondiente a $V = 0$, el cual, idealmente, coincide con la corriente fotogenerada $I_L = I_{CC}$. Para $I = 0$, se obtiene el valor ideal de V_{ca} [8]:

$$V_{ca} = \left(\frac{kT}{q} \right) \ln \left(\frac{I_L}{I_0} + 1 \right) \quad (3.4)$$

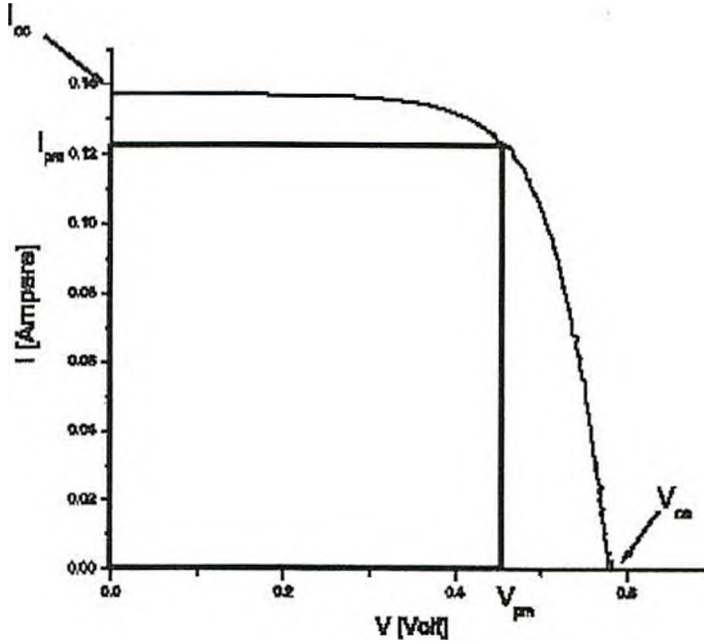


Figura 3.2. Curva de I-V característica de una celda solar. El área del rectángulo inscrito en la curva representa la máxima potencia que puede entregar la celda, $P_{m\acute{a}x}$.

El punto de operación (V_{mp} , I_{mp}) que se observa en la Figura 3.2, corresponde al que hace máxima la potencia de salida. El factor de forma se define como [8]:

$$FF = \left(\frac{V_{mp} I_{mp}}{V_{ca} I_{cc}} \right) \quad (3.5)$$

y es una medida de cuan cuadrada es la característica eléctrica.

Por último, la eficiencia de conversión está definida como [8]:

$$\eta = \frac{V_{ca} I_{cc} FF}{P_{in}} \quad (3.6)$$

donde P_{in} es la potencia total de la luz incidente sobre la celda.

Con respecto a la irradiancia incidente, se denomina irradiancia total a la integral del

flujo incidente de fotones $\phi(\lambda)$ sobre todas las longitudes de onda λ , siendo $\phi(\lambda)$ la irradiancia espectral.

$$E = \int_0^{\infty} \Phi(\lambda) d\lambda \quad (3.7)$$

Definiendo la respuesta espectral ($RE(\lambda)$) de una celda solar como la densidad de corriente de cortocircuito, por unidad de potencia incidente de luz monocromática, en función de la longitud de onda (λ), la corriente de cortocircuito dependerá de la integral del producto $RE(\lambda)$ por $\phi(\lambda)$.

$$I_{cc} = \int_0^{\infty} RE(\lambda) \Phi(\lambda) d\lambda \quad (3.8)$$

En resumen, I_{cc} no sólo dependerá de la cantidad total de fotones incidentes sino también de su distribución espectral. Más detalles sobre la respuesta espectral de una celda se darán en la sección 3.2.4

Determinación de la resistencia serie (R_S)

Existe un método aproximado para la determinación de la resistencia serie en base a la medición de la curva I-V del dispositivo bajo ensayo para dos niveles de irradiancia. Consiste en trazar la curva I-V del dispositivo bajo ensayo, para dos irradiancias distintas (cuyas magnitudes no necesitan ser conocidas) y a la misma temperatura en el intervalo de 23°C a 27°C [4, 9].

Luego, se elige un punto en cada curva característica, preferiblemente cerca del "codo" de la misma, donde cada corriente se reduzca una misma cantidad ΔI a partir de cada una de las corrientes de cortocircuito (Figura 3.3). Se mide el desplazamiento ΔV entre dos puntos y se calcula R_S como sigue:

$$R_S = \frac{\Delta V}{|I_{me1} - I_{me2}|} \quad (3.9)$$

donde I_{me1} y I_{me2} son las dos corrientes de cortocircuito.

Se repiten los pasos anteriores y utilizando una tercera curva I-V medida a una tercera

irradiancia y a la misma temperatura, en combinación con cada una de las curvas anteriores.

Finalmente, se promedian los tres valores de R_s calculados y así queda determinada la resistencia serie de la celda solar.

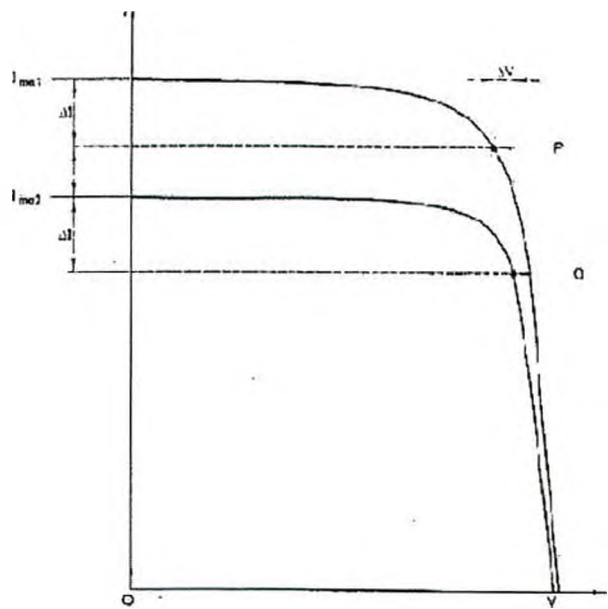


Figura 3.3. Determinación de la resistencia serie en una celda solar [4, 9].

3.1.2 Características de la curva I-V en condiciones de oscuridad

En condiciones de oscuridad, no hay corriente fotogenerada, por lo tanto del circuito de la Figura 3.1 se elimina el generador de corriente quedando el circuito equivalente reducido de la Figura 3.4.

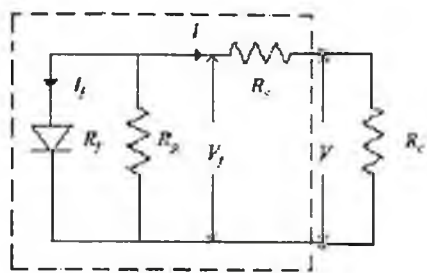


Figura 3.4. Circuito reducido de una celda solar en condiciones de oscuridad.

La medición de la corriente como función de la tensión para una celda en oscuridad se

realiza polarizando la celda con una fuente de tensión exterior, graficándose el $\log(I)$ versus V según se observa en la Figura 3.5 [10]. A bajas tensiones, la conductancia y la corriente de saturación son los términos dominantes. Para tensiones altas comienza a ser importante la recombinación en la región de la base y la resistencia serie limita el crecimiento de la exponencial en la corriente.

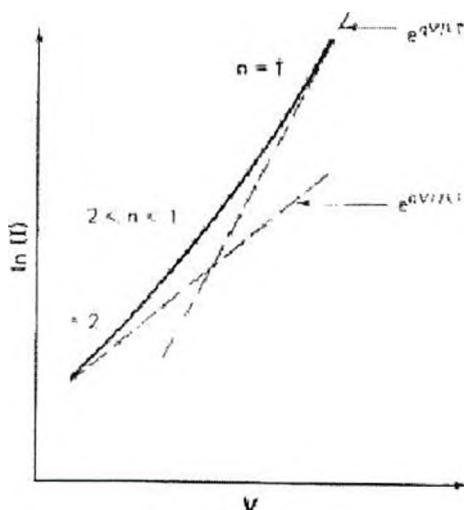


Figura 3.5. $\log(I)$ en función de V [10].

A menudo, para estimar la calidad del dispositivo se analiza la pendiente para tensiones intermedias dado que allí se superponen los efectos dominantes de las otras regiones.

En la mayoría de los casos este análisis es muy útil para detectar áreas defectuosas. Por ejemplo, valores altos de I_o y de n indican que una juntura $p-n$ no se comporta como una juntura ideal. Los problemas asociados con la resistencia serie y los efectos no deseados sobre la I_o pueden ser minimizados a partir de la elaboración de una juntura menos abrupta.

Si los parámetros obtenidos a partir del ajuste se usan para calcular las características de la celda bajo iluminación (suponiendo un valor para la I_{cc}), en general, se observa un buen acuerdo con los resultados experimentales.

3.2 ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES ELECTRÓNICAS

El funcionamiento de los dispositivos fotovoltaicos depende de diversas propiedades

electrónicas entre las cuales la **longitud de difusión** de portadores minoritarios en la región de la base (tipo n o p), L_b , es uno de las más importantes. Este parámetro está directamente relacionado con la **vida media de los portadores minoritarios**, τ , a través de la movilidad.

$$L_b \equiv \sqrt{D_n \tau} \quad (3.10)$$

donde $D_n = (kT/q)\mu_n$ es la difusividad y μ_n es la movilidad de electrones [7].

Por otra parte, el tiempo de vida se utiliza para caracterizar tanto al lingote de *Si* (material de partida) como a la celda solar (dispositivo terminado) y su determinación resulta, en general, más simple que la medición directa de L_b . Existen diversas técnicas de medición que se han ido desarrollando desde mediados de la década del 50, incluyendo mediciones de la longitud de difusión a los comienzos de los años 60 [11].

Las técnicas de medición de τ y L_b más comúnmente empleadas son:

- **Decaimiento de la fotoconductividad (PCD)** [11]: Este método permite determinar el tiempo de vida efectivo de obleas de material SC y de junturas elaboradas a partir de ellas. Para determinar el τ_{ef} se mide la variación de la fotoconductividad con respecto al tiempo en la muestra bajo ensayo al ser iluminada con una fuente de luz apropiada. En el equipo de medición el contacto con la muestra es inductivo y el nivel de inyección de los portadores minoritarios en exceso mediante la luz se elige tal que sea cercano al modo de operación del dispositivo en evaluación.
- **Decaimiento de la tensión a circuito abierto (OCVD)** [12, 13]: Esta técnica permite calcular el tiempo de vida efectivo de los portadores minoritarios y se aplica a muestras a partir de la formación de la juntura, en las distintas etapas de elaboración de las celdas. Por medio de un pulso de corriente o de luz, se inyectan portadores en exceso, polarizando la juntura y mediante un osciloscopio se determina el tiempo de decaimiento de los portadores minoritarios al abrir el circuito.
- **Fotovoltaje superficial (SPV)** [14]: Con este método se determina la longitud de difusión de los portadores minoritarios. Se aplica a muestras con juntura y consiste básicamente en iluminar la superficie de una muestra generando portadores minoritarios en exceso. Se mide la variación de la fototensión en superficie en función del tiempo.

- **SEM-EBIC** [15]: Este método consiste en dirigir un haz de electrones colimado de un microscopio electrónico de barrido, *SEM*, normalmente a través del borde de la muestra semiconductora. Se mide la corriente de cortocircuito resultante en la juntura de la muestra como función de la posición del haz con el fin de obtener la longitud de difusión. La corriente resultante se la conoce como corriente inducida por un haz de electrones, *EBIC* (“*electron beam induced current*”).
- **Respuesta espectral**: Mediante la medición de la curva de respuesta espectral se puede determinar indirectamente la longitud de difusión de un dispositivo fotovoltaico. Consiste en iluminar la celda con luz monocromática y medir la corriente de cortocircuito como función de la longitud de onda incidente.

A continuación, se describen en detalle las técnicas utilizadas durante la ejecución de la presente Tesis.

3.2.1 Método de decaimiento de la tensión a circuito abierto (*OCVD*)

El método de decaimiento de la tensión a circuito abierto (*OCVD*) es una técnica simple, no destructiva, de medición del tiempo de vida de los portadores minoritarios en dispositivos fotovoltaicos. Las primeras mediciones hechas empleando este método se realizaron en el año 1955 y el trabajo consistía en aplicar un pulso de corriente a través de una juntura p-n polarizándola así en directa [16, 17].

Cuando se cortaba dicho pulso de corriente, se abría el circuito y se observaba en el osciloscopio, la caída de la tensión de la juntura. Los portadores minoritarios son inyectados en la región de la base mientras dura el pulso de corriente, observándose que después de la caída inicial debida a la resistencia serie, la tensión de la juntura a circuito abierto decae en forma aproximadamente lineal con el tiempo. Este decaimiento lineal es seguido de otro decaimiento aproximadamente exponencial. La porción lineal de la curva permite determinar el tiempo de vida efectivo, el cual está asociado a efectos combinados de volumen y superficie. La interpretación teórica del método *OCVD* original se basa fundamentalmente en la teoría de junturas.

Dada una juntura *p-n*, sea p_n la densidad de huecos presentes en la región *n* en

equilibrio térmico y Δp , la densidad de huecos inyectados en exceso mediante un pulso de corriente. La densidad total de huecos en el borde de la juntura es [18, 19]:

$$p = p_n + \Delta p \quad (3.11)$$

De la teoría de junturas, la densidad de huecos en la región n está dada por:

$$p = p_n \exp(qV/kT) \quad (3.12)$$

donde V es la tensión de la juntura. En consecuencia, la tensión en función de los portadores en exceso resulta:

$$V = \frac{kT}{q} \ln \left(1 + \frac{\Delta p}{p_n} \right) \quad (3.13)$$

Asumiendo que la concentración de portadores en exceso, Δp , decae exponencialmente con un tiempo característico dado por el tiempo de vida efectivo, τ_{ef} [16, 20],

$$\Delta p = \Delta p_0 \exp(-t/\tau_e) \quad (3.14)$$

donde Δp_0 es la concentración de portadores en exceso cuando se termina el pulso de corriente directa. La constante $(1 + \Delta p_0/p_n)$ se puede evaluar en términos de la tensión en la juntura, a $t = 0$, V_0 :

$$V_0 = \frac{kT}{q} \ln \left(1 + \frac{\Delta p_0}{p_n} \right) \quad (3.15)$$

La tensión a circuito abierto en la juntura como función del tiempo se puede escribir como:

$$V = \left(\frac{kT}{q} \right) \ln \left\{ 1 + [\exp(qV_0/kT) - 1] \exp(-t/\tau_{ef}) \right\} \quad (3.16)$$

Para el caso $t/\tau_{ef} \ll 1$ y $V_0 \ll kT/q$, la ecuación (3.16) se puede simplificar:

$$V \cong V_0 - \left(\frac{kT}{q} \right) t/\tau_{ef} \quad (3.17)$$

La variación inicial de la tensión con el tiempo es lineal y la pendiente correspondiente permite calcular el tiempo de vida efectivo:

$$\tau_{ef} = - \left(\frac{kT}{q} \right) \frac{\Delta t}{\Delta V} \quad (3.18)$$

La teoría de juntura $p-n$ aplicada anteriormente supone que la densidad de portadores minoritarios inyectados es menor que la densidad de portadores mayoritarios, a esto se lo conoce como *condición de baja inyección*.

En estas primeras determinaciones de la vida media [21], se observó que partiendo de materiales cuya vida media en volumen era relativamente alta ($\approx 700 \mu s$), el τ_{ef} se reducía dramáticamente al fabricar el dispositivo. En cambio, si el material de partida presentaba vida media en el volumen baja, el dispositivo final poseía una vida media cercana al valor original.

Por ello, es razonable suponer que la vida media obtenida con este método representa una combinación de efectos de recombinación en volumen y en superficie [22, 23]:

$$\frac{1}{\tau_{ef}} = \frac{1}{\tau_v} + \frac{1}{\tau_s} \quad (3.19)$$

Técnica OCVD modificada

Se describe una variante de la técnica de decaimiento de la tensión a circuito abierto (OCVD) original que permite tener en cuenta efectos no considerados por esta última y que dificultan la interpretación de la curva obtenida ya que producen apartamientos de la linealidad expresada en la ecuación (3.17) de la sección anterior. Los parámetros adicionales que se consideran son las capacidades de juntura, difusión y transición en la región de carga espacial, la corriente de recombinación y la resistencia paralelo.

En la variante analizada, a diferencia de la técnica OCVD original [12, 13, 21], la inyección de portadores se realiza por medio de un pulso de luz que aporta la componente de la tensión dependiente del tiempo, sumada a una fuente de luz continua que contribuye polarizando la celda a medir en directa [14, 19]. Como se detallará más adelante, en determinadas condiciones esta configuración simplifica la interpretación de resultados.

Consideremos un dispositivo que conste de un emisor, una zona de carga espacial y la región de la base. Teniendo en cuenta el balance de cargas, la variación de la densidad de corriente en función el tiempo para una juntura p^+-n o n^+-p puede expresarse como [24]:

$$J(t) = -J_L + \frac{Q_n(t)}{\tau_p} + \frac{Q_r(t)}{\tau_o} + \frac{dQ_n(t)}{dt} + (c_i + c_j) \frac{dV}{dt} + \frac{V}{R_p} \quad (3.20)$$

donde J_L es la densidad de corriente fotogenerada; $Q_n(t)$ es la densidad de carga de portadores en exceso en la región de la base; $Q_r(t)$, la densidad de carga en la zona de transición; τ_p es la vida media fuera de la región de carga espacial; τ_o , la vida media dentro región de carga espacial; c_j es la capacidad de la juntura; c_i , la capacidad de la zona de transición; R_p es la resistencia paralelo. Definiendo Q_{no} y Q_g como las densidades de carga de portadores en exceso en la base y en la zona de carga espacial a $t = 0$, y teniendo en cuenta que $c_i = (Q_g / 2 V_T) \exp(V / 2 V_T)$, con $V_T = kT/q$ ($V_T \cong 26mV$, a temperatura ambiente), se obtiene la siguiente ecuación para la tensión a circuito abierto [24]:

$$\begin{aligned} & \left[\frac{Q_{no}}{V_T} \exp\left(\frac{V}{V_T}\right) + \frac{Q_g}{2V_T} \exp\left(\frac{V}{2V_T}\right) + c_j \right] \frac{dV}{dt} + \\ & + \frac{Q_{no}}{\tau_p} \left[\exp\left(\frac{V}{V_T}\right) - 1 \right] + \frac{Q_g}{\tau_o} \left[\exp\left(\frac{V}{2V_T}\right) - 1 \right] + \frac{V}{R_p} - J_L = 0 \end{aligned} \quad (3.21)$$

donde se puede definir la capacidad de difusión como: $c_d = (Q_{no} / V_T) \exp(V/V_T)$.

El circuito equivalente correspondiente a la ecuación (3.20) se representa en la Figura 3.6.

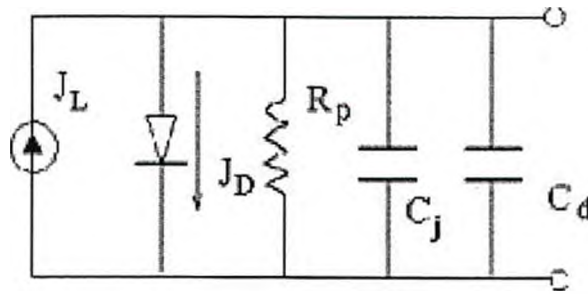


Figura 3.6. Circuito equivalente utilizado en la técnica OCVD

Como se ha mencionado, se considera el dispositivo iluminado mediante un pulso de luz sumado a una fuente de iluminación continua. Asumiendo que el pulso de luz se anula abruptamente a $t = 0$, la iluminación completa genera una densidad de fotocorriente dada por

$J_p + \Delta J$, donde J_p es la producida por la fuente continua y ΔJ es una función escalón que se anula a $t = 0$. Entonces, la tensión viene dada por $V(t) = V_p + \Delta V(t)$, donde V_p es la tensión producida por J_p (que es solución de la ecuación 3.20 para $t \rightarrow \infty$), y $\Delta V(t) = V(0)$ para $t < 0$, y $\Delta V(t) \rightarrow 0$ para $t \rightarrow \infty$.

Si $V_p \gg V_T$ con lo cual $\exp(V/V_T)$ y $\exp(V/2V_T)$ son mucho menores que 1 y además $V(0) \ll V_T$ (condición de pequeña señal), de manera tal que las exponenciales puedan desarrollarse a primer orden en el exponente, la ecuación (3.21) se aproxima por:

$$\frac{d(\Delta V)}{\Delta V} = -\frac{dt}{\tau_{ef}} \Rightarrow V(t) = V_p + V(0)e^{-t/\tau_{ef}} \quad (3.22)$$

donde la constante de tiempo del decaimiento, τ_{ef} , se puede escribir como:

$$\tau_{ef} = \frac{Q_{no} + \frac{Q_g}{2} \exp\left(-\frac{V_p}{2V_T}\right) + c_j V_T \exp\left(-\frac{V_p}{V_T}\right)}{\frac{Q_{no}}{\tau_p} + \frac{Q_g}{2\tau_o} \exp\left(-\frac{V_p}{2V_T}\right) + \frac{V_T}{r_p} \exp\left(-\frac{V_p}{V_T}\right)} \quad (3.23)$$

En las condiciones descritas, $V(t)$ tiene un comportamiento exponencial y la constante de tiempo τ_{ef} tiende a la vida media en la región de la base, τ_p , para grandes valores de V_p (típicamente, 500-600 mV).

Se ha desarrollado en el Grupo Energía Solar de la CNEA un equipo sencillo para la medición del tiempo de vida efectivo de portadores minoritarios mediante la técnica *OCVD* modificada. El mismo consiste básicamente en dos conjuntos de fuentes de luz: leds de *GaAs* de alta eficiencia (cuya longitud de onda es de 634 nm) que se encuentran alimentados por un generador de pulsos, aportando la componente dependiente del tiempo, mientras una lámpara de xenón de 12 V se halla conectada a una fuente de tensión estabilizada, proveyendo la componente continua de la tensión y polarizando la celda en directa.

El equipo cuenta con puntas de tungsteno que permiten medir el τ_{ef} de los dispositivos sin que los mismos requieran de una grilla de contacto metálica frontal y posterior permitiendo monitorear este parámetro en etapas intermedias de elaboración.

Aplicación de la técnica OCVD modificada - Simulaciones para determinar el $\tau_{efectivo}$ en celdas de silicio irradiadas con protones

La técnica OCVD modificada fue utilizada para evaluar la degradación de celdas solares de Si irradiadas con protones de 10 MeV. Para ello, se irradiaron celdas provenientes del mismo proceso de elaboración con diferentes fluencias: 1×10^8 , 1×10^9 y 1×10^{10} p/cm², midiéndolo luego el τ_{ef} mediante la técnica mencionada.

Se realizaron simulaciones numéricas de dispositivos que permitieron correlacionar los resultados experimentales con la degradación de la vida media de los portadores minoritarios en la base. El análisis detallado de los resultados puede verse en la referencia [25].

En la Tabla 3.1 se muestran los valores de vida media efectiva medidos, los de vida media en la base inferidos en base a la simulación numérica del método OCVD, y los calculados utilizando el modelo de degradación según el cual la variación de la inversa de la vida media de portadores minoritarios de la base en celdas solares de silicio cristalino (τ_{base}^{-1}) es proporcional a la fluencia (ϕ) [26] y la constante de proporcionalidad K_τ .

Tabla 3.1. Valores de los tiempos de vida media efectiva medida, tiempos de vida media de la base simulado y calculado para tres celdas de silicio irradiadas.

Celda	Dosis (p/cm ²)	$\tau_{efectivo}$ medido (μs)	τ_{base} simulado (μs)	τ_{base} calculado (μs)
271-08	S/irradiar	7,0	14,0	
	$0,94 \times 10^8$	6,9	13,9	13,7
271-20	S/irradiar	6,0	13,0	
	$9,94 \times 10^8$	5,9	11,2	10,9
271-04	S/irradiar	5,9	13,0	
	$9,94 \times 10^{10}$	3,1	6,8	4,4

El coeficiente de daño, K_τ , usado para calcular el τ_{base} fue $K_\tau = 1,5 \times 10^{-11} \mu s^{-1} cm^2 p^{-1}$,

el cual resultó del análisis del daño producido en celdas similares a las irradiadas en esta experiencia.

El objetivo fue verificar resultados teóricos y permitir la medición de la vida media efectiva τ_{ef} utilizando la técnica *OCVD*, para dosis intermedias con respecto a las usadas en la primera experiencia. Las celdas irradiadas (271-04, 271-06 y 271-20) provenían del mismo proceso de elaboración que las utilizadas en el primer experimento.

El ensayo se llevó a cabo de manera similar al anterior, agregándose en el montaje un radiómetro desarrollado en el laboratorio del GES, para obtener una mayor repetitividad en la irradiancia de la luz utilizada para la medición de la curva I-V.

3.2.2 MÉTODO DE DECAIMIENTO DE LA FOTOCONDUCTIVIDAD (*PCD*)

El método de decaimiento de la fotoconductividad (*PCD*), es una técnica para la determinación del tiempo de vida de los portadores minoritarios en dispositivos fotovoltaicos y para el estudio de parámetros importantes como la velocidad de recombinación superficial y la densidad de trampas, entre otros [27, 28].

Básicamente, consiste en hacer circular una corriente a través de una muestra semiconductor y observar mediante un osciloscopio, el decaimiento de los portadores generados en exceso en función del tiempo. La vida media de los portadores minoritarios se define como el tiempo requerido para que los portadores decaigan a $1/e$ de su valor inicial. Estos portadores en el semiconductor se generan con un “*flash*” intenso o un pulso de luz de corta duración.

La medición de la vida media depende del modo de generar los portadores en exceso (electrones o huecos) en el SC. Una posibilidad para calcular la vida media es mantener la tasa de generación en un valor conocido: $G_L = \Delta N / \tau$ y hacer el balance entre las expresiones de generación y recombinación. Este se conoce como el método de decaimiento de la fotoconductancia en el estado estacionario (*PCD*) [29].

Otra alternativa es interrumpir abruptamente la generación de portadores y medir la tasa de decaimiento de estos portadores en función del tiempo: dn / dt . Dado que la generación

se hace cero, la variación en la concentración de electrones es el debido a la recombinación:

$$\frac{dn}{dt} = - \frac{\Delta n}{\tau} \quad (3.24)$$

Esta aproximación se conoce como el método de decaimiento en el estado transitorio. En ambos métodos es necesario medir la concentración de electrones en exceso, Δn . El modo más comunmente usado es mediante la medición de la conductancia de la muestra y la variación con la iluminación o con el tiempo.

Para realizar esta medición se coloca la muestra a ensayar en un circuito que mida la resistencia de la muestra al circular una corriente a través de ella y determinar la caída de tensión resultante.

Cuando se enciende la iluminación sobre la oblea, la concentración de electrones y de huecos aumenta en Δn y Δp , respectivamente. Como cada fotón incidente genera un par $e^- h^+$, entonces $\Delta n = \Delta p$. Como resultado, la conductividad aumenta y el exceso de fotoconductividad está dado por:

$$\Delta \sigma_L = qW(\mu_n + \mu_p) \Delta n \quad (3.27)$$

donde W es el espesor de la muestra, μ_n es la movilidad de los electrones (típicamente, $1100 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$) en Si , μ_p es la movilidad de los huecos ($400 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$) y q es la carga eléctrica. Pero es importante recordar que la movilidad es, a su vez, función de la densidad de portadores, tanto provenientes de los dopantes como los generados, y de la temperatura. Por tanto, la ecuación (3.27) debe ser iterada para obtener Δn y $(\mu_n + \mu_p)$. Por otra parte, el desbalance en la concentración de portadores está representado por la siguiente ecuación [30]:

$$G - \frac{d \Delta n}{dt} = R_V + \Delta n(W)S_W + \Delta n(0)S_0 \equiv \frac{\Delta n}{\tau_{ef}} \quad (3.28)$$

donde G es la generación de portadores en el volumen de la muestra (dentro del intervalo $(0, W)$), S_0 y S_W son las velocidades de recombinación en las superficies de la muestra, Δn es el exceso de portadores minoritarios y R_V es la recombinación en el volumen.

Hallado el valor de Δn se puede determinar el valor de la vida media para los dos métodos de medición: estado estacionario y transitorio (ecuaciones 3.29a y 3.29b, respectivamente) [29].

$$\tau_{SSPCD} = \frac{\Delta n}{G_L} \quad (3.29a)$$

$$\tau_{PCD} = - \frac{1}{\frac{1}{\Delta n} \frac{dn}{dt}} \quad (3.29b)$$

Las mediciones de vida media empleando esta técnica tienen en cuenta tanto el decaimiento debido a las impurezas y/o defectos del material de partida como de la muestra a medir. Estas trampas pueden ser parcialmente saturadas, poniendo a la muestra en condiciones de iluminación similares a las de operación del dispositivo que se vaya a fabricar (celda o sensor FV).

Para generar exceso de portadores, se puede usar como fuente de luz un “flash” de Xenón; este tipo de fuente provee un límite inferior de detectabilidad del método de 20 μ s, aproximadamente. Sin embargo, para mediciones de tiempos de vida menores que 20 μ s, se requiere de pulsos de luz más rápidos. Para ello, se pueden emplear *LEDs* de *GaAs* de alta eficiencia, con una longitud de onda máxima de emisión de 860 nm, y que permiten alcanzar una duración del pulso del orden de la centena de ns.

Una fuente de luz más efectiva es un láser de *Nb:YAG*, el cual provee radiación monocromática con una longitud de onda de 1,06 μ m. Para longitudes largas como esta, es posible llegar a todo el volumen de la muestra de silicio, ya que su longitud de penetración es de 0,85 mm, mientras que con los *LEDs* de *GaAs* la longitud de penetración de la radiación en el silicio es sólo de 40 μ m. Además, el Láser resulta más ventajoso ya que la intensidad de la radiación es considerablemente mayor que la obtenida con los *LEDs*.

Decaimiento de la fotoconductividad en estado cuasi estacionario (QSSPCD)

Cuando un pulso de luz dado tiene una duración mayor que el tiempo de generación de los portadores minoritarios de carga en exceso en el material semiconductor, se emplea la técnica de medición que se denomina **fotoconductividad en el estado cuasi-estacionario**, *QSSPCD*, (*Quasi-Steady-State PhotoConductance*).

En estas condiciones se establece un exceso en la concentración de electrones y huecos en el material que cumple $\Delta n = \Delta p$, donde Δn y Δp son las variaciones en las concentraciones

de electrones y huecos, respectivamente. La fotoconductancia de la muestra iluminada es proporcional a la generación de portadores y se obtiene de la siguiente ecuación:

$$\sigma_L(t) = \int_0^W q [\Delta n(t) \mu_e + \Delta p(t) \mu_p] dx \approx q \overline{\Delta n}(t) [\mu_e + \mu_p] W \quad (3.30)$$

donde W es el espesor de la muestra, q la carga del electrón, μ_n y μ_p las movilidades de los electrones y los huecos respectivamente, $\overline{\Delta n}$ es el promedio de la variación de la densidad de electrones en todo el espesor de la muestra. La movilidad de los portadores decrece al aumentar la generación de huecos y electrones. Por ello, la ecuación (3.30) debe ser iterada para hallar $(\mu_n + \mu_p)$ y $\overline{\Delta n}$ consistentemente con la fotoconductancia medida.

El desbalance en la concentración de portadores está representado por:

$$G - \frac{d \Delta N}{dt} = R_v + \Delta n(W) S_w + \Delta n(0) S_0 \equiv \frac{\Delta N}{\tau_{ef}} \quad (3.31)$$

donde G es la generación de portadores en el volumen de la muestra (dentro del intervalo $(0, W)$), S_0 y S_w son las velocidades de recombinación en las superficies de la muestra, ΔN es el exceso de portadores minoritarios y R_v es la recombinación en el volumen. Estos parámetros se definen con las siguientes ecuaciones:

$$\Delta N = \int_0^W \Delta n dx \equiv \overline{\Delta n} W \quad (3.32)$$

$$R_v = \int_0^W \frac{\Delta n}{\tau} dx \equiv \frac{\Delta N}{\tau} \quad (3.33)$$

siendo τ el tiempo de vida media promedio en el volumen de la muestra. La ecuación (3.32) es a la vez la definición del τ_{ef} y mediante una pasivación apropiada para disminuir la recombinación superficial, como se explica en siguiente sección, se desprecian los términos correspondientes obteniendo que $\tau_{ef} \approx \tau$. Entonces puede escribirse:

$$\tau \approx \frac{\overline{\Delta n}}{\frac{G}{W} - \frac{d \Delta n}{dt}} \quad (3.34)$$

donde $\overline{\Delta n}$ se obtiene a partir de la fotoconductividad medida (3.30) y τ incluye los términos

correspondientes a la recombinación Auger, a la recombinación radiativa y a la recombinación a través de los niveles de trampa.

La determinación de la tasa de generación de portadores, G , está basada en la determinación de la irradiancia incidente sobre un sensor ubicado en el mismo plano donde se coloca la muestra a medir, de manera tal que ambos dispositivos reciban la misma intensidad de la luz pulsada o “*flash*”. La corriente fotogenerada en la celda a medir se obtiene a partir de la caída de tensión V_G sobre una resistencia. En consecuencia G y V_G son magnitudes proporcionales y están relacionadas mediante la ecuación:

$$G = \frac{J_f (1 \text{ Sol}) T_m}{q V_G (1 \text{ Sol})} V_G = K_G V_G \quad (3.35)$$

donde $J_f (1 \text{ Sol})$ es la corriente fotogenerada ($= 38 \text{ mA} / \text{cm}^2$, en el sensor), bajo una iluminación estándar de $1 \text{ Sol} \equiv 1,3 \text{ kW/m}^2$, y $V_G (1 \text{ Sol})$ es la tensión generada por la celda a medir bajo la misma iluminación. El factor T_m relaciona la fotogeneración en la muestra con la medida de la irradiancia en el sensor.

El sensor tiene un tratamiento antirreflectante en la superficie, entonces $T_m \approx 1$. Dependiendo del tratamiento superficial sobre la muestra a medir se debe modificar el valor de T_m . Para muestras pulidas químicamente sin tratamiento AR, $T_m \approx 0,74$. En este trabajo se utilizó un valor de $T_m \approx 0,6$ considerando que la muestra a medir se encuentra inmersa en la solución de HF.

Con la determinación de $\overline{\Delta n}$ y de G , se obtiene el valor de τ_{ef} en función del exceso en la concentración de portadores minoritarios del ante la excitación del “*flash*”. En la Figura 3.7 se muestra el decaimiento de la tensión en función del tiempo.

Por lo tanto si se desprecian los términos correspondientes a la recombinación Auger y a la radiativa, cuya dependencia con $\overline{\Delta n}$ es conocida [31], se obtiene el tiempo de vida media debida a la recombinación por trampas en el volumen del material en función de la densidad en exceso de los portadores minoritarios.

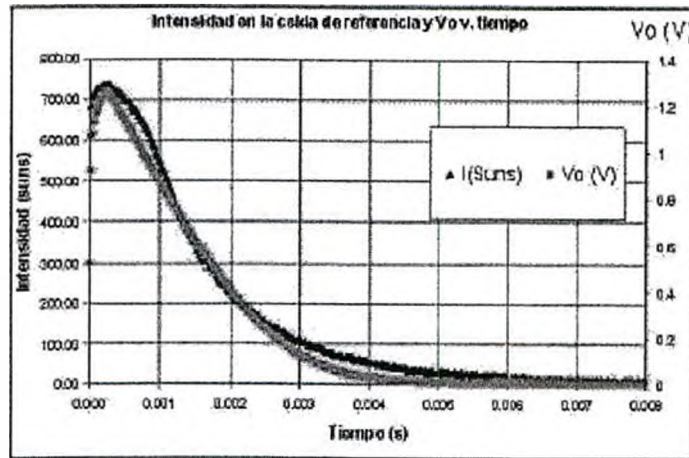


Figura 3.7. Curva de la intensidad del pulso en función del tiempo medida con la celda de referencia (eje derecha -), y curva de la tensión de salida de la muestra acoplada al circuito (eje izquierda -).

El equipo de *PCD* permite la medición de τ a partir de la ecuación (3.35), para esto se requiere de la determinación de σ_L y de G . En lo sucesivo se explicará el funcionamiento del dispositivo experimental y los pasos a seguir para la medición de estas variables. Como resultado final se obtiene la dependencia de τ con Δn y por ende, el tiempo de vida media de los portadores minoritarios que corresponde al semiconductor en equilibrio ($\Delta n = 0$).

El instrumento está basado en el principio de la absorción de fotones del semiconductor (SC) cuando se coloca una muestra del mismo sobre la bobina de un circuito *LC* paralelo. Al colocar la muestra de SC sobre el inductor se induce una tensión producto del campo magnético oscilatorio del circuito, haciendo circular la corriente dentro del SC. La energía absorbida por éste es proporcional al producto del cuadrado de la tensión a través del inductor, la conductividad de la muestra y el espesor de la misma. La constante de proporcionalidad depende de la inductancia de la bobina L y de la geometría de la muestra.

Para obtener la interacción óptima entre la muestra y el oscilador se requiere de una alta tensión en el inductor, un acoplamiento cercano y un valor bajo de inductancia. Debido a la baja L y la razonable impedancia del circuito, se emplean frecuencias altas. Cuando la muestra de SC se acopla magnéticamente con el inductor, la pérdida de energía en el circuito *LC* del semiconductor puede idealizarse como una resistencia en serie R_m acoplada al inductor L .

Se muestra el circuito equivalente en la Figura 3.8, donde la resistencia debida al semiconductor acoplado es una R_0 dada por el SC sin excitación luminosa, una resistencia $r = r(t)$ que depende del tiempo y está dada por la variación de la fotoconductancia con el tiempo de la muestra bajo excitación.

La potencia disipada en la muestra es proporcional a la conductividad σ (para una geometría y frecuencia fija) de la misma. Las variaciones en la conductividad debido a la excitación de luz pueden representarse como:

$$\sigma(t) = \sigma_0 + \sigma_L(t) \quad (3.36)$$

donde σ_0 es la conductividad de la muestra con sus portadores de carga en equilibrio y $\sigma_L(t)$, el aumento de la conductividad fotoinducida o fotoconductividad. O bien puede expresarse en función de la resistencia de la muestra (Figura 3.8):

$$R_m(t) = R_0 + r(t) \quad (3.37)$$

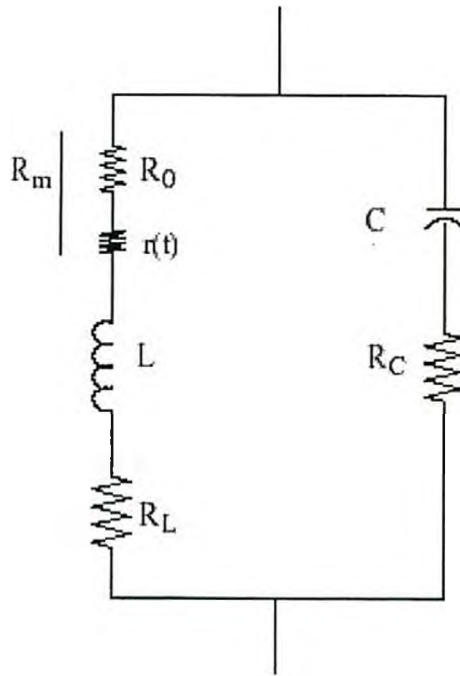


Figura 3.8. Circuito equivalente cuando la muestra se acopla magnéticamente al inductor del equipo experimental para medir el tiempo de vida media.

Para el circuito de la Figura 3.8 antes de colocar la muestra ($R_m = 0$), el factor de mérito Q_0 está dado por:

$$Q_0 = \frac{\omega_r L}{R_L + R_C} \quad (3.39)$$

donde $\omega_r = 2\pi\nu_r$ siendo ν_r la frecuencia de resonancia del circuito sin muestra, R_L la resistencia interna de la inductancia y R_C la resistencia interna del capacitor. Cuando se coloca la muestra, el factor de mérito se modifica Q_R , obteniéndose:

$$Q_R = \frac{\omega_R L}{R_L + R_C + R_0} = \frac{\omega_R L}{R} \quad (3.40)$$

donde ω_R es la nueva frecuencia de resonancia. Al iluminar la muestra la ecuación (3.38) puede expresarse con su dependencia en el tiempo dada por $r(t) \ll R_0$:

$$Q(t) = \frac{\omega_r L}{R + r(t)} \approx \frac{\omega_r L}{R} \left[1 - \frac{r(t)}{R} \right] \quad (3.41)$$

considerando además que $\sigma_L \ll \sigma_0$ puede escribirse a partir de la ecuación (3.37):

$$\frac{1}{\sigma(t)} \approx \frac{1}{\sigma_0} \left[1 - \frac{\sigma_L(t)}{\sigma_0} \right] \quad (3.42)$$

Como $R_m(t) \propto 1/\sigma(t)$ se obtiene $r(t) \propto \sigma_L(t)/\sigma^2(t)$ y así puede escribirse [31]:

$$Q(t) = Q_R [1 - k \sigma_L(t)] \quad (3.43)$$

El circuito está diseñado para obtener una tensión a la salida proporcional a $Q(t) - Q_R$, cuando se trabaja en condición de resonancia, y por tanto, proporcional al aumento de la conductividad fotoinducida.

En la Figura 3.9 se muestra esquemáticamente el circuito del equipo para medir el tiempo de vida media con la técnica PCD. La muestra de Si se sumerge en un recipiente con una solución de HF (50%) para reducir la recombinación superficial y este se apoya sobre una bobina de 2,5 cm de diámetro acoplándose al circuito LC paralelo. Una fuente de radiofrecuencia de 10 MHz conectada a una tensión constante V_{bb} y a una fuente de corriente constante alimenta al circuito con la muestra acoplada. La tensión alterna sobre el transistor JFET es igual a la tensión $v_g = V_L \sin \omega t$ sobre la inductancia (desfasado 180°), donde V_L es

proporcional al factor de mérito $Q(t)$ del circuito.

Con el capacitor C_0 se logra un filtro pasabajos para detectar los cambios en V_L , de esta manera que la tensión de salida V_o es proporcional a los cambios en el factor de mérito del circuito, y por tanto, proporcional a los cambios en la conductividad al iluminar la muestra con un “flash”. Utilizando un capacitor y una resistencia variable conectados al circuito se logra la condición de resonancia con cada muestra colocada. Para establecer la constante de proporcionalidad entre la fotoconductancia y la V_o es necesario hacer una calibración utilizando obleas de Si de resistividad conocida o bien medida por la técnica de cuatro puntas. La fotoconductancia es entonces:

$$\sigma_L(t) = K_0 V_o \tag{3.44}$$

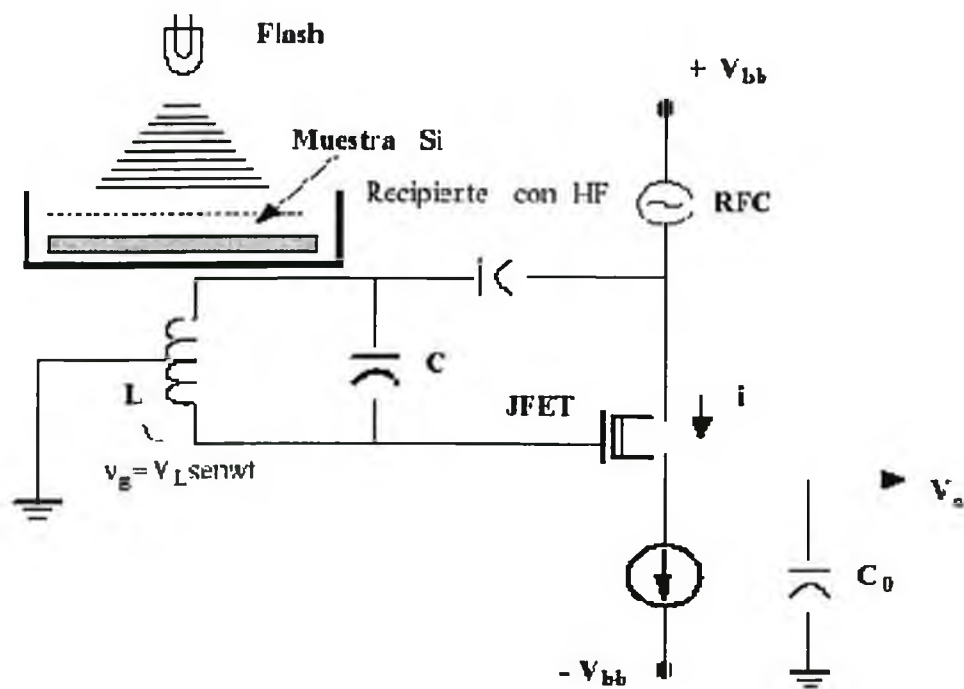


Figura 3.9. Circuito del equipo PCD para medición de la fotoconductividad de la muestra.

Para pasivar la superficie, es decir, disminuir la recombinación superficial de las muestras se las sumerge en una solución de HF al 50% durante la medición con la técnica PCD y realizando previamente una limpieza de las muestra bajo ensayo.

Para lograr una correcta pasivación de la superficie se requiere de muestras con superficies pulidas y limpias. El objetivo es lograr una superficie lo suficientemente libre de

daños mecánicos o químicos como para hacer efectiva la pasivación con *HF*.

Una muestra de *Si CZ* tipo p, de aproximadamente 300 μm de espesor y una resistividad de la base de 1 Ωcm con la limpieza anteriormente mencionada tiene una velocidad de recombinación, S , que dependiendo de la longitud de onda de la luz que excita los portadores de carga puede estar entre 5000 cm/s y 300 cm/s. Si se logra pasivar correctamente la muestra la S puede reducirse hasta 25 cm/s. De esta manera se puede considerar que el tiempo de vida media de los portadores minoritarios está básicamente dado por la recombinación en volumen.

Para pasivar la superficie durante la medición, la muestra se sumerge dentro de un recipiente de teflón en la solución de *HF*. La muestra se deja caer dentro de la solución de manera que apoye, en el fondo del frasco, justo por encima del inductor del equipo *PCD*. El espesor del fondo debe ser lo mas delgado posible, de manera minimizar la distancia entre el inductor y la muestra y facilitar el acople magnético.

Se utiliza el coeficiente de transmisión de la muestra T_m , para calcular el tiempo de vida media de las muestras. Al sumergir la muestra en la solución este coeficiente debe modificarse teniendo en cuenta que la superficie líquida representa una superficie más en la cual la luz del “*flash*” se refleja y transmite. El valor utilizado en las mediciones fue de $T_m \equiv 0,6$ extraído de la literatura.

Además, se comprobó que existe una dependencia temporal del tiempo de vida media medido con el tiempo de inmersión de la muestra en la solución. En la Figura 3.10 se observa la dependencia del tiempo de vida media medido sobre una muestra que se mantuvo sumergida mientras se realizaban sucesivas mediciones. Se definió el tiempo máximo de inmersión de las muestras en la solución de *HF* cuando la vida media de portadores minoritarios decreía en un 1%, es decir no más de dos minutos de inmersión en la solución.

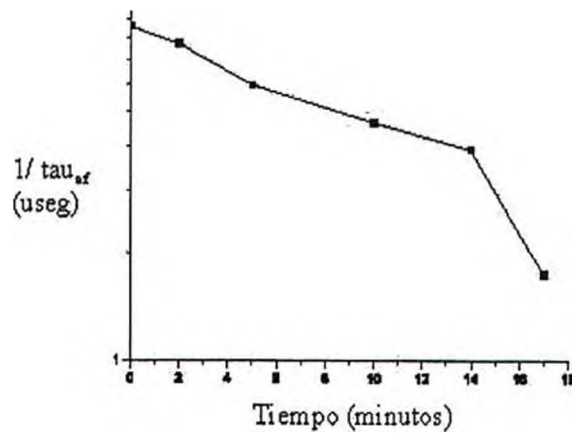


Figura 3.10. Tiempo de vida media medido en función del tiempo de inmersión en HF.

Al utilizar un recipiente para sumergir la muestra, el acoplamiento magnético entre la inductancia y la muestra difiere al de una medición de la muestra directamente sobre la bobina. Como consecuencia, se debe realizar una calibración del equipo PCD con el recipiente en contacto con la bobina y con la misma cantidad de solución pasivante que se usará durante las mediciones.

En estas condiciones se mide el V_o obtenido al colocar diferentes muestras de resistividad conocida, obteniendo una nueva constante de calibración para la medición de muestras que requieren pasivación superficial.

Aplicación de la técnica PCD - Determinación del tiempo de vida media efectiva en obleas de Si irradiadas con protones

El Grupo Energía Solar de la CNEA cuenta con un equipo para medir tiempo de vida media mediante la técnica conocida como decaimiento de la fotoconductividad, “*PhotoConductance Decay*” (PCD). Las experiencias llevadas a cabo para esta Tesis, incluyeron la calibración y la puesta a punto del equipo de medición, las adaptaciones de una planilla de cálculo que permite procesar las mediciones y la implementación de una técnica para la pasivación de la recombinación superficial.

La técnica PCD fue utilizada para evaluar el daño en obleas de silicio cristalino, estudiando a la vez el correcto funcionamiento del equipo.

Se irradiaron 12 muestras de Si tipo *p* (procedencia Bayer), de $1,4\Omega cm$ de resistividad

con el haz externo del acelerador TANDAR (CNEA-CAC) utilizando protones de 10 MeV, con fluencias entre 10^8 y 10^{13} p/cm². Esta experiencia es la estándar utilizada en caracterización de celdas solares por el Laboratorio de Propulsion de Aeronaves, JPL (“*Jet Propulsion Laboratory*”) para emular el daño que recibirían las muestras en el espacio [32]

Se midieron las muestras irradiadas mediante la técnica *PCD* en el modo cuasi-estacionario, *QSSPCD*. En la Figura 3.11 se observa una curva típica obtenida en la medición de una muestra de *Si* y el ajuste lineal correspondiente.

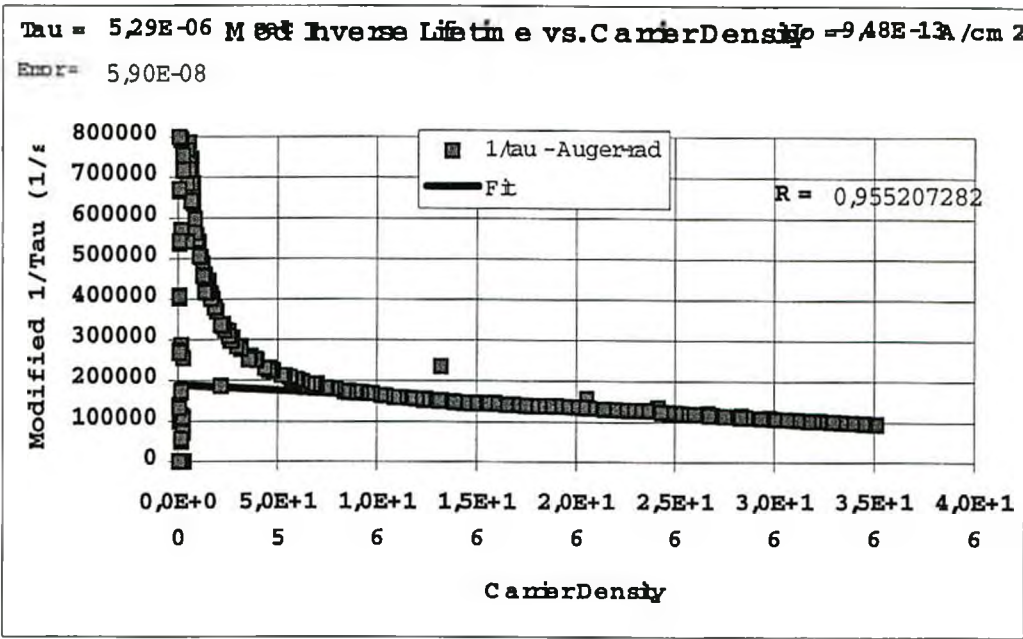


Figura 3.11. Densidad de portadores en exceso en función del tiempo para la determinación de la vida media de portadores mediante la técnica QSSPCD.

Las muestras de *Si* fueron cortadas de dimensiones apropiadas (3 cm x 3cm) para permitir el acoplamiento magnético con el inductor del equipo *PCD*.

Las mediciones se realizaron con las muestras sumergidas en una solución de *HF*, la cual pasiva los niveles superficiales de la oblea. Se efectuaron dos mediciones sobre cada muestra irradiada, tratando de minimizar el tiempo de medición dado que se observó una disminución del tiempo de vida medido al aumentar el tiempo de inmersión en la solución de *HF*, probablemente debido a una degradación del efecto pasivante con el tiempo[29].

El tiempo de vida media se determinó antes y después de la irradiación con protones. Los resultados para las muestras irradiadas con 10^{13} p/cm² no pudieron medirse con el equipo

PCD en el modo *QSSPCD*, estimando que el tiempo de vida media efectivo se encontraba por debajo del umbral de detección del instrumento.

Los resultados obtenidos de las muestras irradiadas se muestran en la Figura 3.12, observándose el tiempo de vida media de los portadores minoritarios de carga, normalizado al valor inicial, en función de la fluencia irradiada. Este decrece al aumentar la fluencia, para fluencias mayores a 10^9 p/cm² según la ecuación[33]:

$$\frac{1}{\tau_{ef}} = \frac{1}{\tau_o} + K_{\tau} \Phi \quad (3.45)$$

donde τ_{ef} es el tiempo de vida media efectiva después de la irradiación, τ_o es el tiempo de vida media efectiva inicial de la muestra antes de la irradiación, K_{τ} es la constante de proporcionalidad y ϕ es la fluencia [34]. La constante de daño K_{τ} está dada por $K_{\tau} = \sigma v_{th} F_e P_R$, donde σ es la sección eficaz de captura; v_{th} , la velocidad térmica igual a $(3 k_B T/m)^{1/2}$; F_e , la probabilidad de Fermi de ocupación del centro de recombinación generado y P_R , el número de centros de recombinación por unidad de área generado por cada partícula.

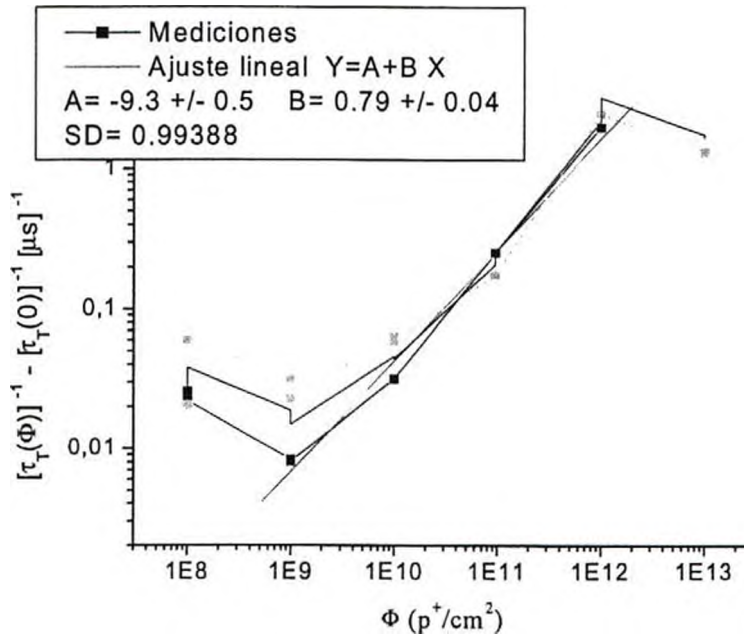


Figura 3.12. Tiempos de vida media efectiva normalizados al valor inicial medidos en muestras de Si tipo p irradiadas con diferentes fluencias.

Cada punto experimental es el promedio de los tiempos de vida medidos normalizados de las dos muestras irradiadas con cada fluencia. Con excepción de las muestras irradiadas con 10^8 p/cm² y 10^9 p/cm², ya que no se contó con los dos ejemplares por rotura de los mismos. Los resultados mostraron que la inversa del tiempo de vida media asociado a defectos tiene una dependencia lineal con la fluencia por encima de 10^9 p/cm² (Figura 3.12). Las muestras irradiadas con 10^8 p/cm² presentaron una disminución mayor que las irradiadas con 10^9 p/cm², mostrando en consecuencia un apartamiento con lo esperado.

3.2.3 MEDICIÓN DE LA RESPUESTA ESPECTRAL

La respuesta espectral ($RE(\lambda)$) de una celda solar es la densidad de corriente de cortocircuito, por unidad de potencia incidente de luz monocromática, en función de la longitud de onda (λ). Se utiliza la corriente de cortocircuito para la definición de respuesta espectral por ser ésta lineal con la irradiancia [1, 2, 3].

La eficiencia cuántica externa (EQE) [8] se define como el cociente entre el número de electrones $n_e(\lambda)$ que circulan en el circuito externo por unidad de tiempo y el número de fotones $n_f(\lambda)$ incidentes por unidad de tiempo sobre la celda:

$$EQE = \frac{n_e}{n_f(\lambda)} \quad (3.46)$$

Considerando que $n_e = I t / q$ y que $n_f = E(\lambda) t / h \nu$, donde I es la corriente que circula por el circuito generada por la luz monocromática, t el tiempo, q la carga del electrón, h la constante de Planck, ν la frecuencia y $E(\lambda)$ es la irradiancia de la luz monocromática, cuya unidad es W/m². La relación entre la respuesta espectral absoluta y la eficiencia cuántica externa está dada por [3]:

$$EQE = \frac{RE(\lambda) h c}{q \lambda} \quad (3.47)$$

El método para la determinación de la respuesta espectral relativa o absoluta de una celda fotovoltaica lineal según Normas IRAM y ASTM, requiere el uso de luz de polarización a la que se superpone el haz monocromático[1, 3]. Sin embargo, se puede demostrar que en

celdas solares lineales¹, como es el caso de la monojuntura de Si, la respuesta espectral no cambia significativamente si no se polariza el dispositivo. En cambio, en dispositivos no lineales (celdas multijunturas, por ejemplo) es imprescindible usar luz de polarización (por ejemplo, un simulador solar) y el haz de luz pulsado (Norma ISO/DIS 15387).

En estos métodos normalizados, se hace incidir normalmente sobre la celda 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 condiciones normales de operación.

El haz de polarización, produce en la corriente de cortocircuito de salida de la celda una componente de corriente continua (cc), mientras que el haz pulsado monocromático produce una componente variable (ca). A medida que se varía la longitud de onda del haz monocromático, se registra la componente pulsada (ca) de la corriente de cortocircuito.

En la Figura 3.13 pueden verse las curvas típicas de la respuesta espectral y de la eficiencia cuántica en función de la longitud de onda para una celda solar de silicio cristalino obtenidas por simulación numérica mediante el programa de simulación *PC1D-5* [35].

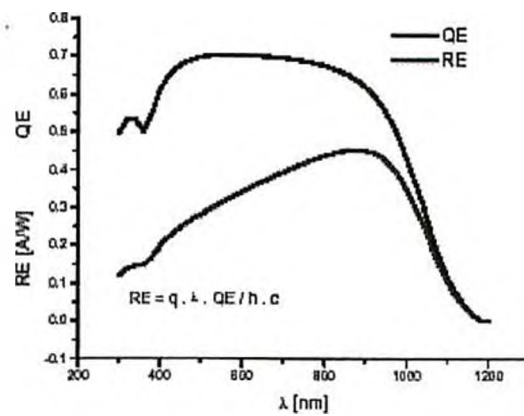


Figura 3.13. Curvas típicas de la RE y de la EQE en función de la longitud de onda, de celdas de Si cristalino.

¹ La linealidad de un dispositivo fotovoltaico, se refiere a la linealidad de su corriente de cortocircuito con la irradiancia en determinado intervalo.

Dado que para longitudes de onda cortas (típicamente 300-400 μm), el coeficiente de absorción del silicio es alto y, por ende, la luz es absorbida cerca del contacto frontal. Las curvas para dichas longitudes de onda reflejan las propiedades y características de la cara frontal de la celda solar. En cambio, para longitudes de onda largas (900-1100 μm), la eficiencia cuántica externa y la respuesta espectral dependen de las propiedades del volumen y de las características de la cara posterior de la celda solar, jugando un papel muy importante la ya mencionada longitud de difusión de los portadores minoritarios dentro del material [8].

El diseño y la fabricación del equipo para la medición de respuesta espectral se basó en la Norma IRAM Argentina 210013-14 [3] y la ASTM N° E 297 [1, 2].

Estas normas definen los conceptos referidos a respuesta espectral absoluta y relativa, como también las características básicas del equipo de medición:

- se exige un mínimo de 12 filtros pasabandas de ancho de banda angosta de 10 nm,
- la celda debe permanecer en un intervalo de temperatura de $(25 \pm 5)^\circ\text{C}$,
- una homogeneidad del haz monocromático en el plano de prueba de $\pm 2,5\%$,
- una luz de polarización que produzca sobre el plano de prueba una irradiancia de por lo menos $700\text{W}/\text{m}^2$ con una homogeneidad de $\pm 10\%$,
- el simulador solar de dicha polarización debe ser Clase C o mejor [ASTM N° E 927],
- un conmutador mecánico rotativo ("*chopper*") que permita la modulación pulsada de la fuente monocromática,
- un amplificador de detección sincrónica ("*lock-in*") para detectar señales de baja amplitud de la celda bajo ensayo; este instrumento debe operar en condiciones de cortocircuito tanto a bajo nivel en a-c, como en alto nivel d-c.

3.2.3.1 Equipo de medición

Se realizaron ensayos preliminares a fin de definir las características del equipo de medición de respuesta espectral.

Se midió la distribución de intensidad de la luz pulsada sobre una base de 196 cm^2 y se

definió un área de 32 cm^2 con una homogeneidad de acuerdo a lo indicado en la Norma. Se determinó asimismo que la distancia mínima entre la fuente monocromática y la base debe ser de 95 cm , a fin de lograr una homogeneidad en la intensidad del haz que cumpla las especificaciones de la Norma.

A partir de los estos ensayos, se diseñó el equipo definitivo, que se muestra en la Figura 3.14. Consiste en una fuente luminosa, un condensador formado por dos lentes plano-convexas para enfocar el haz, un “*chopper*”, un preamplificador junto con un amplificador coherente (“*lock-in*”), un conjunto de filtros de banda angosta ($\pm 10\text{nm}$) entre 300 y 1100 nm para lograr que el haz pulsado incidente sea monocromático, una base termostatzada en donde se ubica el portamuestra, una fuente de luz de polarización: tres lámparas de tungsteno con reflector dicróico y la celda solar a estudiar. Para la medición de la respuesta espectral, también es necesario un circuito eléctrico capaz de poner a la celda solar en condiciones de cortocircuito, el cual se detalla más adelante.

Su estructura es de hierro, con un acabado negro mate para evitar reflexiones y sus dimensiones son $(55 \times 70 \times 130) \text{ cm}^3$.

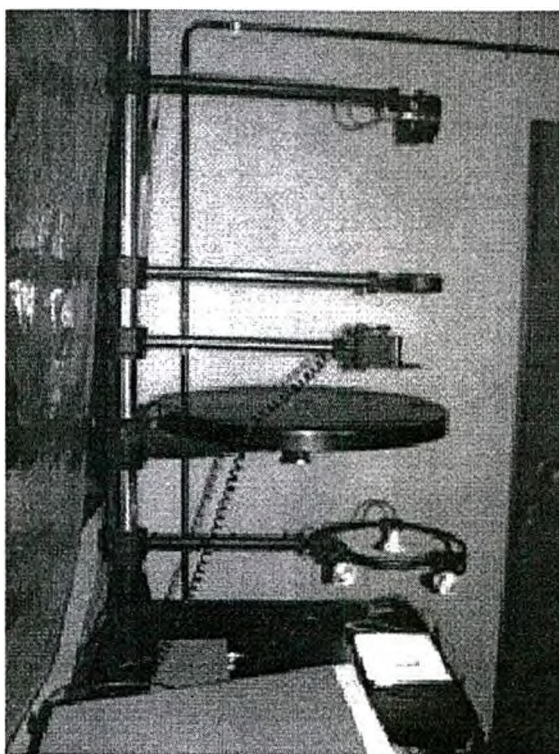


Figura 3.14. Vista del equipo completo.

Las lámparas de la luz de polarización se ubican a 22,5 cm a fin de producir sobre la zona de medición una irradiancia que cumpliera con lo dispuesto por la norma, mientras que la lámpara principal se ubica a 102 cm desde la base. Por otra parte, el “*chopper*” se coloca a unos 57 cm desde la base de tal manera que el foco del condensador se encuentre sobre las paletas del mismo.

Se midieron las homogeneidades de los haces monocromático y de la luz de polarización, a fin de ubicar la zona más conveniente para disponer las celdas solares a medir. La Figura 3.15 y la Figura 3.16 presentan la distribución de intensidad de la luz monocromática y la homogeneidad del haz de polarización, respectivamente.

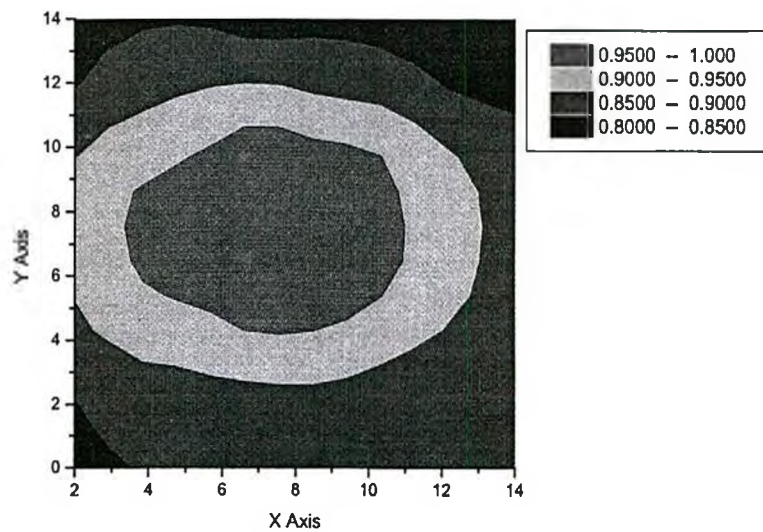


Figura 3.15. Distribución de intensidad de la luz monocromática.

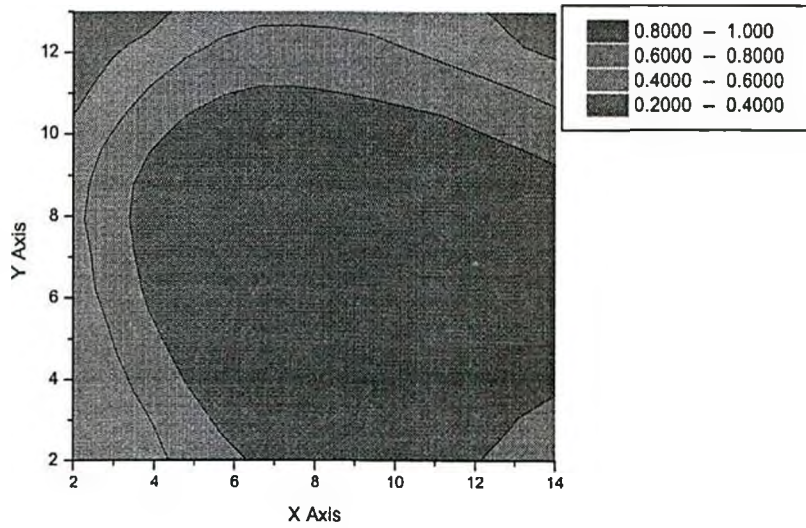


Figura 3.16. Homogeneidad de la luz de polarización sobre la zona a medir

Los sensores utilizados para las mediciones se muestran en la Figura 3.17.

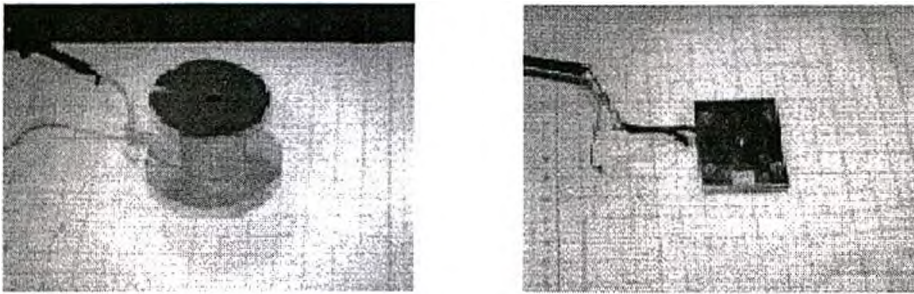


Figura 3.17. Fotosensores utilizados para las mediciones de homogeneidad del haz monocromático pulsado y de la luz de polarización..

Se observa que tanto para el haz monocromático como para la luz de polarización fue posible definir áreas homogéneas (zonas rojas) suficientemente grandes: $(6 \times 8) \text{ cm}^2$ en el primer caso y $(8 \times 8) \text{ cm}^2$ en el segundo caso. Dado que las celdas a medir eran de $(2 \times 4) \text{ cm}^2$ y de $(4 \times 4) \text{ cm}^2$, las mediciones se realizaron satisfactoriamente en cuanto a la homogeneidad de la luz incidente.

La Figura 3.18 representa esquemáticamente el circuito eléctrico utilizado para poner a la celda solar en condiciones de cortocircuito.

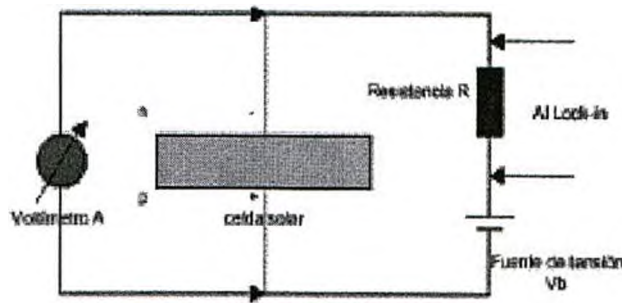


Figura 3.18. Circuito eléctrico para poner a la celda solar en condiciones de cortocircuito.

El procedimiento para la medición de la respuesta espectral consiste en los siguientes pasos:

- Se hace incidir la luz pulsada y la luz continua sobre la celda colocada en el portamuestras y se registra con el voltímetro la tensión de polarización (típicamente mide $V_{ca} \equiv 560 \text{ mV}$).
- Se enciende la fuente de tensión V_b y se aumenta su valor hasta que el voltímetro indique 0 mV . Entonces la celda se encontrará en cortocircuito y con el amplificador se toman los valores de tensión que luego serán usados para el cálculo de la respuesta espectral.

Hay que tener en cuenta que el valor óptimo de la resistencia, R , es aquél que permite obtener valores de tensión en el amplificador lo suficientemente grandes para ser detectados y medidos y que no se encuentren dentro del nivel de ruido (valor promedio $0,05 \mu\text{V}$). Para el caso de las celdas de $(2 \times 4) \text{ cm}^2$, resultó $R = 27\Omega$ y $V_b = 5\text{V}$.

3.2.3.2 Análisis de los resultados

Se presentan a continuación mediciones de respuesta espectral y se expone un método para estimar la longitud de difusión de los portadores minoritarios en la base, a partir de dichas mediciones y de la simulación de dispositivos.

Se midió la respuesta espectral (RE) de celdas solares de silicio cristalino elaboradas en nuestro laboratorio. Se empleó la celda 270-47 como **patrón calibrado** utilizando su

respuesta espectral medida contra un patrón secundario en el LAMEL [36].

Dado que las celdas de c-Si tienen respuesta entre los 300 nm y 1200 nm, aproximadamente, se emplearon filtros ópticos desde 400 a 1100 nm.

Las celdas solares de c-Si medidas fueron: 270-01, 270-19, 271-8, 271-20 y 271-15 con áreas de (2x4) cm² y la celda 271-29 de (4x4) cm². Las celdas 271-8, 271-20 y 271-15 fueron previamente irradiadas con protones de 10 MeV y fluencias 10⁸, 10⁹ y 10¹⁰ p/cm², respectivamente (Tabla 3.2). Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 3.19.

Tabla 3.2. Características de las celdas solares medidas.

Celda	Área (cm ²)	τ_{ef} (μs)	Irradiada p ⁺ de 10 MeV
270-01	(2x4)	7	no
271-15	(2x4)	6	$\phi = 10^{10}$ p/cm ²
270-19	(2x4)	7	no
271-29	(4x4)	6	no
271-8	(2x4)	7	$\phi = 10^8$ p/cm ²
271-20	(2x4)	6	$\phi = 10^9$ p/cm ²

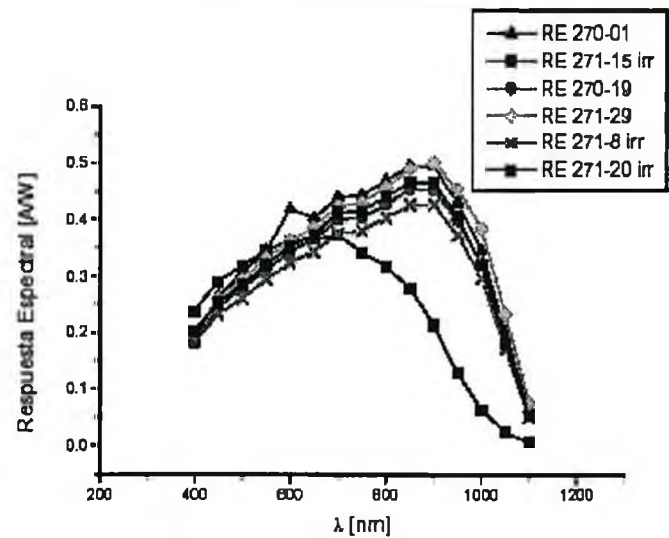


Figura 3.19. Curvas de respuesta espectral de las celdas medidas.

3.2.3.3 Determinación de la longitud de difusión L_D a partir de los datos de respuesta espectral

La eficiencia cuántica externa (EQE) y la eficiencia cuántica interna (IQE) son respectivamente:

$$EQE = \frac{RE(\lambda)hc}{q\lambda}, \quad IQE = \frac{EQE}{1-R} \quad (3.48)$$

donde RE es la respuesta espectral, λ es la longitud de onda, h es la constante de Planck, c es la velocidad de la luz, q es la carga del electrón y R la reflectividad de la muestra.

Para obtener la longitud de difusión de portadores minoritarios, se tuvo en cuenta que bajo las aproximaciones mencionadas en Hwang et. al. [37, 38]:

$$\frac{1}{IQE} = \frac{1}{L_D} \left(\frac{1}{\alpha(\lambda)} \right) + 1 \quad (3.49)$$

Entonces, del gráfico de $1/IQE$ en función de $1/\alpha(\lambda)$, se obtiene una recta donde la inversa de la pendiente ($1/L_D$) es la longitud de difusión de los portadores minoritarios. Esto es válido siempre y cuando la reflectividad R pueda considerarse constante en el intervalo de longitudes de onda considerado. Se puede ver de la que esta hipótesis es aproximadamente válida para longitudes de onda entre 500-850 nm.

Se realizaron simulaciones de dispositivos usando el programa *PCID-5* [35] y parámetros correspondientes a celdas solares similares a las fabricadas en el GES. En particular, se determinó la curva de respuesta espectral para distintos valores de la longitud de difusión, para luego compararlas con las curvas experimentales.

Se simularon dispositivos con las siguientes características::

- Área del dispositivo = 8 cm^2 , espesor de la celda = $300 \text{ }\mu\text{m}$.
- Resistencia serie de la celda = $0,03 \text{ }\Omega$, material: Si.
- Concentración de dopantes en la base = $1,5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ (tipo p).
- Velocidades de recombinación frontal y posterior: $S_f = 100 \text{ cm/s}$, $S_p = 10^5 \text{ cm/s}$.
- Tipo de iluminación = luz monocromática entre 300 y 1200 nm.

Con el fin de verificar el método de determinación de L_D mediante la ecuación (3.34), se simularon celdas solares con los siguientes valores de $L_D = 60, 100, 200, 300$ y $500 \mu\text{m}$, para los cuales se obtuvieron las curvas de las eficiencias cuánticas internas y externas. Graficando $1/IQE$ vs $1/\alpha$ y realizando un ajuste lineal se obtienen los valores de L_D (ajuste).

A partir de este conjunto de valores de L_D , se determinó que el intervalo de longitudes de onda para el cual el valor de L_D (ajuste) estimado por el ajuste lineal presentaba mejor correlación con el ingresado en la simulación, era entre 600 y 820 nm. Los resultados de las simulaciones se muestran en la Tabla 3.3 y se presenta en la Figura 3.20, el ajuste lineal correspondientes al caso de $L_D = 100 \mu\text{m}$. Se concluye que el método ofrece una buena alternativa para la evaluación del valor de la longitud de difusión de un dispositivo.

Tabla 3.3. Resultados obtenidos por simulación.

$L_D [\mu\text{m}]$ (parámetro de entrada)	$L_D [\mu\text{m}]$ (parámetro de ajuste)	Intervalo de longitudes de onda [nm]	Error relativo (%)
60	61,5	600-820	2,5
100	105,3	600-820	5,3
200	215	600-820	7,5
300	298	640-820	0,7
500	486	600-760	2,8

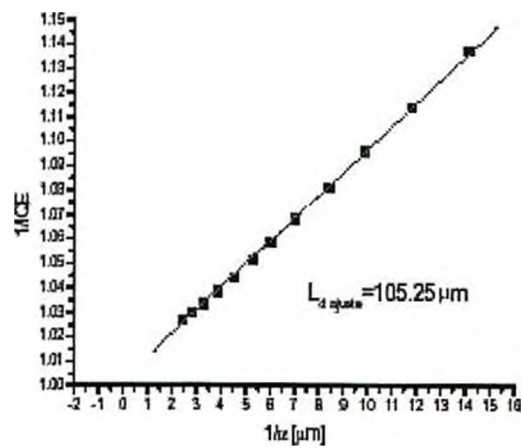


Figura 3.20. Ajuste lineal y valor hallado para el caso para $L_D = 100 \mu m$ [39].

Se realizó un segundo conjunto de simulaciones, tomando en este caso como parámetro variable, la velocidad de recombinación superficial. Los resultados obtenidos se muestran en Figura 3.21.

En la Figura 3.23 se graficaron los valores experimentalmente para las curvas de respuesta espectral de las celdas 270-19, 271-15 y 271-08. Las últimas dos celdas corresponden a muestras irradiadas con protones de 10 MeV. y fluencias de 10^{13} p/cm^2 y 10^8 p/cm^2 , respectivamente. Para la celda 270-19, según los resultados obtenidos de las anteriores simulaciones le corresponde una longitud de difusión de aproximadamente de $200 \mu m$.

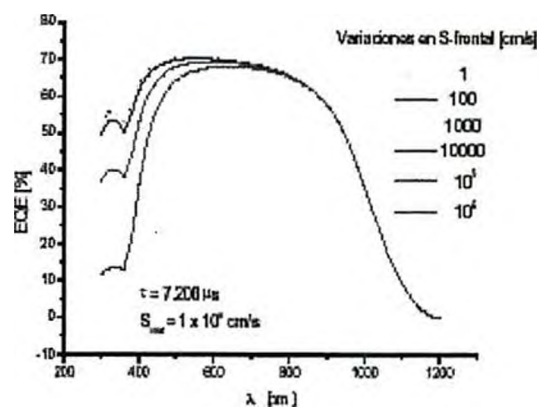


Figura 3.21. Curvas de eficiencia cuántica obtenidas al variar la S_f de la celda solar.

En el último conjunto de simulaciones se varió la velocidad de recombinación posterior. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 3.22.

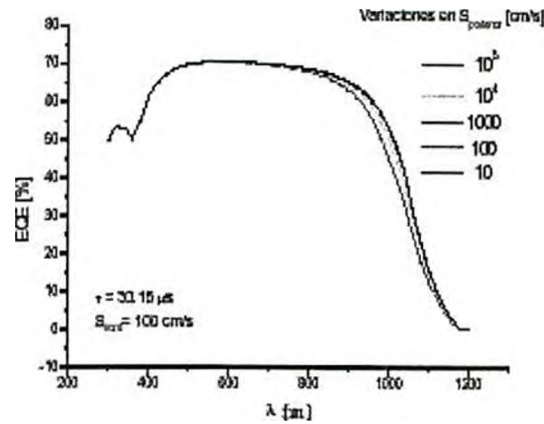


Figura 3.22. Curvas de eficiencia cuántica obtenidas variando la velocidad de recombinación superficial posterior, S_p , del dispositivo.

De la misma manera, también puede observarse que las celdas solares irradiadas 271-15 y 271- 8, corresponden a celdas con bajo valor de longitud de difusión. La degradación de la celda solar 271-15 es mayor que la de la celda 271- 8, ya que a mayor fluencia de irradiación mayor es la disminución del valor de la longitud de difusión de los portadores minoritarios (Tabla 3.4) [40].

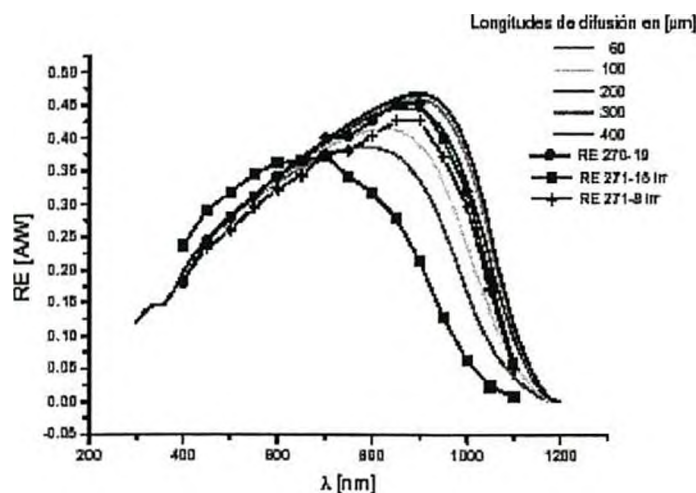


Figura 3.23. Curvas de respuesta espectral medidas y simuladas para diferentes valores de longitud de difusión de los portadores minoritarios.

Tabla 3.4. Resultados de las celdas medidas y simuladas para diferentes valores de longitud de difusión de los portadores minoritarios.

Celda	L_D [μm] (obtenido por medición de τ_{ef} (μs))	L_D [μm] (obtenido por simulación)
270-19	164	180
271-15	65	60
271-8	163	180

Se realizaron también simulaciones con el programa *PC1D-5* [35] utilizando como parámetro de entrada la vida media efectiva de los portadores minoritarios (τ_{ef}), medida con la técnica OCVD modificada. En la Figura 3.24 se muestran las curvas de respuesta espectral medidas en celdas solares, antes y después de su irradiación con protones y electrones, y se las compara con las curvas teóricas correspondientes a un τ_{ef} de 8 μs y de 0,08 μs . Se observa nuevamente un buen acuerdo entre la RE medida y la simulada.

Se puede ver la similitud en las respuestas espectrales de la celda irradiada con electrones de 2,6 MeV con una fluencia de 10^{15} e/cm² y otra irradiada con electrones de 10 MeV con una fluencia de 10^{12} p/cm².

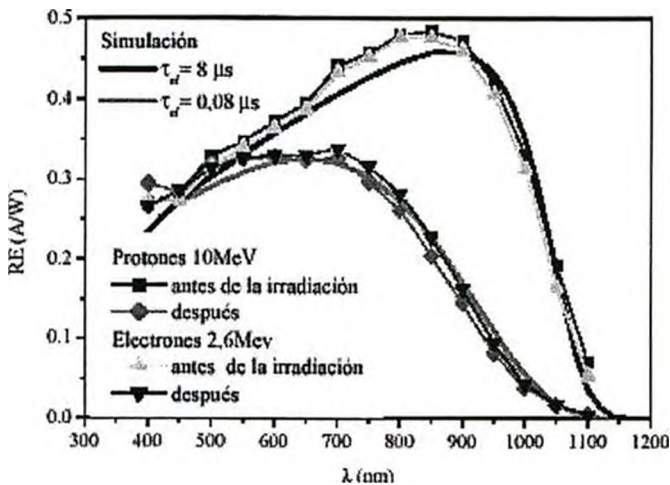


Figura 3.24. Comparación de la respuesta espectral de dos celdas antes y después de las irradiaciones con protones y electrones para dosis equivalentes.

En los casos de celdas irradiadas se observa una disminución en la respuesta espectral para las longitudes de onda más altas (a partir de los 800 nm), hecho consistente con una fuerte disminución de la vida media de los portadores minoritarios en la base producida por la irradiación. El τ_{base} correspondiente a las celdas irradiadas fue 0,08 μseg que equivale a una longitud de difusión $L_D = 16 \mu\text{m}$; así, para longitudes de onda mayores a 550 nm la profundidad de penetración de la luz ($\cong 21 \mu\text{m}$) es mayor que la L_D calculada y por lo tanto estas longitudes de onda contribuyen en menor medida a la I_{CC} .

Referencias Capítulo 3

- 1 Norma ASTM N° E 1021-84. *Standard methods for measuring the spectral response of photovoltaic cell*, (1984).
- 2 Norma ASTM N° E 297-84. *Solar simulation for photovoltaic application testing*, (1984).
- 3 Norma Argentina IRAM 210013-14. *Método normalizado para la medición de la respuesta espectral de celdas fotovoltaicas* (1997).
- 4 Norma Argentina IRAM 210013-2. *Módulos fotovoltaicos. Características eléctricas en condiciones normalizadas* (1998).
- 5 ISO/DIS 15387. *Space systems--Single-junction space solar cells—Measurement and calibration procedures*, (2000).
- 6 R.O. Bell. *Electrical characterization of photovoltaic material and devices*, Chapter 6, Silicon Processing for Photovoltaic I, ed. C.P. Khattak and K.V. Ravi, © Elsevier Science Publishers B.V. (1985).
- 7 S.M. Sze. *Semiconductor devices. Physics and technology*, John Wiley and Sons (1985).
- 8 M.A. Green. *Solar cells: operating principles, technology and system applications*, ed. University of New South Wales, Australia (1992).
- 9 M. Wolf and H. Rauschenbach. *Series resistance Effects on Solar Cell Measurements*, Advance Energy Conversion, Vol. 3, pág. 455-476 (1963).
- 10 M. Green. *Advanced principles, technology and systems application*, U.N. South Wales, Trentice-Hall (1982).
- 11 American Society for Testing and Materials. *Lifetime factors in Silicon*, ASTM Special Technical Publication 712, San Diego, California, (1979).
- 12 S.C. Choo y A.C. Sanderson. , Solid-State Electronics 13, 609 (1969).
- 13 J.W. Orton y P. Dlood. *The Electrical Characterization of Semiconductors: Measurements of Minority Carrier Properties*, Academic Press, New York (1990).
- 14 A.R. Moore. *Carrier Lifetime in Photovoltaic Solar Concentrator Cells by the Small-*

- Signal Open-Circuit Decay Method*, RCA Review **40**, 549 (1980).
- 15 R.F. Pierret y G.W. Neudeck. *The P-N Junction Diode*, Addison & Wesley, (1994).
 - 16 S.R. Lederhandler y L.J. Giacoletto. *Measurement of Minority Lifetime and Surface Effects in Junction Devices*, Proc. IRE **43**, 477 (1955).
 - 17 B.R. Gossick. J. Appl. Phys. **26**, 1356 (1955).
 - 18 H.T. Weaver y R.D. Nasby. Solid-State Electronics **22**, 687 (1979).
 - 19 B.H. Rose y H.T. Weaver, J. Appl. Phys. **54**, 238 (1983).
 - 20 J.E. Mahan and D.L. Barnes. *Depletion layer effects in the open-circuit-voltage-deacy lifetime measurement*, Solid-State Electronics Vol. **24**, N° 10, pp. 989-994, (1981).
 - 21 S.R. Dhariwal, IRE Proc. 127, Pt I, Nro. 1, **20**, (1980).
 - 22 W. Shockley and W.T. Read. Phys.Rev. **87**, 835 (1952).
 - 23 D. Macdonald and A. Cuevas. Prog. Photovoltaics **8**, 363 (2000).
 - 24 R. Gopal, R. Dwivedi and S.K. Srivastava. *Theoretical investigationsof experimentally-observed open-circuit voltage-decay (OCVD) curves*, Solid-State Electronics, Vol. 26 Nro. 11, pp. 1101-1109 (1983).
 - 25 M.J.L. Tamasi, M.G. Martínez Bogado, M.A. Alurralde, J.C. Plá (2002). *Estudio teórico-experimental de daño por radiación con protones de 10 Mev en celdas solares de silicio cristalino*. Enviado a Energías Renovables y Medio Ambiente.
 - 26 M. Alurralde, M.J.L. Tamasi, C.J Bruno., M.G. Martínez Bogado, J.C. Plá, J. Fernández Vázquez. *Estudio de daño por radiación con protones de 10 MeV en celdas solares de silicio cristalino utilizando el acelerador TANDAR*, Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente **5**, 8.43. (2001).
 - 27 A. Cuevas, M.Kerr, D. Macdonald, and R.A. Sinton. *Emitter quantum efficiecy from contactless photoconductance measurements*, PVSC (2002).
 - 28 D. Macdonald, R.A. Sinton, and A. Cuevas. *On the use of bias-light correction for trapping effects in photoconductance-based lifetime measurements of silicon*, Journal of Applied Physics, Vol **89**, N° 5, pp. 2772-2778 (2001).

- 29 A. Cuevas, D. Macdonald. *Measuring and interpreting the lifetime silicon wafers*, Solar Energy 76 255-262 (2004).
- 30 R. Lago-Aurrekoetxea, I. Tobías, C. Del Cañizo, A. Luque. *Lifetime measurements by photoconductance techniques in wafers immersed in passivating liquid*, J. of Electrochemical Society, 148 (4), pp G200-G206 (2001).
- 31 Manual del equipo PCD (1998).
- 32 ISO/TC 20/SC 14N213. ISO/CD 23038. *Space systems-space solar cells-electron and proton irradiated test methods*. ISO/TC 20/SC 14/WG1.
- 33 J.C. Bourgoin, N. de Angelis. *Solar cells degradation by electron irradiation Comparison between Si, GaAs and GaInP cells*. Solar Energy Materials and Solar Cells 66, pág. 495 (2001).
- 34 M.J.L. Tamasi. *Celdas solares para uso espacial: Optimización de procesos y caracterización*, Tesis Doctoral, Universidad Nacional de General San Martín, Comisión Nacional de Energía Atómica, Instituto de Tecnología "Prof. Jorge A. Sábato", (2003).
- 35 P. Basore and D.A. Clugstone. *PC-1D Version 5: 32-Bit solar cell modelling on personal computers*, Proceedings of the 26th. IEEE PVSC, pág. 207 (1997).
- 36 CNR-Laboratorio LAMEL. *Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto di Chimica e Tecnologia dei Materiali e dei Componenti per l'Elettronica*, Bologna, Italia.
- 37 I.G. Hwang, D.K. Schroder and J.H. Wohlgemuth. *The effect of wafer stress on absorption coefficient and minority carrier diffusion length in cast Poly-Si*, Proceedings of the 23th. IEEE PVSC, pág. 178 (1993).
- 38 P.K. Basu, S.N. Singh, N.K. Arora and B.C. Chakravarty. *A new method of determination of minority carrier diffusion length in the base region of silicon solar cells*, IEEE Transactions on Electron Devices 41, pág. 367 (1994).
- 39 M.A. Green. *Solar cells: Advances principles & practice*, ed. University of New South Wales, Australia (1995).
- 40 C. Bolzi, C.J. Bruno, J.C. Durán, E.M. Godfrin, M.G. Martínez Bogado, L.M. Merino, J.C. Plá, M.J.L. Tamasi y M.P. Barrera. *First experiment of Argentine solar cells in space: module, fabrication, characterisation and telemetry data analysis from SAC-A satellite*.

Solar Energy Materials & Solar Cells **73**, pág. 269 (2002).

Capítulo 4

TÉCNICAS DE FABRICACIÓN DE DISPOSITIVOS FOTOVOLTAICOS

En este Capítulo se describen las diversas etapas del proceso de fabricación de sensores y celdas solares basados en homojunturas de silicio cristalino, las cuales requieren de técnicas comúnmente usadas en microelectrónica.

Si bien no se fabricaron celdas multijunturas durante el desarrollo de la Tesis, por completitud, se presentan en forma resumida las etapas de elaboración de este tipo de celdas.

Se realizaron estudios de “*gettering*” de impurezas para la evaluación y selección de los procesos de elaboración más apropiados. En particular, se analizaron la captura de impurezas durante la difusión de Al y P en obleas de Si cristalino.

Como parte del trabajo de Tesis Doctoral, se elaboraron mediante las técnicas presentadas celdas solares para la fabricación del primer panel solar de uso terrestre. El módulo fue integrado al sistema de seguimiento de una cocina solar desarrollada en el Instituto de Energías no Convencionales (INENCO) de la Universidad Nacional de Salta.

4.1 ELABORACIÓN DE CELDAS SOLARES Y SENSORES BASADOS EN c-Si

El proceso de elaboración de celdas solares a partir de obleas de silicio cristalino tipo *p* utilizado consta esencialmente de las siguientes etapas:

- **Pulido químico y limpieza de las obleas:** elimina daños producidos por el corte de obleas y restos de solventes y suciedad provenientes del manipuleo.
- **Evaporación de Al en la cara posterior:** para la formación del emisor p^+ en el siguiente

paso.

- **Difusión de P y Al:** formación simultánea de los emisores frontal n^+ y posterior p^+ en un solo paso.
- **Fotolitografía:** para transferir el patrón de la máscara de la grilla de contacto a la cara frontal de la celda.
- **Deposito de contactos metálicos:** evaporación de multicapa en cámara de vacío.
- **Lift-off:** eliminación del metal excedente.
- **Engrosamiento de contactos.**

Eventualmente, puede intercalarse también un proceso de oxidación y posterior remoción parcial del SiO_2 , previo a la difusión de dopantes. Se describen a continuación los procesos relevantes relacionados con la presente Tesis. Las demás etapas pueden verse en detalle en [1].

4.1.1 Oxidación

El crecimiento del óxido sobre una oblea de Si se puede realizar por distintas técnicas, cada una de las cuales dan óxidos con distintas características. Éstas pueden ser:

- ***Oxidación térmica***
- ***Oxidación electroquímica***
- ***Oxidación con plasma***

La alternativa más conveniente es el crecimiento térmico del óxido, el cual se utiliza como máscara para la difusión [2], como pasivante para disminuir la recombinación en superficie [3], como capa antirreflectante o como aislante para interconexiones. Aunque la exposición del Si al aire forma un *óxido nativo*, éste tiene un espesor de aproximadamente 15 a 20 Å y no alcanza para protección de zonas del Si que no se quieren dopar [4]. En este trabajo se utilizaron las técnicas de oxidación térmica.

La *oxidación térmica* se lleva a cabo en un horno a altas temperaturas, típicamente entre 800 y 1200°C, y puede realizarse de dos formas distintas [4]:

- mediante vapor de $H_2 O$ (oxidación húmeda)
- mediante O_2 seco (oxidación seca)

En el presente trabajo de Tesis se realizaron procesos de *oxidación húmeda* que consiste en hacer burbujear un gas inerte, como N_2 , a través de un recipiente (burbujeador) con H_2O a $95^\circ C$ que corresponde a una presión de vapor de 640 torr. Las moléculas de agua son transportadas por el gas de arrastre hasta el horno. La oxidación del Si por vapor de agua se puede considerar como un proceso en el cual las especies oxidantes difunden a través del óxido y reaccionan con la superficie del Si en la forma [4]:



4.1.2 Difusión de dopantes

La formación de la juntura es una de las etapas críticas del proceso de elaboración de celdas. La misma puede realizarse por difusión de dopantes o por implantación iónica [5]. La difusión es la técnica más utilizada tanto industrialmente como a nivel de laboratorio. En la misma se definen distintos parámetros que caracterizarán el dispositivo final, en particular, como se verá en la sección 4.3, la vida media y la longitud de difusión de portadores minoritarios en la base del dispositivo.

Se puede emplear fuente sólida, líquida o gaseosa con las siguientes características:

- **Fuente sólida** [6]: consiste en obleas del sólido dopante que se intercalan equiespaciadas entre las obleas de Si en la nave de cuarzo que luego se introduce en el horno de difusión. En general, el proceso se realiza en ambiente de N_2 u O_2 . Es frecuente emplear óxidos dopantes como por ejemplo, B_2O_3 , (dopante tipo p^+), cuya reacción sobre la superficie de Si es:



La principal ventaja de este tipo de fuente es que no requiere de cuidados rigurosos en su manipuleo. Otra fuente sólida empleada en la elaboración de junturas en Si , es la difusión de Al (dopante tipo p^+) a partir de una capa evaporada [7].

- **Fuente líquida** [8]: consiste en un gas (usualmente N_2) que burbujea a través del líquido dopante, el cual es transportado en forma de vapor a la superficie de la muestra. Los sistemas de fuente líquida son muy convenientes pues el proceso de difusión puede ser iniciado o finalizado por el control del gas que fluye a través del líquido. La más empleada para la difusión en Si es el **oxicloruro de fósforo**, $POCl_3$. La reacción que produce sobre la superficie del Si es:



y el fósforo proveniente de ésta reacción es el que servirá de dopante tipo n .

Otra fuente líquida empleada para la difusión en Si es el **tribromuro de boro**, BBr_3 y dado que el producto de la reacción es el bromo, es imprescindible el uso de un buen sistema de extracción de gases. La reacción que se produce es la siguiente [9]



introduciendo un dopante tipo p .

- **Fuente gaseosa** [7]: consiste en un gas dopante que se encuentra dentro de una trampa química y es llevado hacia la superficie de la muestra por un gas de arrastre. Se emplea con un gas oxidante de arrastre, resultando un dopaje de tipo n , y la reacción resultante es:



Presenta una gran desventaja, en general, los gases empleados son de alta toxicidad.

Se realizaron experiencias de oxidación húmeda para verificar los espesores efectivamente logrados con diferentes temperaturas y tiempos de oxidación y también para evaluar la influencia de este proceso sobre las características electrónicas del material (ver sección 4.3)

El proceso de oxidación seca se puede realizar en un ambiente oxidante dado por un flujo de oxígeno, o bien burbujeando nitrógeno en 1,1,1 tricloroetano (TCA) utilizando oxígeno como oxidante y gas de arrastre. En este último caso, el TCA se descompone

produciendo HCl, el cual se combina con impurezas metálicas previniendo la posible contaminación de las obleas.

Un proceso típico de oxidación seca con TCA se lleva a cabo a 1200°C durante 2 horas, obteniéndose un espesor de alrededor de 0,35 μm , el cual es suficiente para actuar como barrera para la difusión de fósforo.

En los casos en que el SiO_2 es utilizado como barrera para la difusión, el área activa del dispositivo se define por medio de la apertura de una ventana en el óxido ya crecido mediante técnicas fotolitográficas [4, 10, 11]. La remoción del óxido en la región definida por la ventana posibilita la difusión del dopante en la misma.

4.1.3 Difusión de un paso

Los procesos simples de fabricación de celdas solares tienden a minimizar el número de pasos en horno a alta temperatura.

Entre ellos se destaca el proceso **difusión en un paso** el cual consiste la codifusión de P y Al en un único paso, dando lugar a la formación de una estructura $n^+ - p - p^+$.

En el caso de los procesos de difusión son importantes las rampas de calentamiento a la temperatura de proceso y de enfriamiento. En las experiencias presentadas en este capítulo se introducen las obleas en el horno en un ambiente de N_2 a una velocidad tal que la temperatura de las muestras aumenta a razón de 100°C/min, partiendo de temperatura ambiente llegando a 800°C, donde comienza el proceso propiamente dicho. Luego se llevan las muestras a la temperatura de trabajo (entre 850 y 900°C) a razón de 5°C/min mediante una rampa de calentamiento, de esta forma la temperatura se eleva lentamente para evitar la formación de dislocaciones en el material. Luego de finalizado el proceso de difusión se reduce la temperatura al valor inicial (800°C) mediante la rampa de enfriamiento, a razón de 5°C/min, nuevamente en un ambiente de N_2 . Finalmente, se extraen las muestras lentamente con la misma velocidad con que se las introdujo.

La difusión en un paso consta de las siguientes etapas:

- **Evaporación de Al** es el depósito de una capa de Al de 1 μm , en una de las caras de la oblea de Si previo a la difusión.
- Formación de la juntura que consta de cuatro etapas (Tabla 4.1), las cuales se realizan en

un horno con control automático programable.

- **Predeposición de P** en ambiente de O_2 (7 l/min) por burbujeo de N_2 a través de la fuente de $POCl_3$ con una concentración de dopante de 0,2 %. La duración de este paso varía entre 3 y 5 min. La temperatura del proceso típica es de 850°C.
- **Recocido** en ambiente de N_2 (7 l/min), durante un tiempo entre 3 y 5 min. (baño de nitrógeno) como paso posterior a la predeposición y a la misma temperatura. En esta etapa se produce la formación simultánea de los emisores frontal y posterior respectivamente, n^+p y $p-p^+$.
- **Recocido y oxidación** en ambiente de O_2 (7 l/min), durante 15 minutos; de este tiempo depende el espesor de óxido a obtener.
- **“Drive-in”** en ambiente de N_2 (7 l/min) durante 90 minutos. En este paso se realiza la redistribución de las impurezas sin crecimiento de óxido, dependiendo del tiempo y la temperatura será la profundidad final de juntura resultante [12].

Tabla 4.1. Parámetros típicos del proceso de difusión en un paso con recocido en N_2 .

	N_2 (l/min)	O_2 (l/min)	$POCl_3$ (%)	t (min.)	T (°C)
Predeposición de P	---	7	0,2	5	860
Baño en N_2	7	---	---	5	860
Recocido y oxidación	---	7	---	15	860
Drive-in	7	---	---	90	860

Se fabricaron celdas solares planas y texturadas con estructura n^+p-p^+ sobre obleas comerciales Czochralski tipo-p ($\approx 5 \Omega\text{cm}$), con un área activa de $3,6 \text{ cm}^2$ usando la técnica de difusión previamente mencionada. Los resultados típicos obtenidos se resumen en la Tabla 4.2, en donde se observa la resistencia de capa (R_c) de la región n^+ , determinada por el método de cuatro puntas [9], y los parámetros eléctricos característicos de las celdas elaboradas medidos con un simulador solar clase C desarrollado en el GES [13].

Tabla 4.2. Resultados experimentales obtenidos con la difusión de un paso.

Proceso	Concentración <i>POCl₃</i> (%)	R _c típica (Ohm/)	Espesor SiO ₂ (nm)	V _{ca} (mV)	J _{cc} (mA/cm ²)
Un paso (<i>drive-in N₂</i>)	0,20	90-120	25	570	35,5

4.1.4 Formación de los contactos eléctricos

La formación del contacto eléctrico frontal se realiza mediante las siguientes técnicas:

- **Fotolitografía** para transferir el patrón de la máscara de la grilla de contacto a la cara frontal de la celda.
- **Depósito de contactos metálicos** mediante evaporación de multicapa en cámara de vacío.
- **“Lift-off”** para la eliminación del metal excedente.
- **Engrosamiento de contactos** para obtener una grilla colectora de corriente de mayor espesor.
- **Recocido de los contactos metálicos** para mejorar el contacto óhmico en la interfaz metal-SC.

El proceso de fotolitografía consiste en la transferencia del patrón deseado para las grillas frontal y eventualmente posterior mediante el uso de resinas sensibles a la radiación ultravioleta (UV). Los pasos a seguir son los siguientes (Figura 4.1):

- **Secado** de las muestras previo a la exposición a la luz ultravioleta. Se colocan las celdas en un horno a 100°C durante 1 hora; a este proceso se lo denomina “*soft-baking*”.
- **Depósito de la fotorresina** de la muestra. La capa se deposita sobre la muestra, que se encuentra sujeta por vacío en un centrifugador desarrollado en el GES. El uso del centrifugador permite obtener una capa bien adherida, uniforme y libre de partículas y orificios libres de resina; las velocidades de giro pueden variar entre 1000 y 5000 rpm.
- **Alineación de la máscara fotográfica.**

➤ **Exposición** de las muestras a la luz UV. Se coloca sobre un soporte de sujeción con vacío, la muestra, la máscara y un vidrio óptico delgado ($\approx 0,1$ mm) a 40cm de distancia de un iluminador desarrollado en el GES.

➤ **Revelado** de los patrones transferidos. Consiste en colocar a las obleas en un líquido revelador; este disuelve la fotorresina que ha sido expuesta a la luz.

➤ **Secado** a 100°C durante 30 min. aproximadamente, a este paso se lo denomina “*post-baking*”.

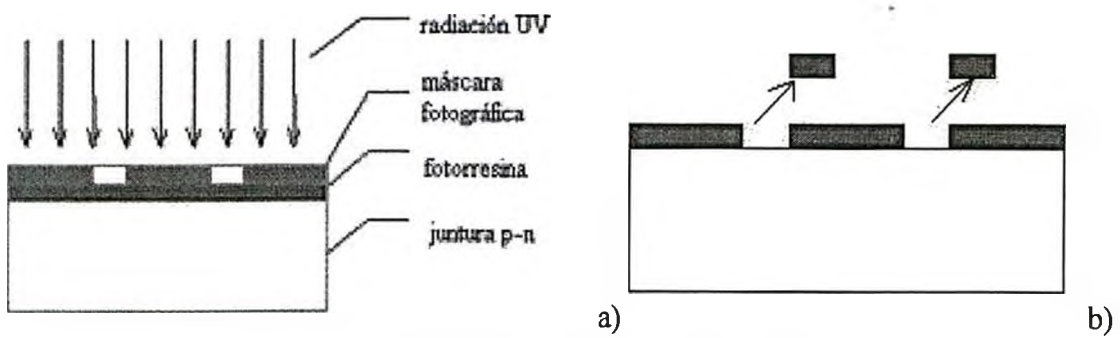


Figura 4.1. Esquema del proceso de fotolitografía: a) exposición y b) revelado.

Tanto el depósito de fotorresina como los tiempos de exposición, revelado y secado (“*post-baking*”) depende fuertemente del tipo de fotorresina empleada. Por otra parte, el iluminador ha sido adaptado para los requerimientos de las fotorresinas ensayadas en este trabajo, como así también el equipo usado para el depósito de las mismas.

Las máscaras utilizadas para la fotolitografía de las grillas de contacto para diferentes dispositivos elaborados (celdas, sensores) fueron realizadas para tal fin íntegramente en nuestro laboratorio (Figura 4.2), teniendo en cuenta los requerimientos y tamaño del dispositivo. Para ello se fotografía con película gráfica el patrón dibujado y se utilizan los negativos obtenidos para enmascarar o proteger la zona que no debe ser expuesta.

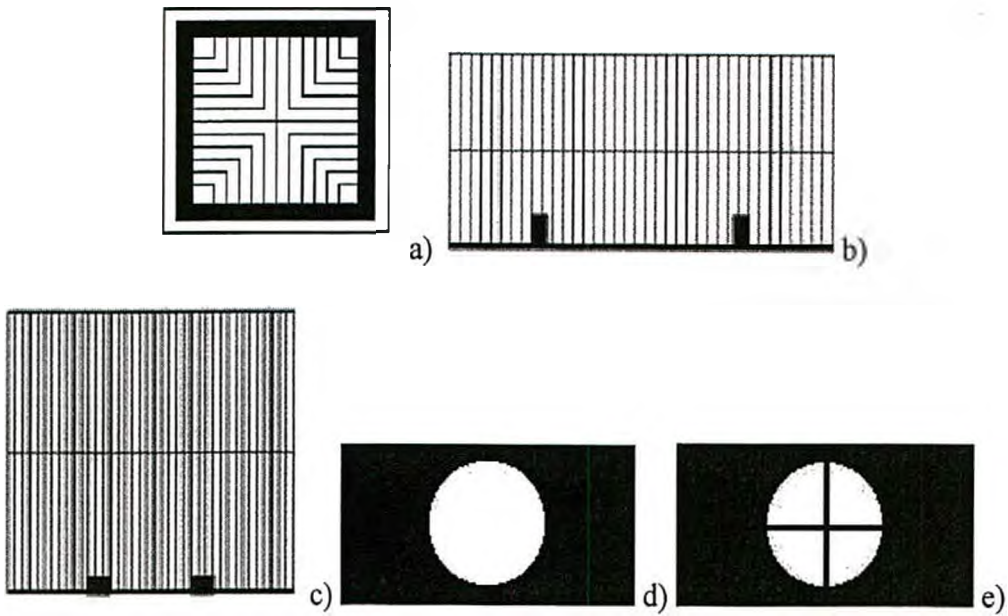


Figura 4.2. Grillas de contactos: a) $25 \times 25 \text{ mm}^2$, b) $20 \times 40 \text{ mm}^2$, c) $40 \times 40 \text{ mm}^2$, d) sensor fotovoltaico de $10 \times 5 \text{ mm}^2$ y e) sensor fotovoltaico optimizado de $10 \times 5 \text{ mm}^2$.

Los contactos metálicos frontal y posterior son depositados en la oblea por evaporación de una multicapa de **Ti-Pd-Ag**. Este proceso se lleva a cabo en cámara de vacío previa limpieza de los metales a utilizar. En la cara posterior el contacto cubre toda la superficie ya que la misma no se expone a la luz.

La técnica para depositar y formar la grilla frontal la celda solar se denominada “*lift-off*” [6], también utilizada en la industria electrónica. Para lograr un buen contacto eléctrico entre el metal y el emisor n^+ y p^+ se procede a eliminar el óxido formado durante la difusión con una solución de H_2O , HF y NH_4F cuya velocidad de ataque es de $1000 \text{ \AA}/\text{min}$. Inmediatamente después se evaporan los metales en la cámara de vacío por efecto Joule y con un vacío aproximado de $1 \times 10^{-6} \text{ Torr}$.

El paso final es la remoción de la resina con acetona la cual no daña los metales evaporados pero sí disuelve la fotorresina que protege el resto de la superficie junto con el metal en exceso, como se puede observar en la Figura 4.3

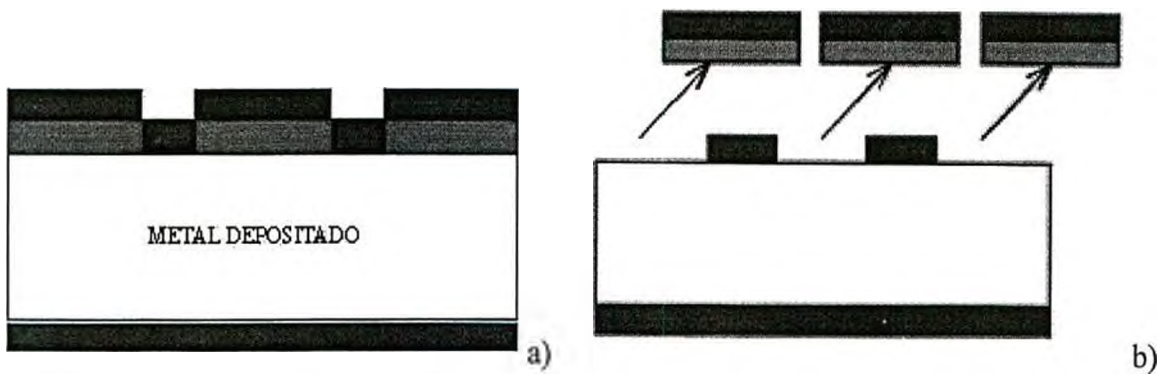


Figura 4.3. Esquema del depósito de metales: a) depósito de la tricapá metálica (Ti-Pd-Ag) y b) "lift-off".

Luego de realizar el "lift-off" los contactos metálicos son engrosados por electrólisis a fin de disminuir las pérdidas óhmicas y de hacerlos aptos para ser soldados. El espesor óptimo ronda los 6 a 8 μm .

La electrodeposición de plata sobre el contacto frontal y posterior se lleva a cabo de la siguiente manera. En una cuba de polipropileno, se disponen dos cátodos de plata 1000 de dimensiones 120 x 100 x 2 mm y dos sujetadores de acero inoxidable como ánodos.

La batea contiene una solución de cianuro doble de plata (CNAg y CNK) y la misma se coloca sobre un agitador magnético. Dentro de la solución se introduce un agitador, los dos cátodos y los dos ánodos (ver Figura 4.4). Se conecta la fuente de corriente a los electrodos y se realiza el engrosamiento. Los parámetros de corriente y tiempo de electrodeposición quedan determinados por las características técnicas del baño electrolítico [14] y de la geometría dispuesta en la cuba.

Las celdas con los contactos engrosados son sometidas a un proceso térmico a 400 °C en una de las bocas del horno de difusión en ambiente de una mezcla de 4% de H_2 y 96% de N_2 ("forming gas") con un caudal de 1 l/min durante 20 minutos. Este recocido tiene como finalidad mejorar el contacto óhmico entre los metales y el semiconductor y pasivar la superficie de las celdas.

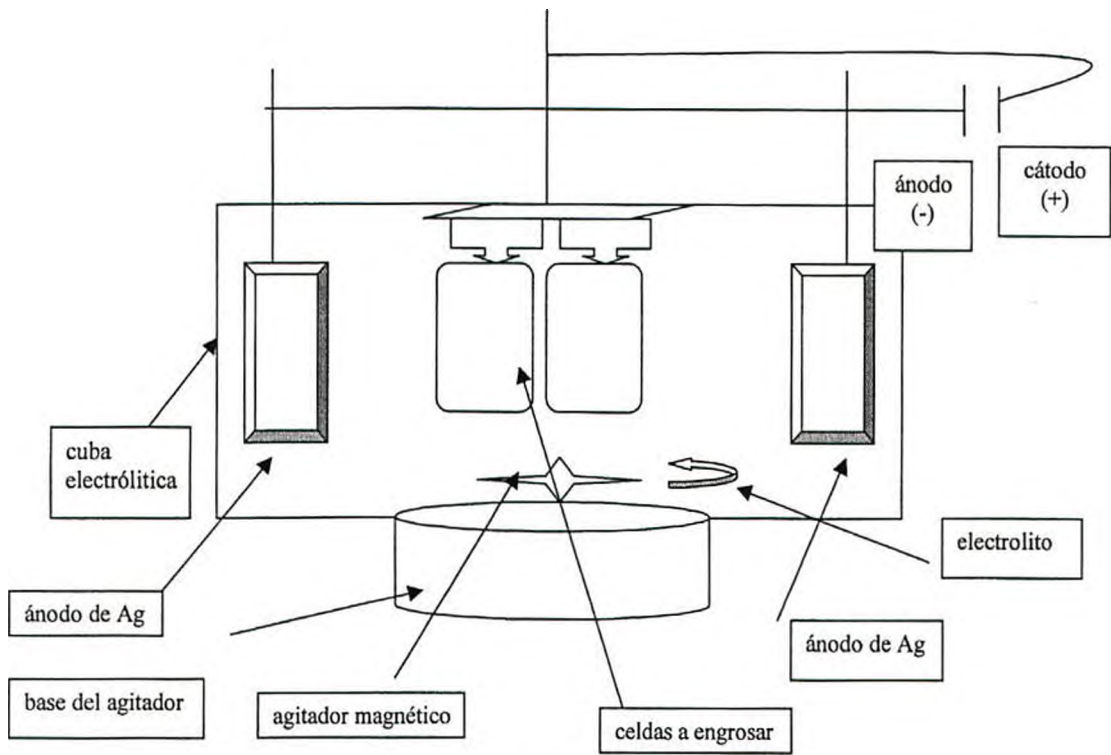


Figura 4.4. Esquema del dispositivo de electrodeposición.

4.2 ELABORACIÓN DE CELDAS MULTIJUNTURAS

La elaboración de celdas solares multijuntura con compuestos semiconductores de los grupos III-V se realiza mediante el crecimiento epitaxial de las distintas capas que conforman las subceldas.

Cabe destacar que sólo hay tres empresas en el mundo que se dedican a fabricar y comercializar celdas multijuntura basadas en los compuestos antes mencionados: Emcore Photovoltaics, Spectrolab Inc. y Tecstar [15].

Habitualmente se emplean dos técnicas de fabricación, el crecimiento epitaxial, en general sobre sustratos de *Ge* o *Si*, a partir de las distintas capas de metales orgánicos en fase vapor, *MOVPE*, (*Metal-Organic Vapor Phase Epitaxy*) y la deposición química a partir de metales orgánicos en fase vapor, *MOCVD*, (*Metal-Organic Chemical Vapor Deposition*).

El crecimiento epitaxial de *GaAs* se realiza en un sistema de tubo cerrado para mantener controlada la presión de vapor y las condiciones de equilibrio del método de fabricación. El *GaAs* proviene de la descomposición del galio y del arsénico por evaporación;

en el caso de arsénico, se hace burbujear N_2 de alta pureza en una fuente líquida $AsCl_3$, a la temperatura de su presión de vapor. El galio se encuentra disponible, en la forma de trimetilgalio $(CH_3)_3 Ga$ de alta pureza conocido con las siglas TMGa. Este compuesto organometálico de galio se presenta también como fuente líquida y es factible de ser transportado en fase vapor mediante el burbujeo de N_2 de alta pureza (99,9999%) en un burbujeador. Otra alternativa es usar el trietilgalio $(C_2H_5)_3Ga$, fuente líquida conocida como TEG.

Para el crecimiento de *GaAs* se emplean tanto reactores verticales como horizontales, con resistencias calefactoras, paredes calientes y al menos, con dos zonas de distintas temperaturas, una para la fuente y otra para el sustrato. La reacción de formación en estos sistemas es exotérmica y la deposición sobre el sustrato ocurre en la zona fría y por consideraciones estequiométricas, lo habitual es trabajar a temperaturas entre 650 y 850°C para lograr un buen crecimiento del *GaAs*.

A presión atmosférica el reactor *MOVPE* usa como fuentes TMGa, TMAI y AsH_3 , con SiH_4 y DMZn como dopantes tipo *n* y *p*, respectivamente y el crecimiento del *GaAs* se lleva a cabo a 700°C, aproximadamente. El dopaje de las películas de *GaAs* se realiza introduciendo las impurezas en fase vapor durante el crecimiento epitaxial. Para obtener *GaAs* tipo *n* se lo dopa con elementos del grupo III, como el *Si* o el *Ge*, y para el *GaAs* tipo *p*, se utilizan elementos del grupo V, entre ellos *Zn* y *Al*.

La elaboración de las celdas a partir de la estructura MJ consta de etapas similares a la fabricación de celdas *c-Si*. Básicamente, incluye los siguientes pasos: limpieza de los sustratos por ataque químico de la superficie, mediante una solución $NH_4OH-H_2O_2-H_2O$; evaporación del contacto posterior (*AuAg*) [16]; recocido del contacto posterior; fotolitografía para transferir el patrón de la grilla a la cara frontal; evaporación del contacto frontal (*CrAuAg*) y posterior “*lift-off*”; recocido del contacto frontal y electrodeposición de una capa delgada de *Au* para proteger la *Ag*; evaporación de doble capa antirreflectante *DAR*: $ZnS + MgF_2$ y, finalmente, corte de la celda.

4.3 PROCESO DE COMPENSACIÓN Y CAPTURA DE IMPUREZAS

En la fabricación de dispositivos electrónicos se introducen deliberadamente determinadas impurezas en el cristal del semiconductor para controlar su comportamiento eléctrico. También se introducen otras impurezas indeseables que degradan de un modo u otro el comportamiento del dispositivo. Estas últimas se llaman impurezas contaminantes, que en el caso del silicio son principalmente metales de transición que introducen niveles profundos en la banda prohibida del semiconductor.

La presencia de impurezas con niveles electrónicos profundos dentro del “*gap*” reducen significativamente el tiempo de vida de portadores minoritarios, degradando el comportamiento de dispositivos tales como transistores bipolares y celdas solares. Estos centros de impurezas reducen la longitud de difusión de los portadores minoritarios debido al aumento de los centros de recombinación o por la disminución de la movilidad de los portadores mencionados [17]. Más aún, las impurezas crean niveles de energía en la interfaz metal-semiconductor incrementando el valor de la resistencia serie.

Para obtener celdas solares de alta eficiencia se necesitan tiempos elevados de vida media de los portadores minoritarios en la región de la base (τ_{base}), de tal forma que se maximice la colección de portadores fotogenerados en el volumen y también la tensión a circuito abierto (V_{ca}) y la corriente de cortocircuito (I_{cc}). Por tal motivo, el sustrato debe contener la menor cantidad de defectos o impurezas que disminuyan el valor de τ_{base} .

Cada tipo de impureza deteriora la eficiencia de diferente forma, considerando sus características de captura de portadores minoritarios. En la bibliografía se presenta la influencia de diversos tipos de impurezas sobre la eficiencia de la celda solar en función de la concentración de las mismas en el sustrato [18]. Según los autores, la eficiencia de una celda solar puede reducirse en aproximadamente 20% con concentraciones de Cr o Fe del orden de $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$.

La contaminación del sustrato se puede producir tanto durante el crecimiento de los lingotes de Si (ya sea tipo Czochralski (CZ) o Zona flotante (FZ)) cuanto en los procesos a alta temperatura durante la elaboración de las celdas, producto de la difusión hacia el interior de dopantes depositados en la superficie en los procesos de corte, limpieza y manipulación de

las obleas.

La técnica que se denomina compensación o “*gettering*” es aquella que permite coleccionar impurezas introducidas en el sustrato durante el proceso, de las regiones activas del dispositivo y colocarlas en regiones donde queden neutralizarlas o donde su efecto se encuentre enmascarado [19].

El mecanismo de compensación puede considerarse constituido por tres etapas:

- i) extracción/liberación de impurezas de posiciones sustitucionales de la red cristalina o de los precipitados en los que pudieran encontrarse,
- ii) difusión de las impurezas a través del sustrato,
- iii) captura y neutralización de las mismas.

Para que la compensación sea efectiva, la energía necesaria para liberar las impurezas de los nodos en la red cristalina debe ser pequeña comparada con la que debe tener cuando se encuentre en la zona de captura. El estudio de este tipo de mecanismos todavía está en etapa preliminar ya que queda mucho por entender del proceso físico-químico que en él ocurre. Las técnicas de compensación pueden clasificarse en dos tipos: las internas y las externas.

La compensación interna es aquella basada en los contaminantes preexistentes en el volumen del sustrato. Un ejemplo de la compensación interna es la disminución de la densidad de oxígeno en la superficie del silicio de tipo CZ mediante un ciclado térmico que precipita los átomos de oxígeno al interior del sustrato permitiendo utilizar las primeras decenas de μm del material. Este material es apropiado para las aplicaciones de microelectrónica, donde la mayoría de los dispositivos no dependen del volumen del sustrato. Sin embargo, para la fabricación de celdas solares, al ser dispositivos de volumen, se necesita que el tiempo de vida de los portadores minoritarios sea alto en todo el sustrato.

La compensación de tipo externo proviene de contaminantes aplicados al material; como por ejemplo, los provenientes de la evaporación de capas metálicas, difusiones dopantes, daños mecánicos y oxidación en ambiente de Cl, entre otros [20].

Las difusiones de impurezas aceptoras o donoras son los agentes de compensación más utilizados en la fabricación de celdas solares, teniendo la ventaja de formar simultáneamente

las regiones p^+ y n^+ del dispositivo. El aluminio y el fósforo son los dos materiales más empleados para mejorar las características eléctricas de la celda solar, reduciendo la contaminación introducida en las etapas de elaboración [19]. El Al , junto con el B entre otros, es uno de los materiales que produce este atrapamiento de impurezas, como además es para el Si un dopante tipo p , cumple una doble función: forma la juntura $p-p^+$ en la parte posterior y realiza este mecanismo de captura o “*gettering*” de impurezas.

Por otra parte, regiones altamente dopadas cerca del contacto posterior de una celda solar aumentan tanto la V_{ca} como la I_{cc} , esta última como consecuencia de un incremento en la eficiencia de colección de los portadores de carga. Dichas regiones altamente dopadas dan lugar al denominado campo superficial posterior denominado BSF (“*Back Surface Field*”), el cual actúa como un campo reflector para los portadores minoritarios disminuyendo la velocidad de recombinación superficial efectiva (S), reduciendo a la vez la resistencia de contacto metal-semiconductor en la parte posterior. Las estructuras con BSF son del tipo n^+-p-p^+ y se logran mediante la difusión de Al o B en dicha cara.

A fin de comparar los efectos del BSF y el “*gettering*” producido por el Al , se compararon estructuras n^+-p elaboradas por difusión exclusiva de P sobre toda la superficie de la oblea con estructuras n^+-p-p^+ obtenida por codifusión de P y Al .

La mejora proviene de la captura de los defectos y de las impurezas del volumen durante la formación de la región p^+ a partir del aluminio evaporado. Para ello, es necesario formar una solución en fase sólida de aluminio y silicio que se logra mediante el recocido del aluminio depositado por arriba de la temperatura del eutéctico ($575^\circ C$). Típicamente este recocido de aluminio se realiza alrededor de los $600^\circ C$ durante un tiempo que puede variar entre 10 a 30 minutos [21, 22].

Para que se produzca el proceso de “*gettering*”, las impurezas metálicas deben difundirse desde el volumen hacia la región posterior donde se forma la aleación. Para facilitar la difusión de las impurezas metálicas y favorecer la segregación, la temperatura debe llevarse a valores superiores a la temperatura de fusión del aluminio ($575^\circ C$), por ejemplo entre $700^\circ C$ y $800^\circ C$ [17].

A continuación se presenta un estudio sistemático del efecto del proceso de “*gettering*” de aluminio y de fósforo sobre las características eléctricas y electrónicas de celdas solares de silicio cristalino. Se utilizaron diversos materiales de partida y resistividades, y los recocidos

fueron realizados a temperaturas de alrededor de 850°C.

Está ampliamente comprobado que una capa de aluminio depositada en la parte posterior de una celda solar mejora el comportamiento de la misma debido a varios efectos que se superponen: efecto *BSF*, extracción de impurezas metálicas, y el efecto reflector de fotones de mayor longitud de onda. Mediante distintos procedimientos se procura aislar el efecto de extracción de impurezas del resto, y analizar así su comportamiento y eficiencia.

Existen abundantes evidencias experimentales de que la eficiencia de extracción por aluminio depende del material de silicio de partida. Para celdas de silicio FZ no hay efecto de extracción sino únicamente de *BSF*, mientras que para distintos tipos de silicio multicristalino sí [23].

El tiempo necesario para extraer un tipo determinado de impurezas se relaciona principalmente con su difusividad. La extracción por Al es especialmente apropiada para impurezas metálicas intersticiales, y no tanto para sustitucionales o precipitados, debido a los tiempos de proceso relativamente cortos para los cuales la extracción es eficaz [24].

4.3.1 Extracción de impurezas en obleas de silicio cristalino no oxidadas

Se elaboraron estructuras n^+-p-p^+ , mediante la codifusión de P y Al, y estructuras n^+-p sobre obleas de origen comercial. De cada oblea se cortaron muestras cuadradas de 2,5 cm de lado. A una parte de las mismas se le evaporó Al de 1 μm de espesor, para la codifusión con el P y así obtener estructuras n^+-p-p^+ . Al resto de las muestras se les realizó solamente la difusión de P, para obtener la estructura n^+-p luego de un decapado químico para remover la capa n^+ de una de las caras, después de la difusión.

Se utilizaron obleas CZ tipo p, de seis procedencias y resistividades distintas (numeradas de 1CZ a 6CZ). Se elaboraron tres celdas de cada oblea y de cada estructura (n^+-p-p^+ y n^+-p) anteriormente mencionada.

La Figura 4.5 muestra la vida media efectiva, obtenida mediante la técnica OCVD modificada, de las celdas elaboradas. Se observa claramente que la codifusión de P y Al produce dispositivos con mayor τ_{ef} , lo que probablemente indica un proceso de atrapamiento de impurezas más eficiente.

Con el fin de evaluar la influencia del espesor de Al sobre el atrapamiento de impurezas durante la codifusión, se elaboraron celdas a partir de obleas con 1 μm y 6 μm de Al. Los valores de τ_{ef} obtenidos se dan en la Figura 4.6. En este caso, no se observan diferencias significativas.

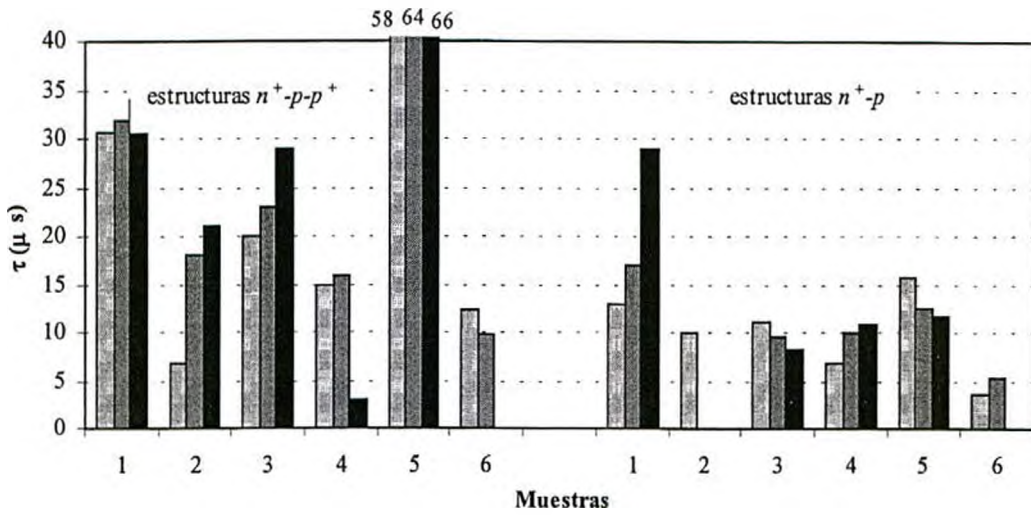


Figura 4.5. Vida media efectiva de celdas sobre sustratos de diferentes resistividades: 1 (6,8 Ωcm), 2 (1,1 Ωcm), 3 (20,8 Ωcm), 4 (0,7 Ωcm), 5 (7 Ωcm) y 6 (1 Ωcm) con dos estructuras (n^+-p-p^+ y n^+-p). Las diferentes tonalidades corresponden a distintas muestras de un mismo tipo.

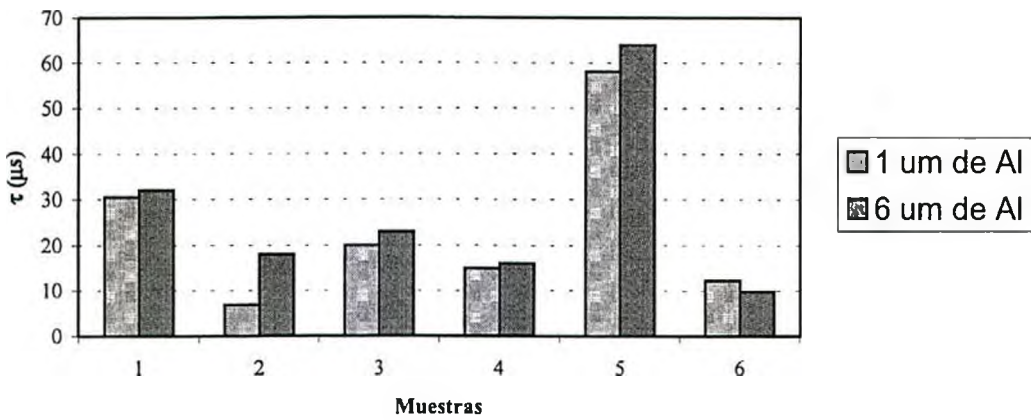


Figura 4.6. Tiempos de vida obtenido para espesores de aluminio evaporado.

La Figura 4.7 muestra los resultados obtenidos. El aumento del tiempo de vida efectivo luego del ataque y posterior oxidación permite concluir que el proceso de difusión genera una

zona de alta recombinación superficial en la cara posterior, la cual se reduce con la eliminación del Al y la pasivación de la superficie.

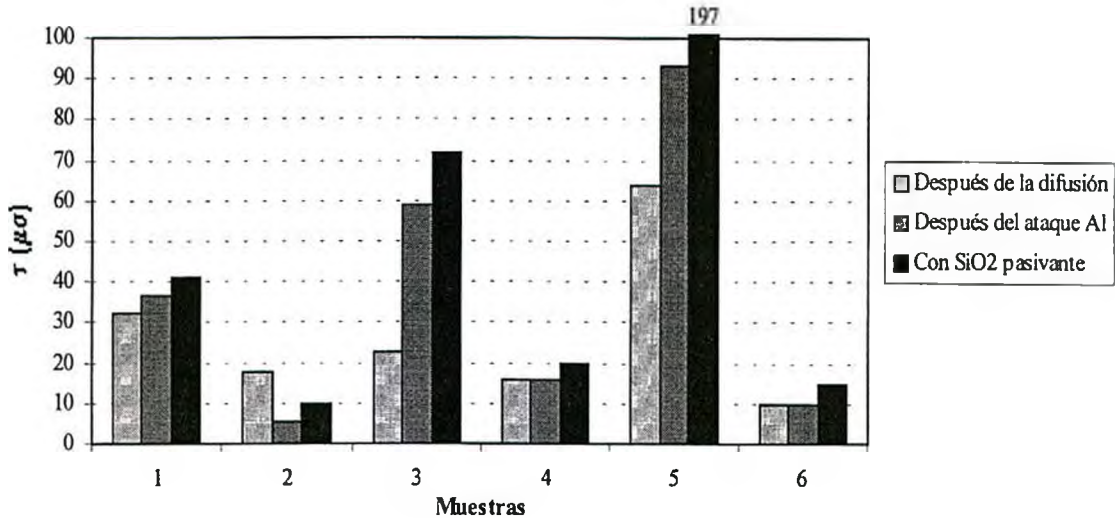


Figura 4.7. Características principales de las difusiones realizadas con el mismo tipo de obleas.

Caracterización estructural y química de las muestras de silicio elaboradas

Existen varias técnicas para caracterizar la superficie de muestras que permiten determinar tanto la morfología de la misma como su composición química. Una de ellas es la microscopía electrónica de barrido, SEM (*Scanning Electron Microscopy*).

Se utilizó esta técnica para analizar la aleación *Si-Al* que se forma en la cara posterior de las estructuras $n^+ - p - p^+$ durante la codifusión de P y Al.

La Tabla 4.3 detalla las características de las muestras que fueron observadas en el microscopio electrónico de barrido.

Tabla 4.3. Detalles de las muestras analizadas

Muestra	Característica	Estructura de la celda
A	aleación atacada (p^+)	n^+-p
B	aleación Si-Al (1 μm de Al)	n^+-p-p^+
C	aleación Si-Al (6 μm de Al)	n^+-p-p^+

Las micrografías de la muestra A se tomaron a estructuras de Si n^+-p-p^+ cuyo emisor - p^+ fue atacado. El ataque de la aleación Si-Al se realizó mediante un decapado químico de

En la Figura 4.8 correspondiente a muestras de tipo A, se observa el ataque de la aleación Al-Si en la cara posterior no fue homogéneo, sino que quedan “islas” de Al y zonas “desnudas” donde se puede apreciar el Si. Las zonas más claras corresponden a la aleación mientras que las más oscuras corresponden al silicio.



Figura 4.8. Micrografía de la superficie de Al difundido. Aumento: 4821X, escala: 10µm

En la Figura 4.9 se observa con mayor aumento zonas con Al-Si y zonas con silicio solamente.

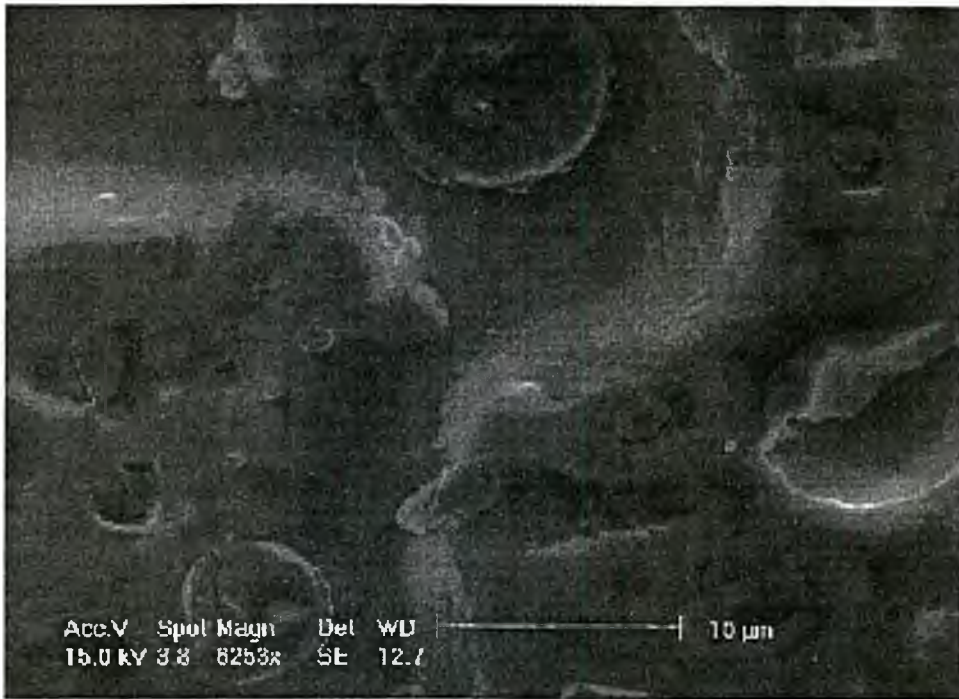


Figura 4.9. Micrografía del borde de la superficie de la aleación Al-Si. Aumento:6253X, escala: 10μm

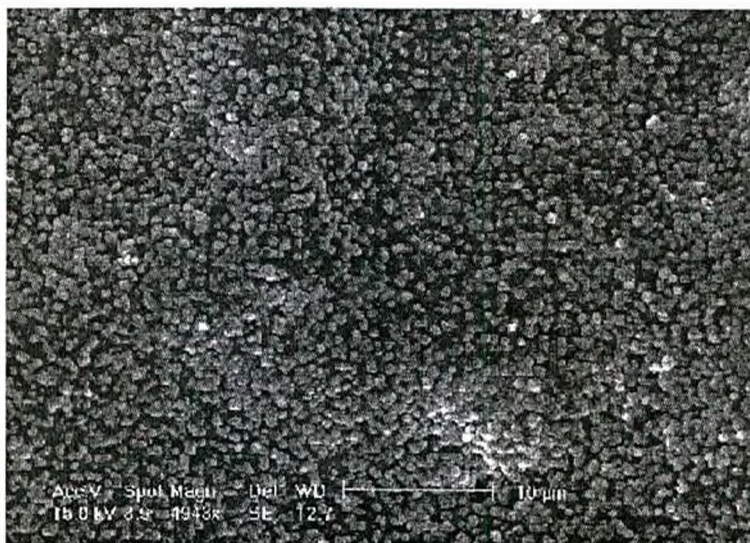


Figura 4.10. Micrografía de la superficie de Al difundido. Aumento:4943X, escala: 10μm

Las Figuras 4.12 y 4.13 muestran micrografías de muestras tipo B con diferentes aumentos. En la de mayor aumento (Figura 4.11 a) y b)) se observa que existen zonas con Al-

Si y regiones con Si solamente (zonas más oscuras). Por tanto, la evaporación de 1 μm de Al y posterior difusión no resultó en un emisor homogéneo.

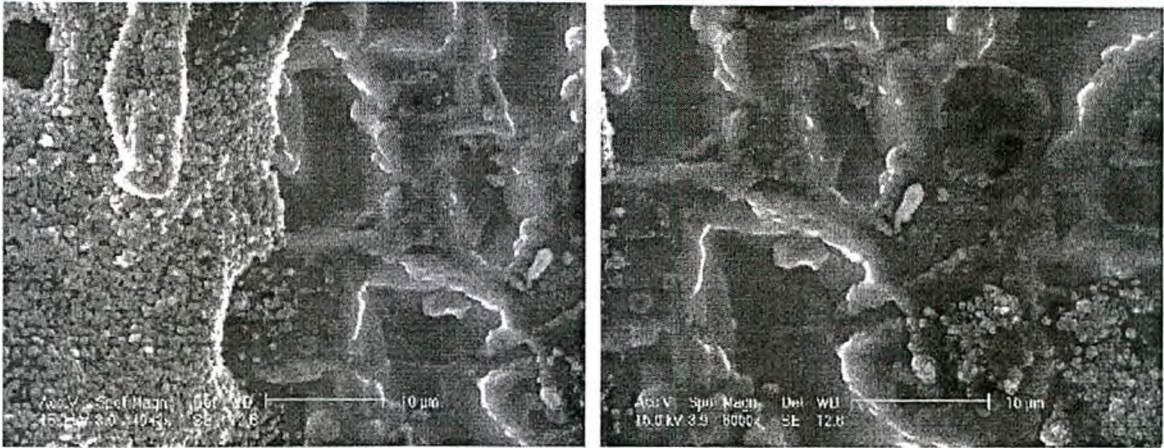


Figura 4.11. a) Micrografía de la superficie de Al difundido y aleación Al- Si. Aumento: 4943X, escala: 100 μm . b) Micrografía de la superficie de la aleación Al-Si. Aumento: 6000X, escala: 10 μm

En la Figura 4.12 se muestra la micrografía correspondiente a el borde de la muestra, que corrobora que el emisor no es homogéneo y permite, además estimar el espesor de la aleación.

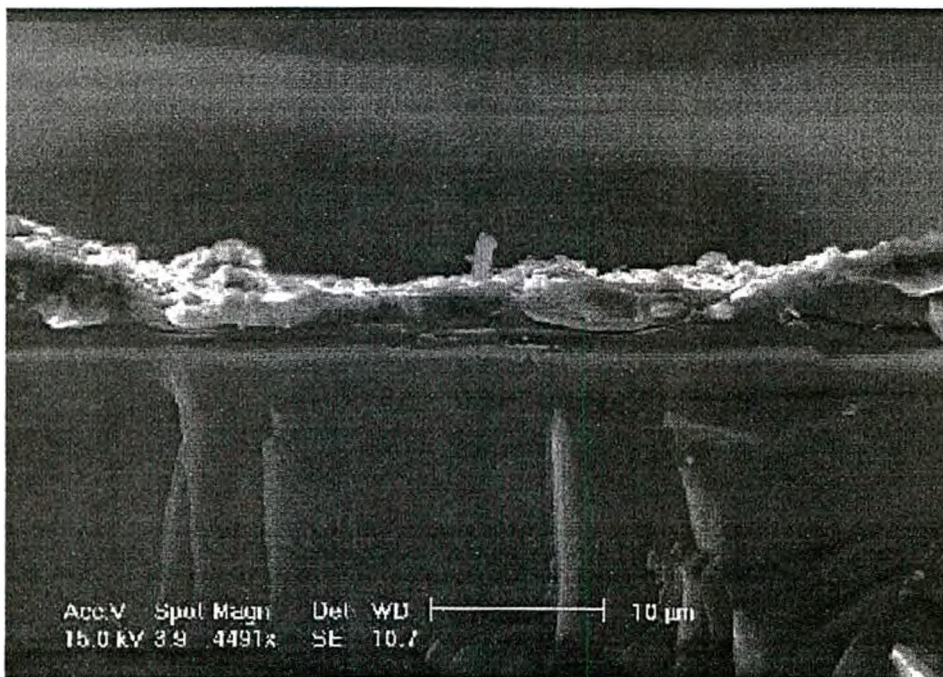


Figura 4.12. Micrografía del borde de la superficie de la aleación Al-Si. Aumento: 4491X, escala: 10 μm

Las micrografías de la Figura 4.13 para una muestra C permiten observar nuevamente inhomogeneidad en la aleación aluminio-silicio, aunque con una aparente mayor superficie con aleación.

En la Figura 4.14 se muestra la micrografía correspondiente al borde de la muestra C, que corrobora que el emisor no es homogéneo, quedando zonas desprovistas de la aleación.. Por otra parte se pudo estimar el espesor de la aleación Al-Si en aproximadamente $5\text{ }\mu\text{m}$.

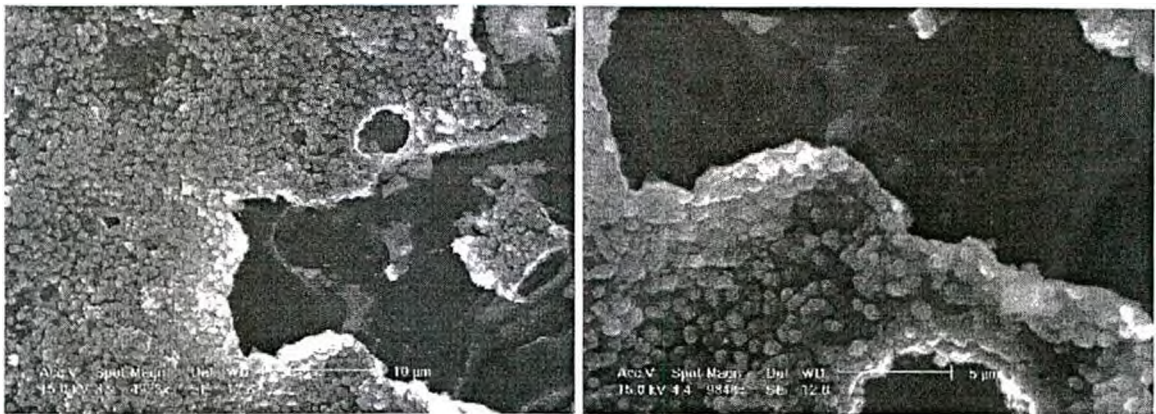


Figura 4.13. a) Micrografía de la superficie de Al difundido y aleación Al- Si. Aumento: 4923X, escala: $10\mu\text{m}$. b) Micrografía de la superficie de la aleación Al-Si. Aumento: 9846X, escala: $5\mu\text{m}$

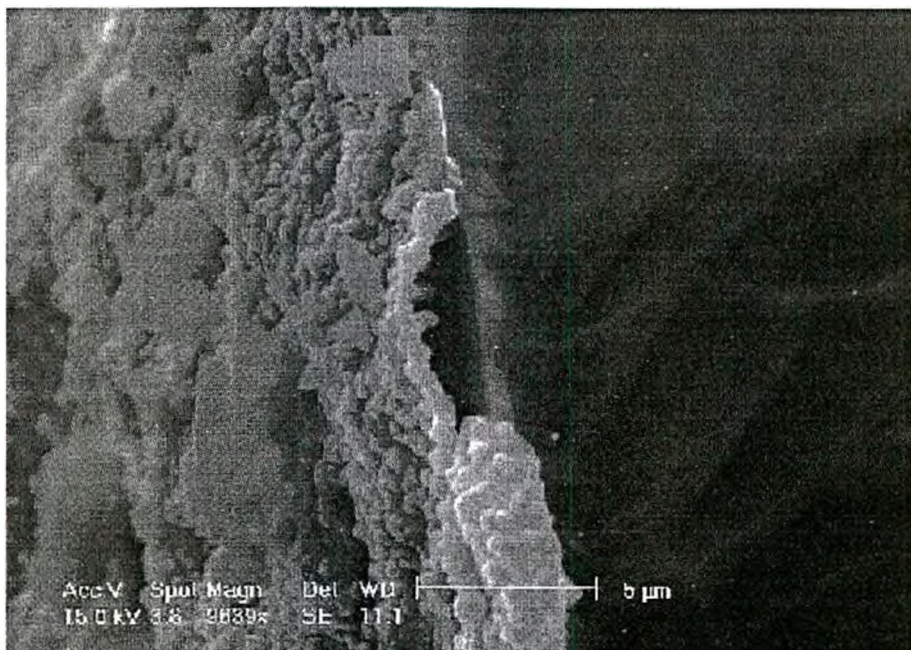


Figura 4.14. Micrografía del borde de la superficie de la aleación Al-Si. Aumento: 9839X, escala: $5\mu\text{m}$

4.3.2 Extracción de impurezas en obleas de silicio oxidadas

En la colaboración con el grupo GES-PUCRS (Grupo Energía Solar de la Pontificia Universidade Católica do Rio Grande do Sul - Porto Alegre - Brasil) se evaluaron diferentes procesos de “*gettering*” sobre obleas de silicio cristalino previamente oxidadas. En este caso, la medición del tiempo de vida media de los portadores minoritarios se realizó mediante la técnica PCD en el Instituto de Energía Solar de la Universidad Politécnica de Madrid, España (UPM).

Para realizar las mediciones del tiempo de vida media de los portadores de la base se eliminaron químicamente las regiones difundidas y las muestras se sumergieron en ácido fluorhídrico al 50% para pasivar ambas superficies durante la medición. Se emplearon los dos métodos de medición mencionados en el Capítulo 3: el modo transitorio y el modo estacionario.

Se emplearon obleas de silicio monocristalino CZ y FZ tipo p, $\rho = 1 \Omega \text{ cm}$ y espesor de $300 \mu\text{m}$, muestras de $(4 \times 2) \text{ cm}^2$ y las muestras se limpiaron con la técnica RCA (*Radio Corporation of America*) [12]. Se prepararon muestras con oxidación seca y con oxidación húmeda. Luego de la eliminación del óxido se procedió nuevamente a una rigurosa limpieza RCA [12] de las obleas para eliminar restos de resinas o impurezas que puedan quedar del proceso de fotolitografía.

Para la elaboración de los emisores se emplearon dos tipos de difusión:

- ❖ **difusión en un paso**, con capa de Al previamente evaporada, y,
- ❖ **difusión en dos pasos**, con capa de Al evaporada después de la formación de la juntura frontal.

A su vez, en cada una de las difusiones se varió el tiempo de burbujeo del POCl_3 a fin de lograr una difusión supersaturada (30 minutos de burbujeo con $240 \text{ cm}^3/\text{min}$ de N_2) y una difusión ligera (5 minutos y $240 \text{ cm}^3/\text{min}$ de N_2).

La Figura 4.15 y Tabla 4.4 muestran los resultados obtenidos. Se observa que:

- La oxidación húmeda degrada el τ_{ef} sustancialmente.
- La difusión supersaturada es, en general, más eficiente que la difusión ligera.
- La codifusión de P y Al es, en la mayoría de los casos, más eficiente para la

captura de impurezas que la difusión exclusivamente de fósforo.

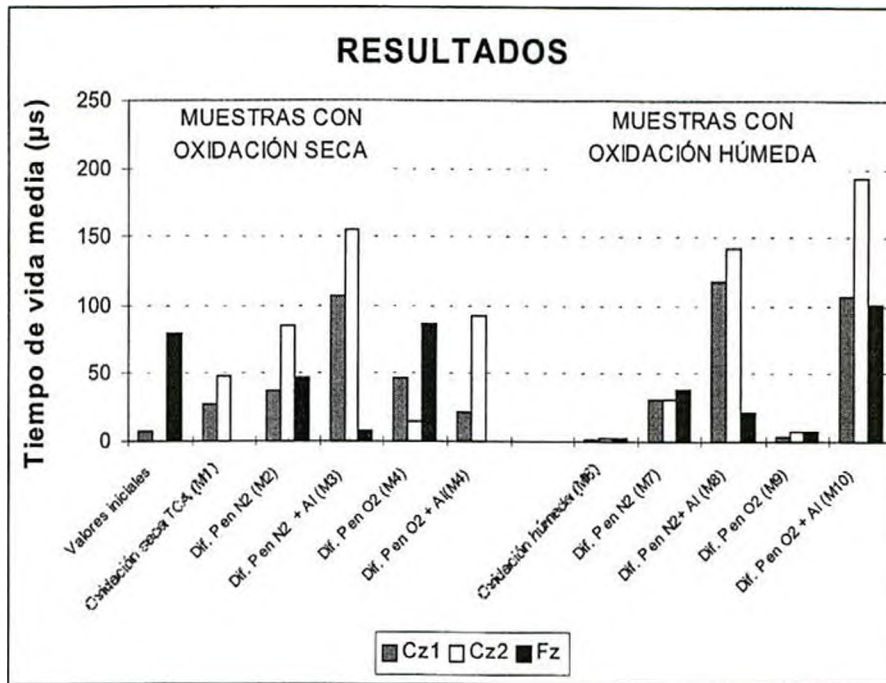


Figura 4.15. Tiempo de vida obtenidos en los procesos.

Tabla 4.4. Tiempos de vida obtenidos por medición con la técnica PCD para los procesos ensayados

	CZ1	CZ2	FZ
	τ_{ef} (μs)	τ_{ef} (μs)	τ_{ef} (μs)
Valores iniciales	7,4 (ss) ¹	-----	79 (ss)
Oxidación seca con TCA	27,8 (ss)	48,6 (ss)	-----
Difusión super saturada	37,8 (ss)	85,4 (ss)	47 (ss)
Difusión super saturada +Al	107 (t)	155 (t)	7,4 (ss)
Difusión ligera	47 (ss)	14,8 (ss)	86,8 (ss)
Difusión ligera + Al	21,6 (ss)	93 (t)	-----

Oxidación húmeda	1,5 (ss)	2,1 (ss)	1,9 (ss)
Difusión super saturada	31,1 (ss)	31,4 (ss)	38,4 (ss)
Difusión super saturada +Al	118 (t)	142 (t)	21,7 (ss)
Difusión ligera	3,1 (ss)	7 (ss)	6,8 (ss)
Difusión ligera + Al	107 (t)	193 (t)	101 (ss)

¹ (ss) Corresponde a la medición realizada con el método estado estacionario ("steady state") y (t) corresponde a la medida realizada en el modo transitorio ("transient").

4.4 APLICACIÓN DE LAS TÉCNICAS DESARROLLADAS A LA FABRICACIÓN DE UN PANEL SOLAR TERRESTRE

Se ha diseñado y construido un módulo fotovoltaico de baja potencia para alimentar un sistema de seguimiento de concentradores como los empleados en cocinas solares. El conjunto permitirá un óptimo aprovechamiento de la radiación directa emitida por el sol por parte del dispositivo concentrador. La automatización del mismo, es un requisito casi imprescindible para una buena utilización de las cocinas, tal como se describe abundantemente en la bibliografía. Un seguidor y un motor constituyen la carga eléctrica del panel, el cual va montado en el mismo plano del concentrador (Figura 4.16) [25]



Figura 4.16. Primer panel solar de uso terrestre elaborado en CNEA integrado a una cocina solar

En base a la radiación disponible y a los requerimientos de potencia del motor se ha diseñado el panel fotovoltaico. De esta manera, cuando está soleado, la mayor parte de la energía producida por el módulo fotovoltaico es consumida por el motor y circuito de control al estar activos, mientras que si están en “espera”, el consumo es casi nulo. En la zona de ensayos (NOA, noroeste argentino), el motor arranca bien, aun con bajos niveles de radiación en plano horizontal en las primeras horas de la mañana. Al ser un módulo pequeño, puede ser

montado sobre el propio concentrador, para recibir niveles más elevados de radiación.

Se desarrolló un programa de clasificación y simulación de interconexión de celdas [26]. A fin de comparar los resultados obtenidos por simulación con las mediciones experimentales, se realizó el cálculo de la interconexión en serie de 6 cadenas, cada una de ellas formada por 6 celdas en serie, utilizando los archivos de datos de las curvas I-V medidas después del proceso de elaboración de las celdas. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 4.5. En la Figura 4.17 se muestra la curva I-V medida de una celda y las curvas obtenidas por simulación de una cadena y del panel.

Tabla 4.5. Valores de los parámetros eléctricos de las cadenas de 6 celdas en serie y del panel formado por las 6 cadenas en serie, obtenidos por simulación numérica.

CADENA	V_{ca} (V)	I_{cc} (A)	$P_{m\acute{a}x}$ (W)	FF	$V_{m\acute{a}x}$ (V)	$I_{m\acute{a}x}$ (A)
1	3,632	0,216	0,582	0,742	2,911	0,200
2	3,628	0,208	0,571	0,757	2,923	0,195
3	3,644	0,216	0,568	0,722	2,830	0,201
4	3,624	0,218	0,579	0,732	2,932	0,197
5	3,625	0,205	0,573	0,770	2,937	0,195
6	3,615	0,206	0,561	0,755	2,934	0,191
PANEL	21,769	0,208	3,425	0,756	17,458	0,196

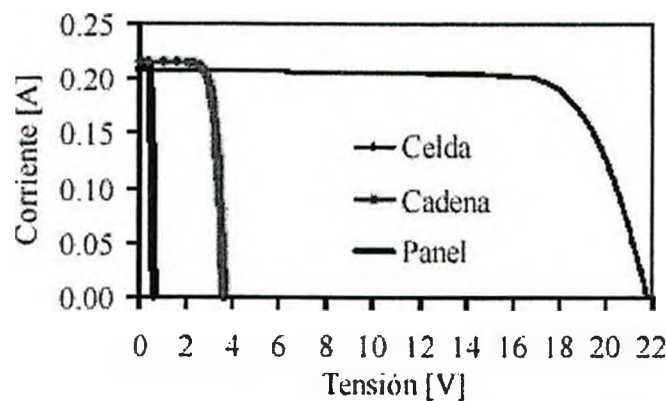


Figura 4.17. Curvas I-V de una celda, una cadena de 6 celdas en serie y el panel formado por 6 cadenas en serie, cada una ellas compuesta por 6 celdas en serie

Posteriormente, se realizaron mediciones individuales de celdas soldadas y de cadenas y se realizó una nueva simulación con las curvas I-V individuales de las celdas soldadas. Los resultados de la simulación se presentan en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6. Valores de los parámetros eléctricos de las cadenas de 6 celdas en serie y del panel formado por las 6 cadenas en serie, obtenidos por ajuste numérico, utilizando las curvas I-V individuales de las celdas soldadas.

CADENA	V_{ca} (V)	I_{cc} (A)	$P_{m\acute{a}x}$ (W)	FF	$V_{m\acute{a}x}$ (V)	$I_{m\acute{a}x}$ (A)
1*	-----	-----	-----	-----	-----	-----
2	3,624	0,198	0,560	0,779	3,000	0,187
3	3,594	0,205	0,576	0,781	3,008	0,191
4	3,561	0,209	0,543	0,729	2,937	0,185
5	3,599	0,197	0,559	0,790	3,027	0,185
6	3,573	0,197	0,543	0,773	3,008	0,181

*Nota: No se cuenta con datos de la cadena 1.

En la Figura 4.18 se presentan las curvas I-V de una celda después del proceso de elaboración (a), la misma celda ya interconectada a la cadena (b), la cadena obtenida por simulación a partir de las mediciones de las celdas sin soldar (c), a partir de las mediciones de las celdas ya interconectadas (d) y (e) la medición de la cadena de 6 celdas en serie.

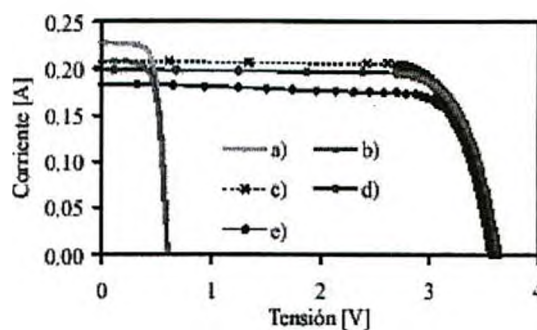


Figura 4.18. Curvas I-V de a) una celda después del proceso de elaboración; b) la misma celda ya interconectada; c) la simulación a partir de las celdas sin soldar; d) la simulación a partir de las celdas ya interconectadas; e) la medición de una cadena de 6 celdas en serie.

En base a los requerimientos de potencia para alimentar el motor del sistema de seguimiento de la cocina solar se diseñó el panel en el Grupo Energía Solar de la CNEA (GES) con 36 celdas de silicio cristalino y una potencia pico de 70 mW. Para tal fin se elaboraron en el laboratorio del GES aproximadamente 80 celdas solares rectangulares de 20 mm por 40 mm y de estructura n^+p-p^+ . Se utilizaron obleas de silicio monocristalino de origen comercial, dopadas con B y con una resistividad de $1 \Omega \text{ cm}$ aproximadamente.

El proceso de elaboración consta básicamente de los siguientes pasos: preparación de las obleas, evaporación de Al en una de las caras, difusión de los dopantes y depósito de los contactos [26].

Una vez fabricadas las celdas, se realizó la caracterización eléctrica mediante la medición de la curva I-V usando un simulador solar clase C [27], obteniéndose de las mismas los parámetros eléctricos característicos, tensión a circuito abierto (V_{ca}), corriente de cortocircuito (I_{cc}) y, por medio de un ajuste numérico, se obtuvieron el factor de forma de la curva (FF) y la eficiencia (η).

Una vez medidas, se procedió a la selección de las 36 celdas que configurarían el panel. Se eligieron las celdas que tenían potencias más altas. Las curvas I-V de las 36 celdas seleccionadas finalmente se muestran en la Figura 4.19.

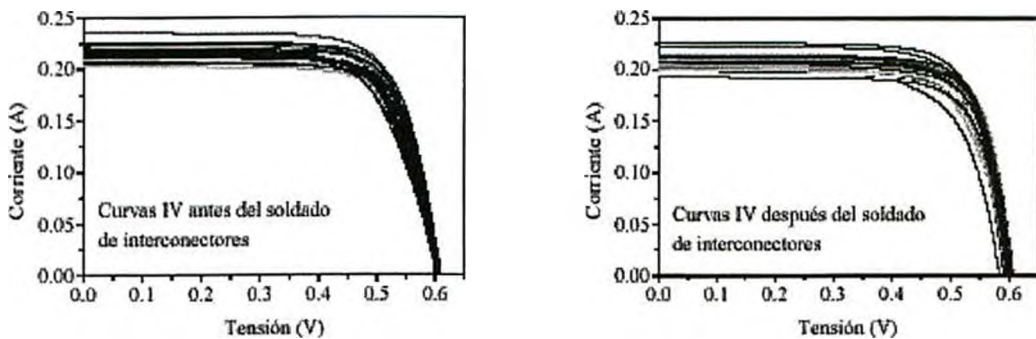


Figura 4.19. Curvas I-V de las 36 celdas seleccionadas, antes (izquierda) y después (derecha) del soldado de los interconectores.

En la Tabla 4.7 se muestran los promedios de las características eléctricas de las mismas y su dispersión. Como se puede observar las curvas son muy similares, presentando poca dispersión tanto antes como después del soldado de las cintas de conexión.

Tabla 4.7. Promedio y dispersión de las características eléctricas de las 36 celdas solares seleccionadas.

	V_{ca} (mV)	I_{cc} (mA)	FF	η	V_{max} (mV)	I_{max} (mA)	$P_{m\acute{a}x}$ (W)
Dispersión	604	218	0,73	12%	481	200	0,069
σ	2	7	0,03	0,5	13	6	0,004
%	0,4	3,4	3,9	3,9	2,8	3,1	3,9

Se utilizaron cintas de plata laminada de 50 μm de espesor y 4mm de ancho para la interconexión de las celdas. Se procedió a armar las 6 cadenas de 6 celdas en serie, su posterior medición y por último la interconexión de las mismas.

La laminación de las 36 celdas interconectadas fue realizada por la empresa Kyocera Solar Argentina; el frente del módulo es de vidrio templado, de bajo contenido de hierro, las celdas están encapsuladas entre capas de material plástico (EVA) para darles resistencia a la humedad, estabilidad a la radiación ultravioleta y aislación eléctrica. La cara posterior está formada por un polímero de capas múltiples de alta resistencia a la acción mecánica (PET). El marco es de aluminio anodizado, para dar al módulo resistencia estructural y facilidad de instalación [28].

Realizando una inspección visual del panel se detectó que una de las celdas estaba rota. Se realizaron mediciones al Sol de V_{ca} y de I_{cc} , colocando en sombra dicha celda y alguna otra celda sin falla visible; se comprobó que la celda rota era la que limitaba la corriente del panel. Además, por medio de la medición de la curva I-V se corroboró la falla, como puede notarse en la Figura 4.20.

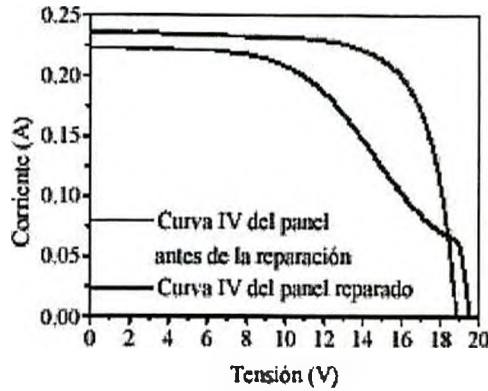


Figura 4.20. Curva I-V del panel antes y después de la reparación.

Dado que el panel no posee diodos de protección fue necesario eliminar la celda fallada. La reparación consistió en ubicar exactamente la celda en cuestión, desprender cuidadosamente el polímero posterior, cortocircuitarla soldando una cinta de plata y por último sellando la abertura con silicona. La verificación de la reparación se hizo mediante la medición de la curva I-V como se muestra en la Figura 4.20.

El sistema de seguimiento adoptado, consta de un circuito electrónico muy simple, consistente en un puente resistivo que busca el equilibrio a través de un amplificador error, y la corrección del mismo la realiza mecánicamente un pequeño motor (potencia aproximada 1,5W). La fuente de alimentación proviene del panel descrito previamente, y está acoplada con un capacitor electrolítico y un dispositivo de disparo, que funciona de manera tal que el sistema deja de actuar cuando la tensión del panel desciende por debajo de un valor prefijado, limitando las condiciones de operación del sistema.

En la Figura 4.21, se observan las curvas características del panel cuando se conecta el motor y el circuito eléctrico para distintas irradiancias.

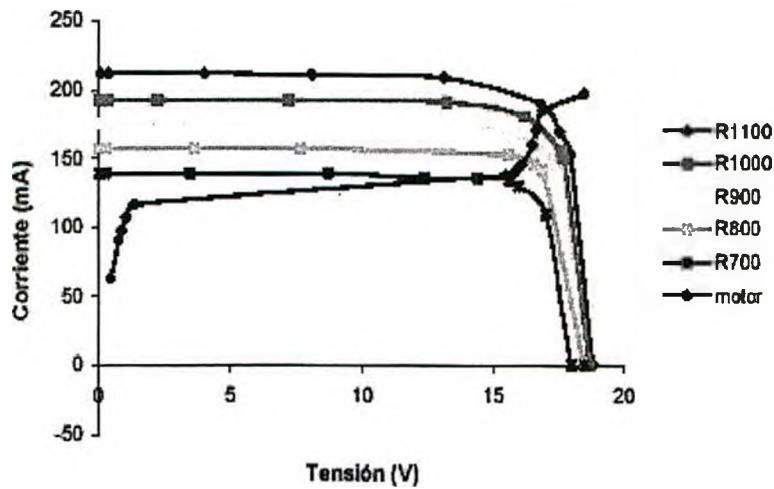


Figura 4.21. Curva I-V característica del panel con el motor-controlador conectado para distintas niveles de irradiancia.

A partir de la caracterización eléctrica del panel, se observa que la disminución de las I_{sc} de las cadenas en las curvas c) y d) de la Figura 4.18 se debe a la contribución de las resistencias de los conectores y soldaduras; mientras que la diferencia entre la curva medida e) y la curva d) se atribuye a la falta de homogeneidad del simulador solar sobre el área que ocupan las 6 celdas. Por tanto, se deduce entonces que el modelo utilizado en la simulación se encuentra en buen acuerdo con los resultados experimentales.

Con respecto al conjunto cocina + panel, ambos se adaptan adecuadamente. Si bien puede parecer que sistema está sobredimensionado, esto es una ventaja ya que no se ha incluido un dispositivo de acumulación. En cuanto al acoplamiento mecánico, las pérdidas por rozamiento, todavía pueden ser mejoradas, dado que en ciertas ocasiones, sobre todo bajo condiciones de viento severas, el sistema se engrana e inclusive puede llegar a oscilar [25].

Referencias Capítulo 3

- 1 M.J.L. Tamasi. *Celdas Solares para Uso Espacial: Optimización de Procesos y Caracterización*, Tesis Doctoral, Universidad Nacional de General San Martín, Comisión Nacional de Energía Atómica, Instituto de Tecnología "Prof. Jorge A. Sábato" (2003).
- 2 S.M. Sze. *Physics of Semiconductor Devices*, J.Wiley & Sons (1981).
- 3 P. Basore et. al. *Simplified High-Efficiency Silicon Cells Processing*, Solar Energy Materials and Solar Cells **32**, pág. 91 (1994).
- 4 S.K. Ghandhi. *VLSI Fabrication Principles Silicon and Gallium Arsenide*. J.Wiley & Sons (1983).
- 5 A. Ghandhi. *VLSI Fabrication Principles Silicon and Gallium Arsenide*. J.Wiley & Sons, (1983).
- 6 G.C. Jain. S. N. Singh, R. K. Kotnala, N. K. Arora. *Fabrication of p^+-n-n^+ silicon solar cells by simultaneous diffusions of boron and phosphorus into silicon through silicon dioxide*, J. App. Phys. **52**, 4821 (1991).
- 7 S.J. Fonash. *Solar Cell Device Physics*, Academic Press (1981).
- 8 R. Lagos, A. Moehlecke, J. Alonso, I. Tobías y A. Luque. *Contamination and gettering evaluation by lifetime measurements during single crystal cell processing*, Proc. First World Conf. Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC), Hawaii, 1629 (1994).
- 9 S.M. Sze. *VLSI Technology*, McGraw-Hill Book Company (1983).
- 10 M.A. Green. *Solar cells: Operating principles, technology and system applications*, ed. University of New South Wales, Australia (1992).
- 11 D.J. Elliot. *Integrated circuit fabrication technology*, McGraw-Hill (1982).
- 12 Proceedings of the First International Symposium on Cleaning Technology in Semiconductor Device Manufacturing. "*Semiconductor cleaning technology/ 1989*", The Electrochemical Society Inc., (1990).
- 13 G. Azzaroni, C.J. Bruno, L. Dawidowski, A. Frigerio. *Photovoltaic characterization*

- facilities development*, Proceedings of the Workshop on Materials Science and Physics of Non-Conventional Energy Sources, Bs.As.-Argentina (1992).
- 14 Vilmet. Artículos para galvanoplastia. *Boletín técnico: baño de plata brillante XV 304*, (2002).
 - 15 <http://www.emcore.com>, <http://www.spectrolab.com>, <http://www.tecstar.com>
 - 16 S.P. Tobin et al.. *MOCVD Growth of AlGaAs and GaAs on Ge Substrates for High Efficiency Tandem Cell Applications*, in Conf. Rec. 18th. IEEE PVSC., pág. 134-139, (1985).
 - 17 G. Santana, A. Morales-Acevedo, A. Martel, L. Hernández. *Gettering effects by aluminium upon the dark and illuminated I-V characteristics of N^+PP^+ silicon solar cells*, Solar Energy Materials & Solar Cells **62** 369-378 (2000).
 - 18 J.R. Davis Jr., A. Rohatgi, R.H. Hopkins, P.D. Blais, P. Rai-Choudhury, J.R. McCormick y H.C. Mollenkopf. *Impurities in silicon solar cells*, IEEE Trans. Electron. Devices, ED-27, pp. 667-687 (1980).
 - 19 A. Moehlecke. *Tesis Doctoral: Conceptos avanzados de tecnología para células solares con emisores p^+ dopados con boro*, Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Telecomunicación, Madrid, (1996).
 - 20 J.S. Kang y D.K.Schroder. *Gettering in silicon*, J. Applied Physics, Vol. 65, N. 8, pp.2974-2985, (1989).
 - 21 J. del Álamo. J. Eguren, Solid State Electron. 24 pág. 415 (1981).
 - 22 C.S. Chen. D.K. Schroder, J. Appl. Phys. 71 (12) pág. 5858 (1992).
 - 23 A. Rohatgi. P. Sana, M.S. Ramanachalam, J. Salami y W.R. Carter. *Investigacion of the effects of aluminum treatment on silicon solar cells*, 23rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Louisville (KY), pp. 52-57 (1993).
 - 24 S.M. Joshi. U.M. Gösele y T.Y. Tan, *Improvement of minority carrier diffusion length in Si by Al gettering*, J. Appl. Phys. V.77, pp. 3858-3863 (1995).
 - 25 C. Cadena, H. Bárcena, R. Echazú, R. Caso, L. Saravia, M.G. Martínez Bogado, M.J.L. Tamasi y E.M. Godfrin. *Sistema de seguimiento para cocinas solares alimentado por*

módulo fotovoltaico. Avances en Energías Renovables y medio Ambiente 6, pág. 04.37 (2002).

26 C.G. Bolzi, L.M. Merino, M.J.L. Tamasi, J.C. Plá, J.C. Durán, C.J. Bruno, E.M. Godfrin, A. Lamagna, M.P. Barrera y L.B. Quintero. *Elaboración y caracterización de celdas y paneles solares de silicio cristalino para su ensayo en el satélite SAC-A*, AVERMA 1, Nro. 2, 1 (1997).

27 G. Azzaroni, C.J. Bruno, L. Dawidowsky, A. Frigerio. *Photovoltaic characterization facilities development*, Proc. Workshop on Materials Science and Physics of Non Conventional Energy Sources, Bs.As., pág. 246 (1992).

28 Hoja técnica de los productos de Kyocera Solar Argentina S.A. en www.kyocerasolar.com.ar (2002).

Capítulo 5

DISEÑO, FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UN MÓDULO DE INGENIERÍA PARA ENSAYOS DE CALIFICACIÓN

Durante la ejecución de la Tesis se realizaron actividades relacionadas con el diseño, la fabricación y el ensayo de módulos solares para usos espaciales.

El diseño de un panel solar para un satélite artificial requiere el desarrollo de modelos que permitan predecir sus características eléctricas y magnéticas a fin de determinar su compatibilidad con los diferentes subsistemas del satélite. Al respecto, se desarrolló un modelo para el cálculo del momento dipolar magnético. Este modelo fue utilizado para estimar el momento magnético los paneles solares del satélite SAC-C, con el fin de verificar los datos provistos por el fabricante, y para proponer diferentes configuraciones geométricas para los paneles del satélite SAOCOM.

En este Capítulo se presentan diversas actividades desarrolladas en relación con la fabricación y ensayo de un módulo de ingeniería. Las etapas de armado de los paneles solares para uso satelital pueden enumerarse en: recepción de los componentes (vidrios, diodos, celdas solares, interconectores, etc.); medición eléctrica y clasificación de las celdas; soldadura de interconectores, diodos de paso e interconexión de las celdas en subcadenas en serie; pegado del vidrio frontal a las celdas y de las subcadenas al sustrato; cableado y ensayos eléctricos, de vibraciones y de termovació del módulo de ingeniería.

5.1 MOMENTO MAGNÉTICO DE UN PANEL SOLAR

La minimización del momento dipolar magnético de los paneles solares es de suma importancia por su posible interacción con los instrumentos del satélite, en particular con magnetómetros y antenas. El cálculo implica consideraciones de simetría de la disposición de

las celdas solares y demás componentes eléctricos, tanto a nivel del módulo como a nivel del conjunto de módulos que componen el sistema de alimentación del satélite.

Desde un punto de vista magnético, el caso más desfavorable (es decir, el de mayor campo magnético generado) se produce al comienzo de la vida útil del satélite, *BOL*, ("*Beginning of Life*") y con incidencia de radiación normal (es decir, perpendicular), ya que en estas condiciones la corriente generada es máxima.

Se desarrolló un modelo sencillo para el cálculo del momento dipolar magnético. Se aplicó el modelo planteado a la configuración de paneles del SAC-C y a la posible disposición de los módulos solares del SAOCOM.

5.1.1 Momento magnético del panel para la misión SAC-C

El sistema de los paneles solares del SAC-C constan de dos alas semioctaédricas desplegables, cada una de ellas está compuesta por cuatro paneles rectangulares planos y fijos. Las dimensiones laterales son: 1550 mm x 509 mm, para los paneles laterales y 1550 mm x 530 mm para los paneles centrales. Cada uno de los paneles está formado por 7 cadenas de 50 celdas cada una [1].

El momento dipolar magnético, m , de un conjunto de celdas conectadas en serie no sólo depende de su configuración geométrica sino también del cableado correspondiente. Se analizan dos casos extremos: uno que corresponde a hacer mínimo valor de m y otro que lo hace máximo, y otro más realista basado en el cableado del panel de vuelo.

Se consideró la geometría que se muestra en la Figura 5.1. La cadena fue representada por un conductor unidimensional por el cual circula la corriente de trabajo. Las dimensiones utilizadas corresponden a las dimensiones reales de las celdas, teniendo en cuenta también la separación entre las mismas.

La cadena está formada por 5 subcadenas de 10 celdas cada una. Las dimensiones de las celdas son de 41 x 42,4 mm², mientras que la separación entre celdas de cada subcadena es de 0,8 mm, la separación entre subconjuntos de 5 celdas de cada subcadena es de 10 mm, y la separación entre subcadenas de 10 celdas adyacentes es de 2 mm. Se consideró, como hipótesis simplificadora, que la cadena y el conductor que cierra el circuito son coplanares.

Se calculó el momento magnético utilizando la siguiente expresión para el módulo:

$$\vec{m} = I \vec{A} \quad (5.1)$$

siendo I la corriente que circula por la cadena y $\vec{A}$ el área encerrada por el circuito, expresión válida para un circuito cerrado coplanar. Cabe aclarar que la dirección del vector momento dipolar magnético es perpendicular al plano del panel.

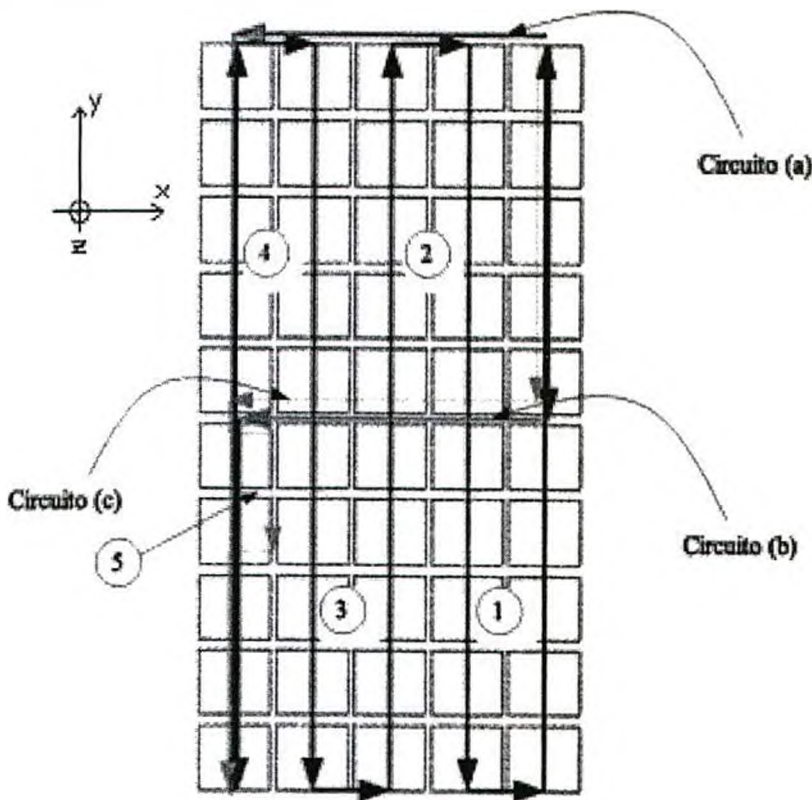


Figura 5.1. Esquema del modelo utilizado para la estimación del momento magnético de una cadena correspondiente al satélite SAC-A. Los recorridos rojo (a) y azul (b) representan dos maneras distintas de cerrar el circuito.

Si se considera el circuito (a), el área efectiva resulta

$$A = 3,79 \times 10^{-2} \text{ m}^2 \quad (5.2)$$

mientras que la corriente de cortocircuito en condiciones estándar (AM0 @25°C) y BOL es [1]:

$$I = I_{cc} = 535,4 \text{ mA} \quad (5.3)$$

resulta así

$$m = 0,0203 \text{ A m}^2 \quad (5.4)$$

el momento dipolar magnético del panel del SAC-C con la corriente de cortocircuito. Si se

considera la corriente en condiciones operativas *BOL* a una temperatura de trabajo de 70°C ($I = 3,7 \text{ A}/7 = 0,529 \text{ A}$), el momento dipolar magnético para la cadena resulta

$$m = 0,0200 \text{ A m}^2 \quad (5.5)$$

El valor dado por el fabricante del panel del SAC-C es [1]

$$m' = 0,0184 \text{ A m}^2 \quad (5.6)$$

el cual resulta muy similar a la estimación realizada.

Si se analiza el cableado de las cadenas cuyos planos fueron suministrados por el mismo fabricante, resulta que el circuito se cierra de manera similar al caso (b) de la figura, lo cual implica un momento magnético que se puede estimar, en primera aproximación, como nulo dado que se compensan en dirección y magnitud los momentos correspondientes a cada una de las secciones de área encerrada en el circuito.

Una representación un poco más precisa del cableado está dada por el circuito (c). En este caso quedan definidos cinco sectores del área encerrada (Figura 5.1):

$$A_z = 2 * 0,0105 \text{ m}^2, \text{ dos sectores con una contribución en la dirección } +z,$$

$A_{-z} = 2 * 0,0084 \text{ m}^2$, dos sectores con una contribución en la dirección $-z$, y una quinta,

$$A_{-z} = 0,0028 \text{ m}^2 \text{ un sector con una contribución en la dirección } -z.$$

Se puede obtener de esta manera una mejor estimación del momento dipolar de la cadena; considerando el caso de corriente de cortocircuito en condiciones (estándar) y *BOL* resulta:

$$m_c = 0,00068 \text{ A m}^2 \quad (5.7)$$

valor muy debajo del provisto por el fabricante y del límite máximo admitido por la misión.

5.1.2 Momento magnético de los paneles para la misión SAOCOM

Según el diseño preliminar de la misión, los paneles solares del satélite SAOCOM estarán constituidos por 80 cadenas de 32 celdas en serie cada una [2]. La cadena de 32 celdas se conforma de 8 subcadenas de 4 celdas cada una. Para calcular el momento dipolar magnético, se consideró un modelo análogo al utilizado en la sección anterior, salvo en el

hecho de que se tuvo en cuenta el carácter tridimensional del circuito como consecuencia de que el cableado se encuentra en la parte posterior del sustrato (Figura 5.2).

5.1.2.1 Momento magnético de una cadena de celdas en serie

El cálculo del momento dipolar magnético de una distribución de densidad de corriente $\vec{J}(x')$ está dado por:

$$\vec{m} = \frac{1}{2} \int \vec{x}' \times \vec{J}(x') d^3x' \tag{5.8}$$

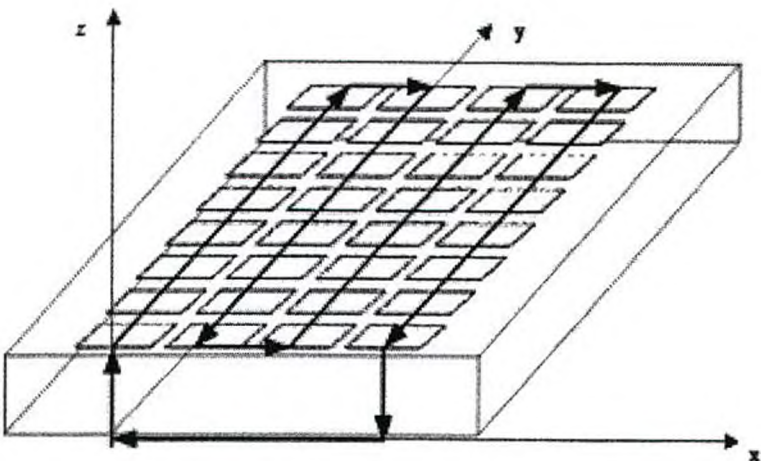


Figura 5.2. Esquema del modelo utilizado para la estimación del momento dipolar magnético de una cadena del panel para la misión SAOCOM.

Para conductores unidimensionales, como es el caso del modelo de la Figura 5.2, la ecuación (5.8) se transforma en una integral curvilínea a lo largo del conductor.

$$\vec{m} = \frac{1}{2} \int \vec{x}' \times \vec{J}(x') d^3x' \equiv \frac{1}{2} \int I \vec{x} \times d\vec{l} \tag{5.9}$$

Realizando la integral en coordenadas rectangulares x,y,z, y considerando que las dimensiones de las celdas son 76,10 mm x 37,16 mm, la separación entre celdas contiguas es de 0,9 mm y 3 mm entre subcadenas, el espesor del sustrato es 30 mm, y la corriente de cortocircuito corregida por área y temperatura de operación (70°C) es 0,4674 A se obtiene

$$\vec{m} = (0; 0,0033; 0,0231) \text{ A m}^2 \tag{5.10}$$

5.1.2.2 Momento magnético total del panel solar

Con el fin de minimizar el momento dipolar magnético total, se propone ubicar adecuadamente las cadenas adyacentes para orientar, en forma apropiada, la circulación de la corriente (Figura 5.3).

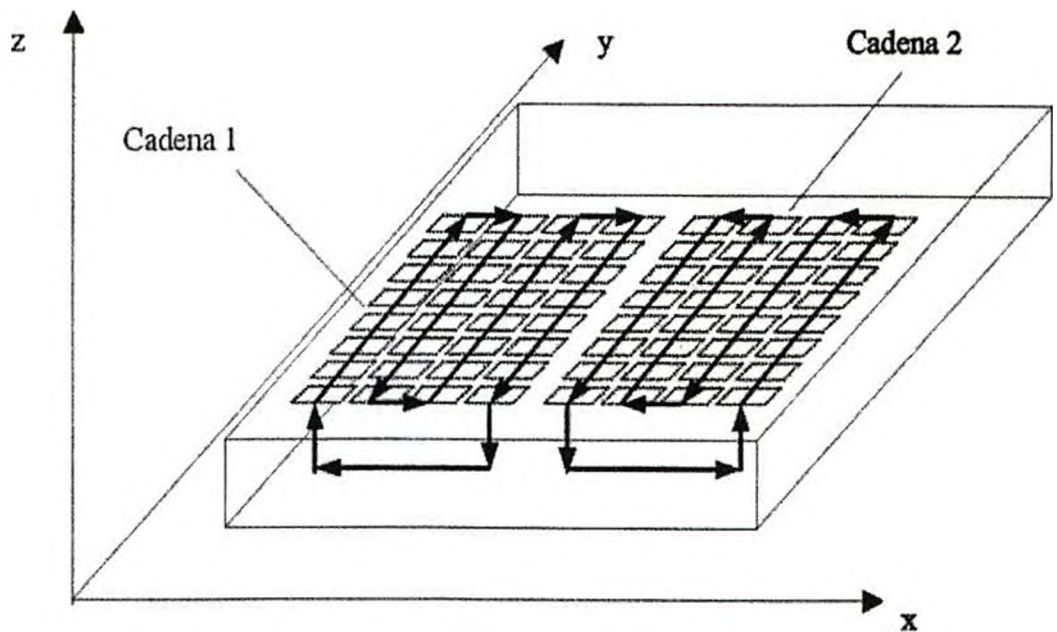


Figura 5.3. Propuesta de configuración de cadenas adyacentes.

Se observa que las cadenas adyacentes mostradas en la Figura 5.3 tienen invertido el sentido de circulación de la corriente. De esta manera, las componentes de los momentos magnéticos de cada cadena tienden a anularse entre sí: la componente z de la cadena 1 tiene dirección $-z$, mientras que dicha componente de la cadena 2 tiene la dirección contraria; asimismo, la componente y de la cadena 1 tiene dirección $+y$, mientras que la correspondiente de la cadena 2 tiene dirección $-y$. Por lo tanto, si las corrientes de ambas cadenas fueran exactamente iguales, se tendría una completa cancelación del momento dipolar magnético entre cadenas adyacentes.

Dado que el conjunto de celdas solares que constituyen un panel no tiene exactamente las mismas características eléctricas, sino que posee una dispersión estadística alrededor de un cierto valor medio, la conformación de cadenas en serie con dichas celdas conducirá a valores diferentes de la corriente de trabajo en cada una de las cadenas. A fin de evaluar la incidencia de estas diferencias sobre el momento dipolar magnético total de dos cadenas adyacentes, se consideró una distribución normal de corrientes de trabajo de las 2560 celdas que, en

principio, conformarán los paneles.

La estimación de la dispersión estadística de la corriente se realizó de acuerdo a los datos provistos por el fabricante. Las celdas de triple juntura $InGaP_2/InGaAs_2/Ge$ marca EMCORE a ser utilizadas en los paneles tienen una corriente media en el punto de máxima potencia, $I = 430\text{ mA}$, con una dispersión: $\sigma^I \cong 10\text{ mA}$.

Se considera en consecuencia una distribución normal de 2560 valores de corriente en el punto de máxima potencia, de valor medio 430 mA y dispersión 10 mA (Figura 5.4). El conjunto de los tres paneles de la misión SAOCOM resultaría entonces conformado por 80 cadenas de 32 celdas cada una elegidas de esta distribución. Asumiendo que cada conjunto de 32 celdas se elige de intervalos adyacentes de la distribución estadística, y que luego serán ubicadas también en forma adyacente desde el punto de vista espacial, se puede estimar una cota para la diferencia de momento magnético total de cadenas adyacentes considerando valores de corriente en intervalos adyacentes de la distribución estadística de dicha corriente.

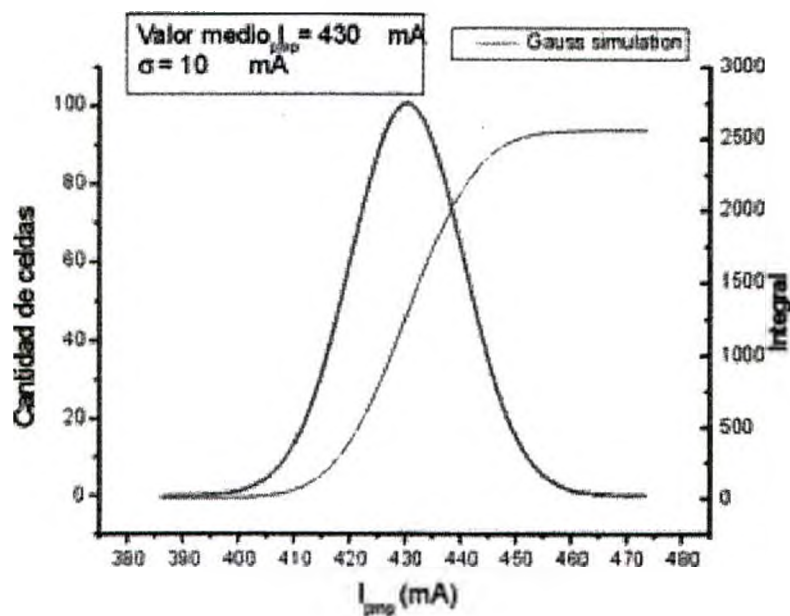


Figura 5.4. Distribución normal de corrientes de las celdas de triple juntura EMCORE. La integral de esta distribución permite obtener los intervalos de corriente correspondientes a cada cadena de 32 celdas.

Dado que la diferencia de corriente entre intervalos adyacentes de la distribución es mayor cuanto más cerca estén de las colas de dicha distribución, para la estimación de cota

superior de la diferencia de momento magnético se consideraron corrientes en el segundo y tercer conjunto de 32 celdas contando desde los valores inferiores de corriente. Se realizó el cálculo para tres casos: utilizando los valores inferiores de cada intervalo, celda 32 y celda 64; utilizando los valores medios de cada intervalo, celda 46 y celda 79 y utilizando el valor inferior del primer intervalo y el valor superior del segundo intervalo, celda 32 y celda 96.

El momento dipolar magnético en el caso más desfavorable es:

$$m = (0; -0,00002; -0,00011) \text{ A m}^2 \quad (5.11)$$

Dado que el panel está formado por 80 cadenas de 32 celdas en serie, se puede obtener una cota superior del momento dipolar magnético total del panel de la siguiente manera:

$$m_{\max} = 80 \times m_1 / 2 = (0; -0,0008; -0,0058) \text{ A m}^2 \quad (5.12)$$

Se puede realizar una estimación más realista sumando las diferencias de momento magnético entre cadenas adyacentes seleccionadas utilizando la distribución normal. El momento magnético total resultante es:

$$m_{\text{tot}} = (0; -0,0003; -0,0022) \text{ A m}^2 \quad (5.13)$$

Los requerimientos de la misión SAOCOM en cuanto al momento dipolar magnético no están aún definidos pero se ha tenido en cuenta como referencia el valor máximo requerido para el SAC-C. Los resultados obtenidos tanto para el $m_{\max}$ como para el m_{total} se encuentran muy por debajo de dicho valor.

5.2 CARACTERIZACIÓN DE COMPONENTES

Los componentes a ser utilizados para la fabricación de los paneles solares (celdas solares, vidrios de protección, diodos de paso y de bloqueo, etc.) deben ser caracterizados mediante técnicas apropiadas, a fin de verificar sus propiedades y poder así garantizar su correcto funcionamiento.

Para la integración de un módulo solar para uso satelital se requiere que sus componentes sean calificados, es decir sean aptos para soportar las condiciones adversas del ambiente espacial. A continuación, se describen brevemente los componentes utilizados para la fabricación del primer módulo para ensayos.

- 72 celdas solares avanzadas de triple juntura ATJ (“*Advance Triple Junction*”) fabricadas por Emcore Corp., con un espesor de 150µm, eficiencia de aproximadamente 25% y un área activa de 27,5 cm².
- 72 diodos de paso de silicio de forma triangular, Emcore Corp., y diodos de bloqueo.
- Interconectores (de 2 y 3 patas) de Kovar plateados, Emcore Corp., con lazo de alivio de tensiones fuera del plano.
- Conectores terminales posteriores de Ag, con lazo de alivio fuera del plano, para las subcadenas de 4 celdas en serie.
- Colectores (“*buses*”) de Ag con lazo de alivio para la interconexión de subcadenas entre sí y a los cables.
- Coberturas de vidrio OCLI-0214, del tipo borosilicato dopado con Cerio, con capa antirreflectante.
- Adhesivo Dow Corning 93500 para el pegado del vidrio.
- Adhesivo RTV 566 para el pegado de las celdas, los colectores y los cables al sustrato.
- Cables.
- Sustrato tipo panal de abeja de aluminio, con piel de fibra de carbono y recubrimiento aislante de Kapton en cara frontal.

Las técnicas de caracterización pueden ser no destructivas o destructivas, aplicándose según el caso por muestreo o sobre el total de los componentes.

En esta sección se presentan exclusivamente las técnicas aplicadas durante la ejecución de la presente Tesis.

5.2.1 Inspección visual de las celdas solares

La inspección visual a simple vista o mediante microscopio es un procedimiento muy importante en la recepción y caracterización de componentes para un panel solar para un satélite. En el caso particular de las celdas solares, su aplicación permite detectar roturas y

defectos superficiales así como reportar cualquier anomalía estética antes de realizar cualquier otro ensayo [3].

El microscopio que se emplea es un microscopio binocular o una lupa metalográfica con un aumento desde 5X hasta 10X. En particular, se inspecciona el “bus” colector y los contactos donde se realizará el soldado de interconectores, y por último, se buscan roturas u otras anomalías iluminando con luz rasante y a simple vista.

Una vez realizada la inspección visual de un conjunto de celdas, se confecciona un informe que contiene la información sobre los defectos detectados en cada celda (en cantidad y tipo: dedos metálicos despegados, fisuras o roturas) y una estadística general del conjunto, al cual se deben adjuntar las anotaciones realizadas para cada celda.

5.2.2 Análisis estructural de celdas solares multijuntura

Se observaron mediante el microscopio electrónico de barrido (*SEM*) los contactos frontal y posterior y la superficie frontal de una celda de doble juntura (*DJ*) $InGaP_2/GaAs/Ge$ de la empresa Spectrolab y de una celda de triple juntura (*TJ*) $GaInP_2/GaInAs_2/Ge$ de la empresa Emcore. Para ello se empleó el *SEM* del Departamento de Química del CAC.

Asimismo, se analizaron por microanálisis dispersivo de rayos X característicos, *EDAX*, ("*Emission Dispersive Analysis X Ray*"), las composiciones de las muestras mencionadas en el párrafo anterior.

Celda DJ GaInP₂/GaAs/Ge Spectrolab

En la Figura 5.5 se observa la imagen de uno de los dedos de la grilla de contactos frontal, mientras que en la Figura 5.6 se muestra el análisis de composición por *EDAX*. Cabe aclarar que el mismo análisis se realizó en las distintas zonas definidas por líneas paralelas en la dirección longitudinal del dedo que se advierten en la Figura 5.5, sin arrojar diferencia alguna en la composición.

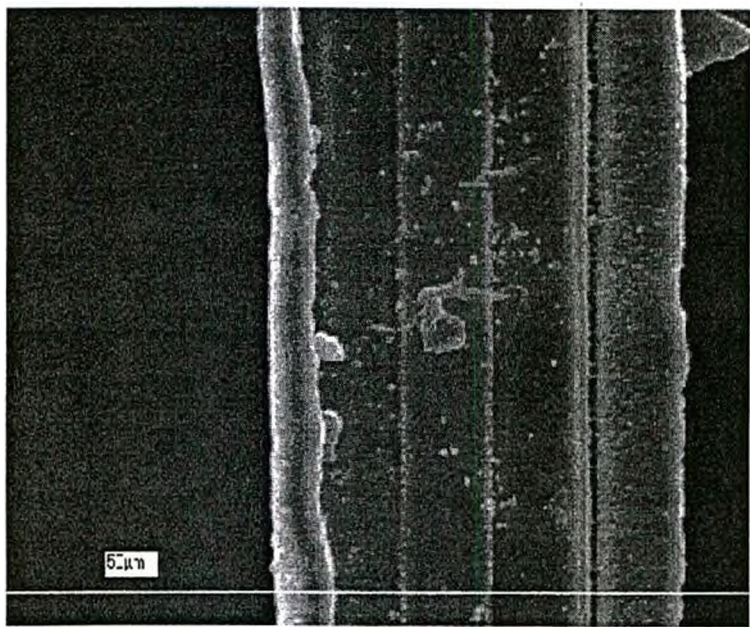


Figura 5.5. Imagen de un dedo de la grilla frontal de una celda DJ Spectrolab

Dentro del límite de detección del equipo, estimado en un 2% atómico, se observa la presencia de Ag, junto con la aparición de otros elementos que pertenecen a los semiconductores que conforman la celda, como As, Ga, Ge o P.

El ancho del dedo resulta ser de unos 25μm, y la conformación particular del mismo parece compatible con la deposición por serigrafía.

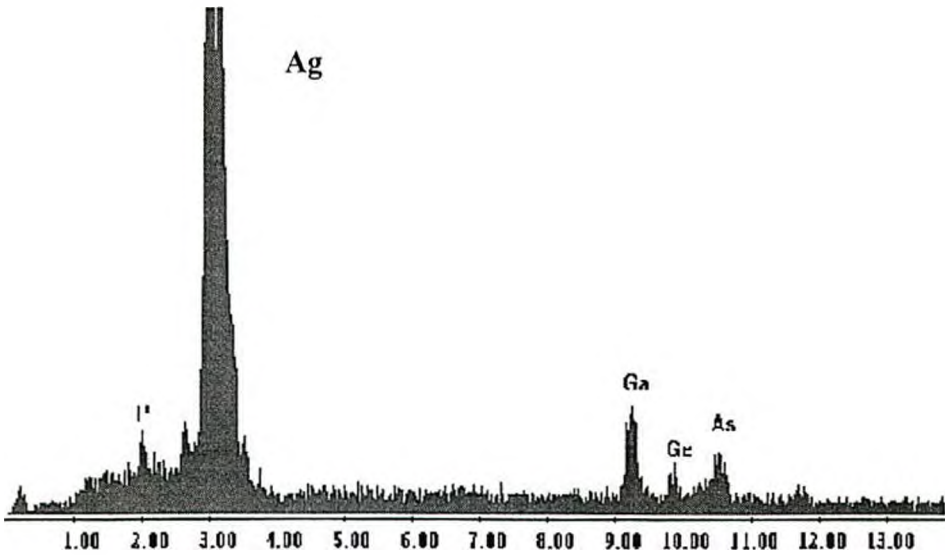


Figura 5.6. Análisis por EDAX de un dedo de la grilla frontal de una celda DJ Spectrolab.

En la Figura 5.7 se observa el análisis de la composición del contacto posterior de la celda, donde también se observa preponderantemente la presencia de Ag.

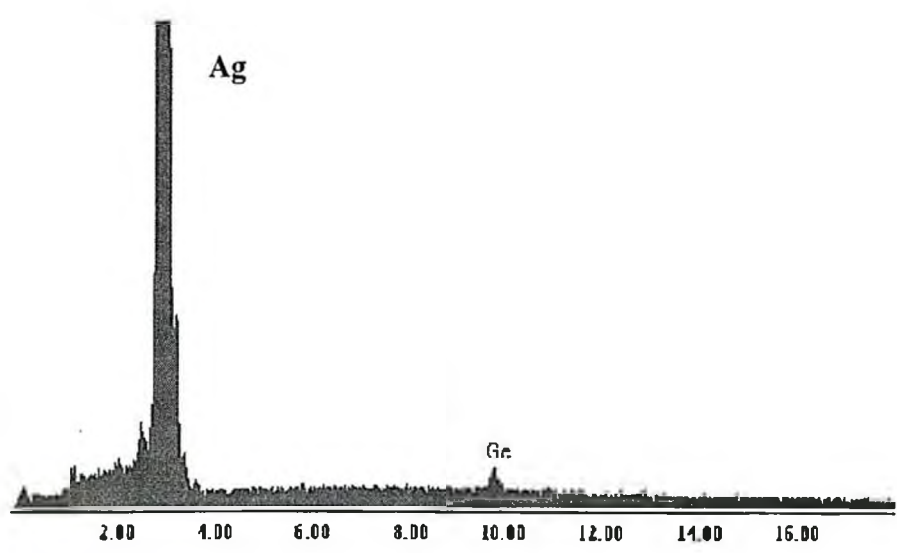


Figura 5.7. Espectro por EDAX del contacto posterior de una celda DJ Spectrolab.

Se realizaron análisis sobre la cara frontal de la celda, pero fuera de los dedos, y se observó la presencia de los elementos químicos constitutivos de los distintos semiconductores de cada subcelda: P, In, Ga, As, Ge, observándose además la presencia de Al y Ti, elementos compatibles con la existencia de una doble capa antirreflectante de $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ (Figura 5.8).

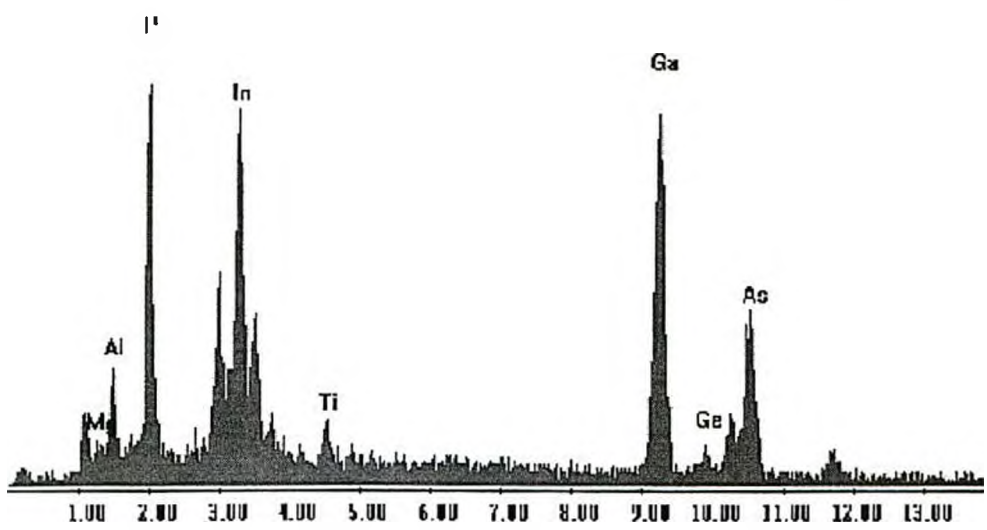


Figura 5.8. Análisis por EDAX de la cara frontal de una celda DJ Spectrolab.

Celda TJ GaInP₂/InGaAs/Ge Emcore

Para la celda TJ de Emcore se realizaron observaciones similares al caso anterior. En la Figura 5.9 se observa un dedo correspondiente a la grilla de contactos frontal. La morfología en este caso es distinta, presentando un ancho de 10 μm y una superficie superior completamente lisa. En los bordes se observa una estructura lateral saliente del dedo, con un contraste distinto respecto a la parte central. El análisis de la composición de ambas zonas mostró que son notablemente distintas: mientras que la parte central tiene un importante contenido de Au, además de Ag, la zona más exterior presenta básicamente Ag en su composición con un contenido bastante menor de Au respecto a la central (ver Figura 5.10 y Figura 5.11).

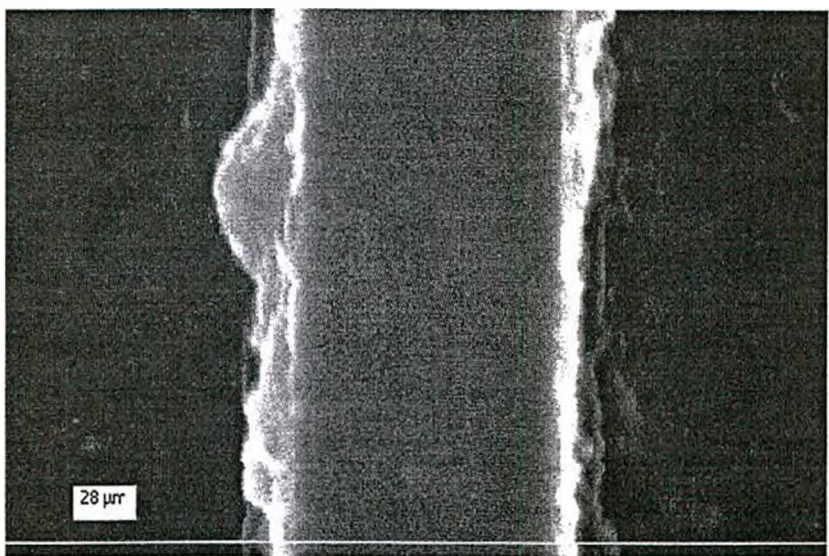


Figura 5.9. Imagen de un dedo de la grilla de contactos frontal de una celda TJ Emcore

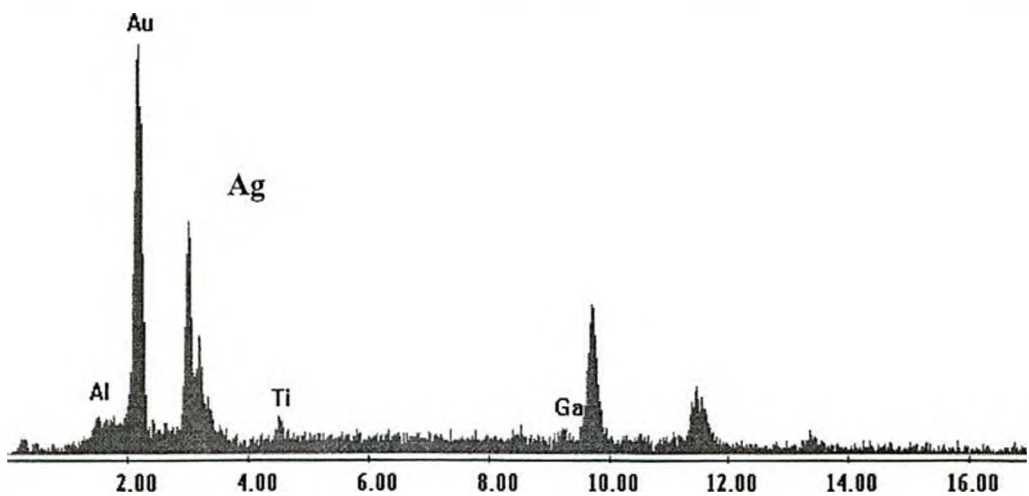


Figura 5.10. Análisis de la composición de la zona central del dedo.

En la Figura 5.12 se muestra una imagen tomada en ángulo de un dedo de la grilla, la cual permite estimar el espesor del dedo en alrededor de 8 μm .

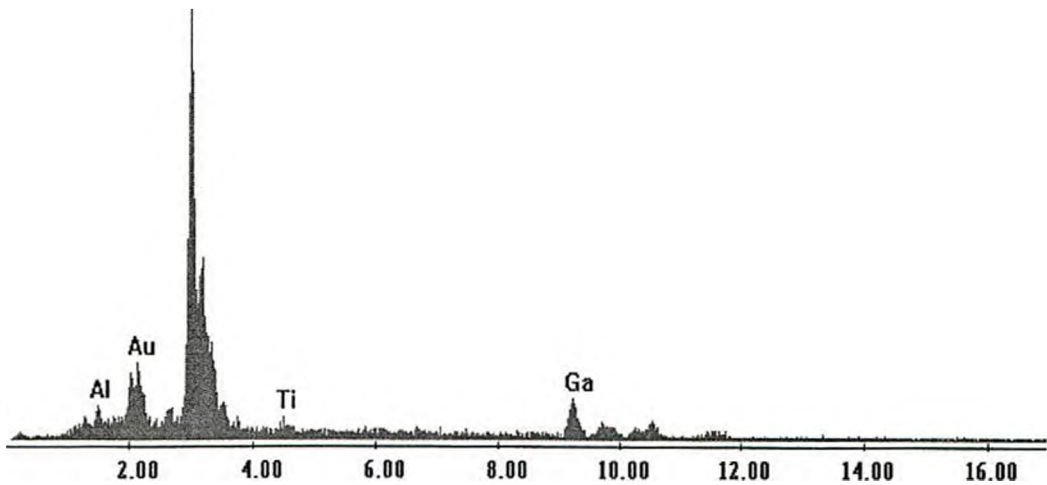


Figura 5.11. Análisis de la composición de la zona lateral del dedo.



Figura 5.12. Imagen de un dedo tomada en ángulo.

Finalmente, se realizó el análisis de la composición del contacto posterior de la celda TJ de Emcore, el cual puede ser observado en la Figura 5.13.

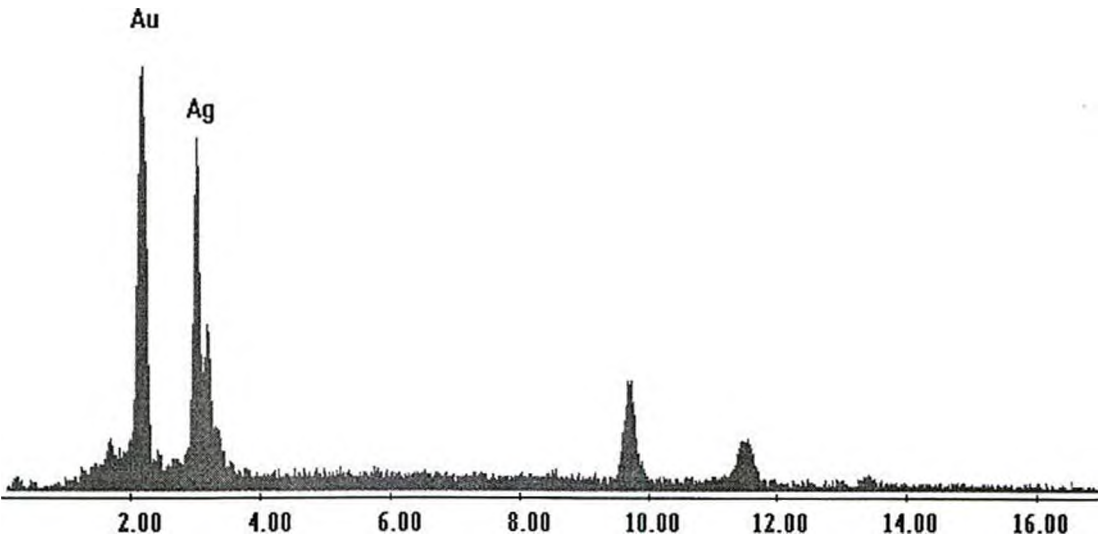


Figura 5.13. Análisis por EDAX del contacto posterior de una celda TJ de Emcore.

Tabla 5.1. Resultados del análisis de la composición para la determinación del espesor de la capa de Au. Dedo de la grilla frontal y contacto posterior

Muestra	Espesor de la capa de Au (μm)
Dedo – zona central	0,18
Contacto posterior	0,16

La composición en la zona lateral del dedo solo indicaría que dicho dedo está conformado por una capa de Ag y otra de Au sobre la misma, y que la aparición de Au se debería a la señal proveniente de la parte superior del dedo dado que el haz de electrones no es puntual.

Los datos de la relación de intensidades de los rayos X dispersados (*k-ratios*) fueron procesados con el programa GMRFilm (*General Motors Research*, desarrollado por R. Waldo) en el Laboratorio de Microanálisis del Departamento de Materiales del CAC que permite tener en cuenta la geometría estratificada que se presenta en este caso. Dicho programa considera la absorción de los rayos X que se produce en cada capa, de modo tal que sabiendo de antemano la composición (en este caso Au sobre Ag) es posible determinar los espesores (en este caso, el del Au dado que la Ag oficia de sustrato). Cabe aclarar que los datos obtenidos por EDAX no fueron referidos a estándares de los materiales analizados, y que

además las muestras estaban recubiertas por una delgada capa de Ag para su observación en el SEM; estas podrían ser fuentes de error en los valores determinados.

La presencia de una fina capa de Au y el espesor de los contactos confirman la información provista por el fabricante [4].

5.2.3 Medición de la curva I-V de celdas individuales

Una vez realizada la inspección visual de las celdas se mide la curva característica I-V de las mismas, sin diodo de paso, ni vidrio protector (celdas “desnudas”). El mismo procedimiento se realiza para la medición de las celdas CIC.

Proceso de elaboración de los conjuntos CIC

La elaboración del conjunto: celda – interconectores frontales – cobertura de vidrio, CIC, (“*Coverglasses Integrated Cell*”) consta básicamente de los siguientes pasos:

- Soldadura por resistencia de los interconectores de 2 y 3 patas sobre la cara frontal de la celda y el diodo.
- Pegado de la cobertura de vidrio a la cara frontal del conjunto celda-diodo-interconectores.
- Soldadura del interconector posterior del diodo a la cara posterior de la celda.
- Inspección visual del conjunto CIC.

Se repite la medición de la curva I-V en las mismas condiciones que para las celdas “no CIC” que a continuación se detallan.

Las condiciones normalizadas de medición de la curva característica I-V son: iluminación artificial con irradiancia 1367 W/m^2 y espectro AM0, y temperatura controlada en $(28 \pm 1)^\circ\text{C}$.

Para realizar estas mediciones se emplea el siguiente instrumental:

a) iluminación artificial provista por un simulador solar de estado estacionario de alta fidelidad (“close-match”) [5] adquirido a la firma inglesa TS – Space. El simulador cuenta con dos lámparas de Xenón y cuatro lámparas de tungsteno para reproducir la irradiancia y el espectro AM0 y el tamaño de área efectiva de trabajo es aproximadamente $22,5 \text{ cm}^2$ de

diámetro [6]:

- b) una base termostatzada [7] y puntas de prueba [8] (Figura 5.14),
- c) una celda de referencia [9] y un radiómetro [10],
- d) una carga electrónica [11].

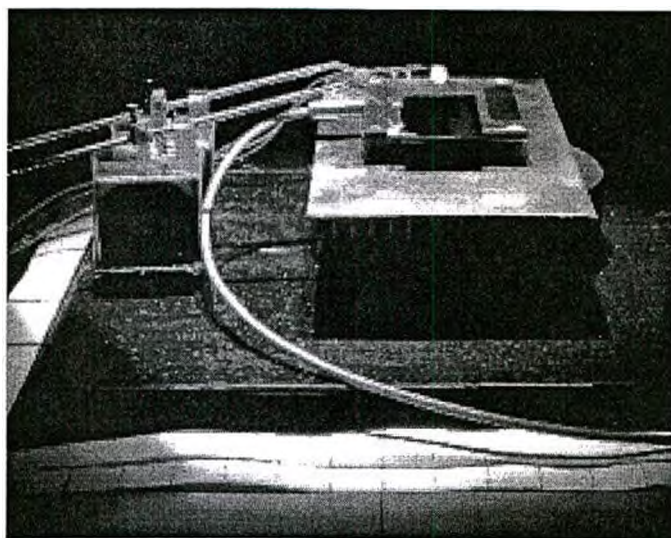


Figura 5.14. Base termostatzada y puntas de prueba para medición de la curva I-V en condiciones normalizadas con simulador solar.

La parte relevante de la curva I-V se encuentra en el cuarto cuadrante, habitualmente se grafica la curva, cambiando el signo de la corriente y se dibuja en el primer cuadrante. En la Figura 5.15 se presenta la curva I-V de una celda CIC.

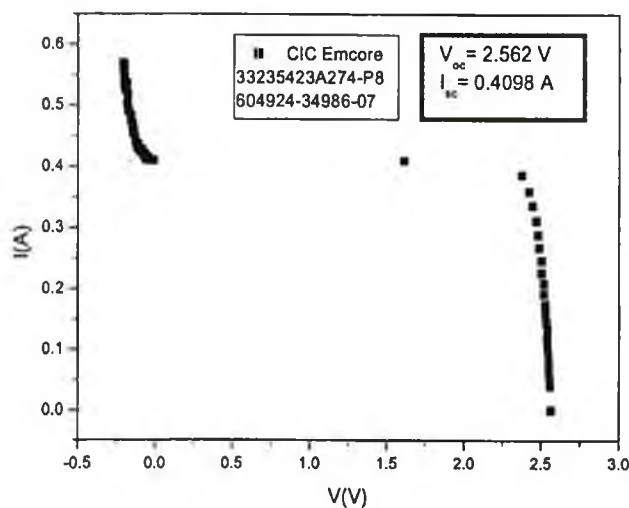


Figura 5.15. Curva característica corriente-tensión (I - V) de una celda solar CIC y de una celda “bare” de triple juntura $\text{InGaP}_2/\text{InGaAs}_2/\text{Ge}$.

Las celdas CIC son clasificadas siguiendo algún criterio (por ejemplo, ordenandas por la corriente en el punto de máxima potencia) [12], luego se seleccionan los conjuntos para el armado de subcadenas de 4 celdas y cadenas de 8 subcadenas cada una.

Se realiza la interconexión del conjunto seleccionado de celdas, posicionando de 4 celdas CIC con su cara posterior hacia arriba, y soldando de los interconectores de una celda a la cara posterior de la celda contigua. Las subcadenas quedan conformadas como se muestra en la Figura 5.16.

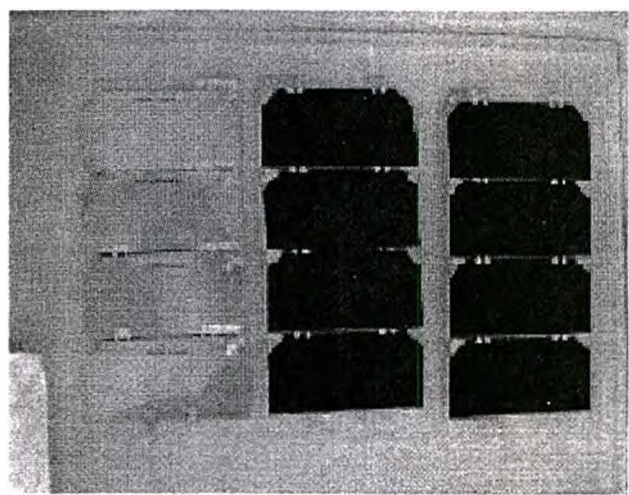


Figura 5.16. Tres subcadenas de 4 celdas ATJ interconectadas en serie. En la primera subcadena de la izquierda se puede observar la cara posterior de las mismas.

La medición de la curva I-V característica se lleva acabo siguiendo el mismo procedimiento que se detalló para las celdas CIC y no CIC.

En la Figura 5.17 se puede ver la subcadena de celdas en serie sobre un sustrato de panal de abeja con recubrimiento de fibra de carbono y Kapton. Se considera que la temperatura de operación coincide con la temperatura ambiente, para lo cual la subcadena se mantiene tapada hasta el momento de la adquisición de los datos.

En este caso no fue posible realizar la medición con temperatura controlada, dado que el sustrato actúa como aislante que no permite un buen contacto térmico con la base termostatzada.

La Figura 5.18 muestra, a modo de ejemplo, la curva I-V de una subcadena, cuyos parámetros característicos son: tensión a circuito abierto, $V_{ca} = 9,3 \text{ V}$ y corriente de cortocircuito, $I_{cc} = 419 \text{ mA}$. También se presenta la curva I-V de la misma subcadena sombreando parcialmente una de sus celdas para verificar el funcionamiento del diodo de paso una vez integrado a la celda. Los parámetros característicos de la subcadena en sombra parcial son: $V_{ca} = 8,7 \text{ V}$, $I_{cc} = 432 \text{ mA}$.

La medición de la curva I-V de las subcadenas es de suma utilidad, ya que permite verificar el correcto funcionamiento de las mismas y comparar sus características eléctricas con la obtenida por simulación a partir de las curvas I-V medidas de las cuatro celdas que la conforman.

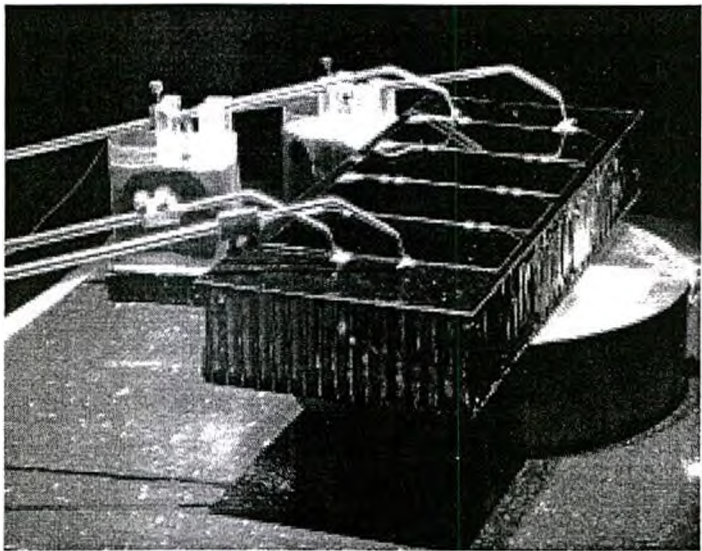


Figura 5.17. Subcadena de 4 celdas solares ATJ para la medición de la curva I-V en el simulador solar.

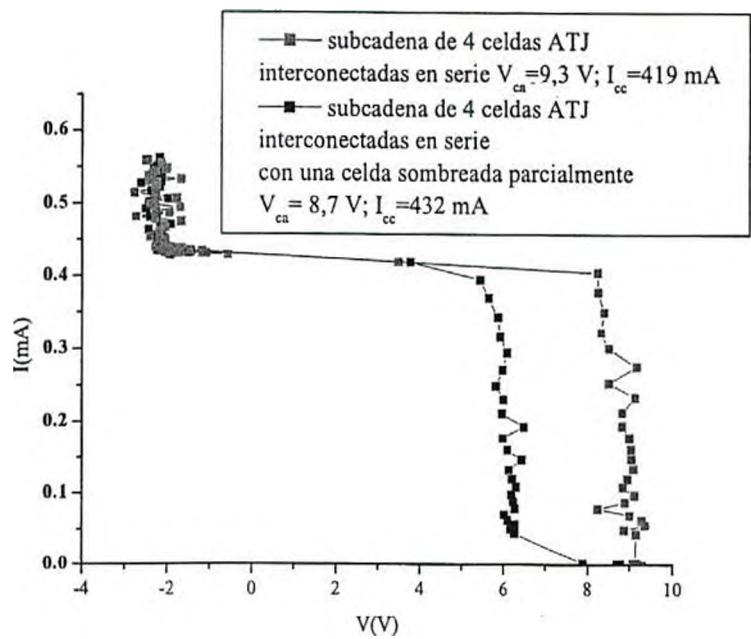


Figura 5.18. Curva característica (I - V) de una subcadena de celdas solares de triple junta interconectadas en serie (curva roja).

5.2.4 Caracterización óptica de los vidrios de protección

Los vidrios que se emplean para aplicaciones espaciales presentan determinadas características que los distinguen de cualquier otro tipo de vidrio.

El vidrio de protección (OCLI-0214) de celdas solares para uso espacial es un borosilicato dopado con Cerio para evitar el oscurecimiento provocado por el bombardeo de partículas en el entorno espacial. Además, el espesor del vidrio ronda los 100 μm y posee una capa antirreflectante de MgF_2 .

En el momento de la recepción de los mismos se realiza una medición de la transmitancia para verificar los datos provistos por el fabricante [13].

El equipo que se utiliza para medir es un espectrofotómetro que permite realizar mediciones de transmitancia, reflectancia y absorbancia y además posee una esfera integradora que posibilita la medición de la reflexión global. El intervalo de longitudes de onda en el cual trabaja este equipo es desde 200 nm hasta 1200 nm. En la Figura 5.19 se observa la curva de transmitancia en función de longitud de onda (λ) para un vidrio adquirido

a la firma estadounidense OCLI.

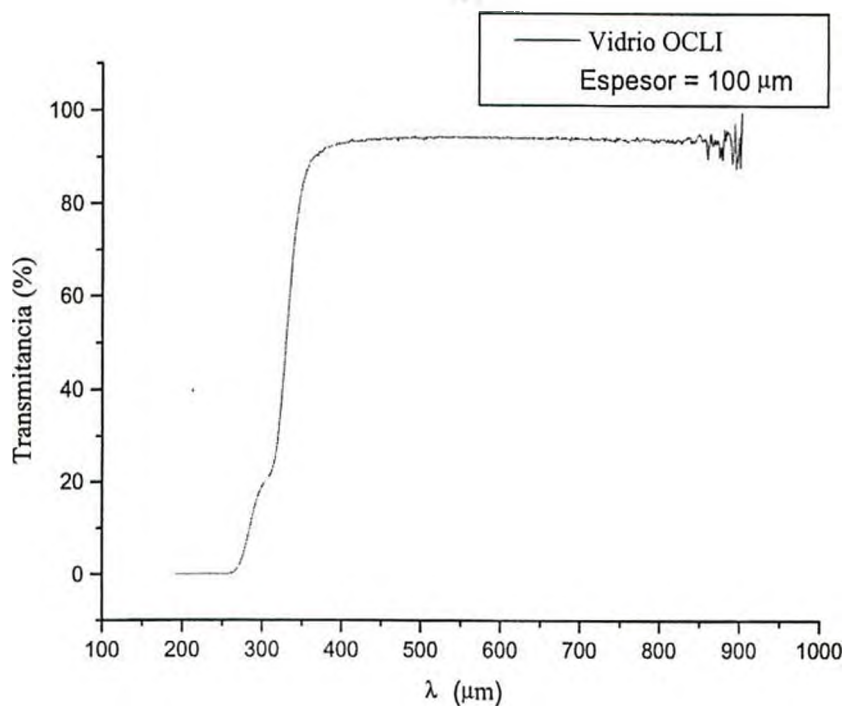


Figura 5.19. Curva de transmitancia de un vidrio de protección.

Cabe aclarar que los vidrios de protección que se emplearán para el armado del panel de vuelo fueron adquiridos a la empresa Thales (ex-Pilkington).

5.2.5 Caracterización eléctrica de los diodos de paso

El diodo de protección o de paso que se integra a cada una de las celdas solares es básicamente un diodo n-p de *Si*. La función del diodo es permitir el paso de la corriente eléctrica a través de él si la celda solar falla por rotura o entra en sombra, evitando dejar inutilizada toda la cadena a la que pertenece la celda.

Los diodos de protección de las celdas se midieron en polarización directa y en inversa con el objeto de detectar alguna posible falla eléctrica antes de su interconexión con la celda y para verificar que no exista pérdida de corriente que perjudique el funcionamiento del panel solar.

Se midió la curva I-V en polarización directa de un conjunto de diodos mediante la carga electrónica (Figura 5.20). Asimismo, se definió un criterio de aceptación de los diodos consistente en la medición de dos puntos de trabajo uno en polarización directa y otro en inversa:

- Polarización directa, para $I = 750 \text{ mA}$ la caída de tensión en el diodo debe encontrarse por encima de $0,7 \text{ V}$ y no superar $2,3 \text{ V}$.
- Polarización inversa, para $V = 2,5 \text{ V}$, la corriente no debe superar los $100 \text{ }\mu\text{A}$.

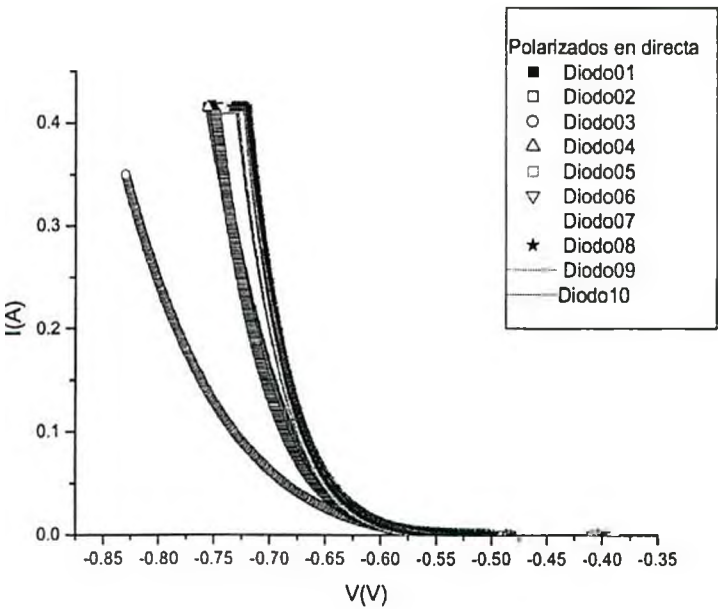


Figura 5.20. Curvas I-V de los diodos de paso que se integran a cada celda ATJ.

Estas mediciones se realizan sobre todos los diodos utilizando una fuente de alimentación en lugar de la carga electrónica.

5.2.6 Estimación de la capacidad de juntura de una celda multijuntura

La capacidad eléctrica de un panel solar es un parámetro de importancia para el diseño y construcción de su sistema de regulación, ya que estos generalmente son de conmutación en serie o paralelo.

Los reguladores paralelo conmutan, idealmente, entre el punto de operación del panel (o serie de celdas), determinado por el circuito de carga ($V = V_{mp}$), y el cortocircuito ($V = 0$),

es decir que cortocircuitan un conjunto de celdas en serie de manera que la potencia entregada a la carga sea nula.

Las celdas de *GaAs* tienen una capacidad relativamente más alta que las celdas de *Si* usadas hasta el momento y, al interconectar menos celdas en serie, aumenta la capacidad por sección de panel.

Para estimar la capacidad de juntura en una celda solar de homojuntura (de *c-Si*, por ejemplo), se considera un circuito equivalente sencillo compuesto por una fuente de corriente, en paralelo con un diodo y resistencias en serie y en paralelo, como se presentó en el Capítulo 3.

En el caso particular de celdas multijunturas formadas por dos o más subceldas conectadas en serie a través de un diodo túnel, no es sencillo encontrar un circuito equivalente que describa esta estructura. El método utilizado para la evaluación de la capacidad equivalente de las celdas de triple juntura es el de conmutación rápida entre dos estados de carga y la observación de la respuesta transitoria de la celda.

La capacidad en una celda solar depende de su polarización, pero como normalmente estas operan cerca de su punto de máxima potencia y los reguladores más utilizados son los reguladores paralelo, estas dos consideraciones definen condiciones de polarización ($V = 0$ y $V = V_{mp}$) que son de interés para la evaluación de la capacidad.

El estudio de la capacidad equivalente se restringe entonces, a la transición entre el punto de cortocircuito (0V) y un punto de trabajo por arriba o por debajo del punto de máxima potencia, que es donde finalmente trabaja el panel y, en consecuencia, el regulador.

En general, en celdas solares, la corriente de cortocircuito (I_{CC}) y la corriente en el punto de máxima potencia (I_{mp}) difieren en un 10%. Además, en la conmutación entre I_{CC} (0V) e I_{mp} (V_{mp}), la corriente instantánea permanece dentro del 95% de I_{CC} durante el 90% del tiempo de transición entre 0V y el V_{mp} . Es así que la capacidad equivalente de una celda MJ se puede acotar por la ecuación (5.13).

$$C_{EQ|@V} = \frac{I_{CC} (t_2 - t_1)}{(V_2 - V_1)} \quad (5.13)$$

donde I_{CC} es la corriente de cortocircuito de la celda a medir, t_2 y t_1 , los tiempos en los que se midieron las tensiones V_2 y V_1 , respectivamente.

La celda a medir se coloca en el simulador de la empresa inglesa *TS-Space*, sobre una base termostatzada que la mantiene entre 25 y 26°C se mide la curva I-V y, se determina la corriente de cortocircuito. Posteriormente, se conecta la celda un circuito electrónico de conmutación, de alta velocidad, y se mide con un osciloscopio de ancho de banda adecuado las transiciones de tensión de la celda.

Para la celda de triple juntura *InGaP₂/InGaAs₂/Ge*, la $I_{CC} = 458 \text{ mA}$. A partir de la ecuación (5.13), y utilizando los valores de V y t dados en la (Tabla 5.2), se estimaron las siguientes capacidades:

$$C_{EQ}|_{@2,28V} = 941 \text{ nF}$$

$$C_{EQ}|_{@2,1V} = 867 \text{ nF}$$

Estos valores se encuentran en buen acuerdo con los encontrados en la bibliografía [14].

Tabla 5.2. Pares de tensión y tiempos para el cálculo de la C_{EQ}

$V \text{ (V)}$	$T \text{ (}\mu\text{s)}$	$V \text{ (V)}$	$t \text{ (}\mu\text{s)}$
2,280	3,475	2,100	2,840
0,458	-0,269	0,458	-0,269

5.3 CARACTERIZACIÓN Y ENSAYO DE MÓDULO DE INGENIERÍA

Los procedimientos de elaboración del panel solar deben ser calificados mediante la realización de un conjunto de ensayos específicos sobre el panel terminado.

Se han realizado los ensayos de calificación de un panel de ingeniería, integrado en el Grupo Energía Solar de la CNEA, y las correspondientes comprobaciones de funcionamiento eléctrico e inspección visual luego de cada uno de los mismos. El panel solar no debe sufrir ningún daño o degradación de sus características generales después de haber sido realizados los ensayos de vibraciones (distintos niveles de aceleración y vibración) y de ciclado térmico

en vacío, definidos teniendo en cuenta las características del lanzador y de la órbita del satélite.

El panel de ingeniería para ensayos está constituido por dos cadenas de 32 celdas solares de triple juntura cada una. A su vez, cada cadena está formada por 8 subcadenas de 4 celdas en serie cada una. Las dos cadenas de 32 celdas son independientes entre sí, ya que las mismas no se encuentran interconectadas. La Figura 5.21 muestra el panel de ingeniería terminado.

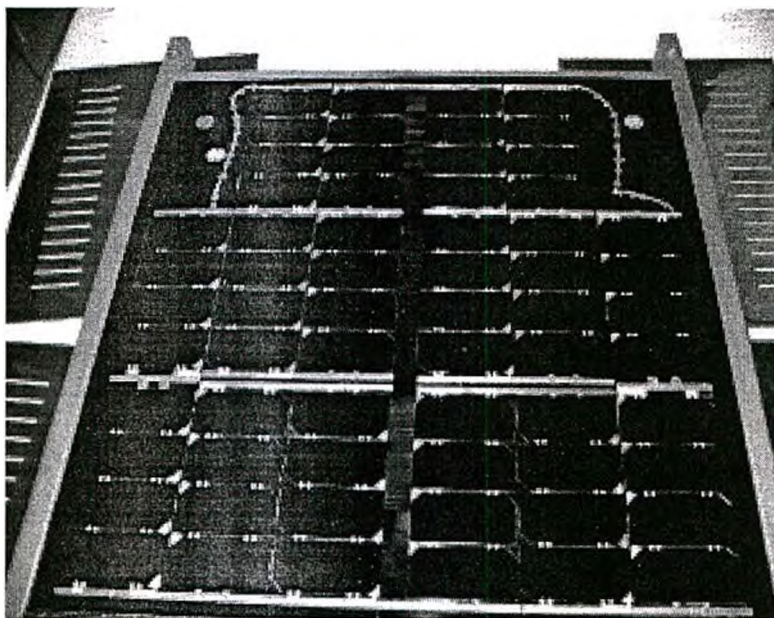


Figura 5.21. Módulo de ingeniería para ensayos terminado.

5.3.1 Caracterización eléctrica – Medición de la curva I-V

El procedimiento de medición de la curva característica I-V de las cadenas de celdas que conforman el panel de ingeniería requiere el siguiente equipamiento:

- a) una fuente de luz pulsada (lámpara de “flash” fotográfico);
- b) un filtro neutro de 49% de transmitancia;
- c) un osciloscopio digital con base de tiempo disparada, doble trazo, con memoria;
- d) un par de puntas de osciloscopio de 1X o 10X;
- e) una carga electrónica [11];
- f) un dispositivo para sombreado parcial;

g) un multímetro de fondo de escala mayor a 100V;

La distancia entre la fuente pulsada y el panel debe ser tal que se reproduzca la corriente de cortocircuito de una celda ATJ usada como sensor de nivel de irradiancia.

En la configuración de tres terminales, se conecta una cadena del panel a la carga electrónica y el osciloscopio con base de tiempo disparada.

Se miden mediante el osciloscopio y con el panel a temperatura ambiente ($T = 22,5^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$) los pares corriente-tensión (I-V) para 10 valores de la carga electrónica (variados manualmente) entre un valor cercano a V_{ca} ($I = 0$) y un valor muy próximo a I_{cc} ($V = 0$) para cada una cadena de 32 celdas. Se muestran en la Figura 5.22 las mediciones realizadas.

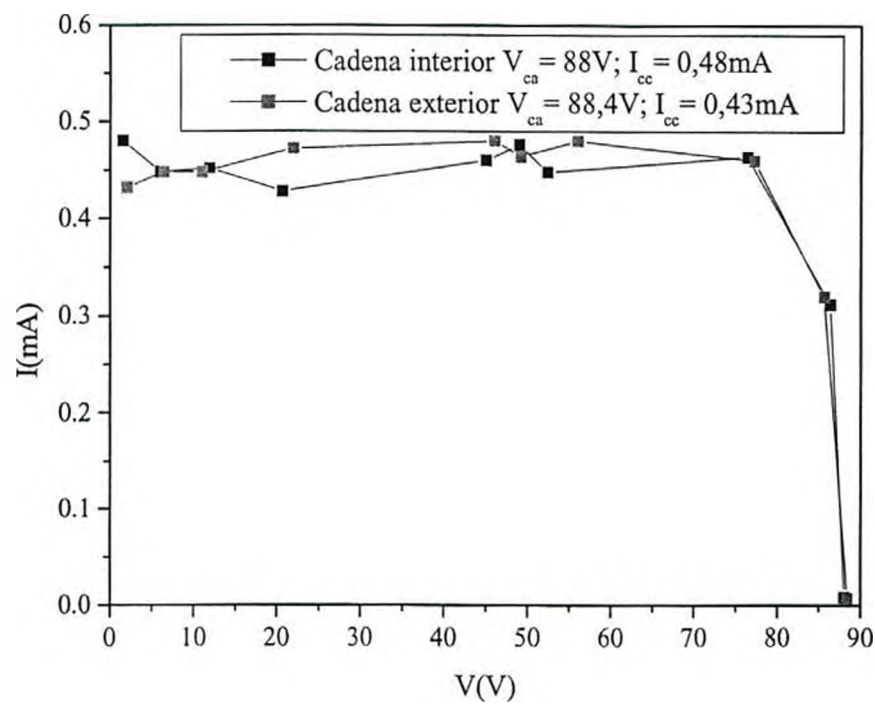


Figura 5.22. Curva característica I-V de cada cadena del panel de ingeniería.

5.3.2 Ensayos de vibraciones

El ensayo de vibraciones consiste en emular las exigencias que tendría que enfrentar el panel en el momento del lanzamiento. Para ello se montó el panel en un equipo de vibraciones

y se colocaron acelerómetros sobre el sustrato para registrar las distintas etapas del ensayo (Figura 5.23).



Figura 5.23. Montaje del panel en la base vibratoria para el ensayo de vibración.

Se determinaron las frecuencias naturales del panel y se realizaron ensayos de vibraciones senoidales en el eje Z y se imprimió al panel una aceleración 25 veces la aceleración gravitatoria terrestre ($\bar{g}$). Además, se realizaron ensayos con aceleración de 50 $\bar{g}$, de 74 $\bar{g}$ y de 100 $\bar{g}$ en el eje Z [15].

En otra etapa del ensayo de vibraciones se realizó un barrido aleatorio en frecuencias fuera de las frecuencias naturales, en donde el espectro aleatorio especificado representa las condiciones de vibración a las que estaría sometido un panel durante el lanzamiento, las cuales dependen del lanzador. En este caso se utilizó el nivel de calificación con el espectro vibracional del lanzador Cyclone-4. Finalmente, se realizó un ensayo de baja amplitud (o carga) en el eje Z [15].

Después de cada ensayo se verificó el funcionamiento del panel midiendo la tensión a circuito abierto de cada subcadena empleando un multímetro.

5.3.3 Ensayo de termovació

El ensayo de termovació se realiza en cámara de acero a una presión de vacío de aproximadamente 1×10^{-7} torr. El fondo de la cámara de termovacio está formado por una estructura de dos placas: una placa base inferior que lleva soldada la cañería del N_2 líquido y los calentadores, y otra superior, sujeta mecánicamente la primera sobre la que va montado el objeto a ensayar.

Las resistencias calefactoras permiten que la placa superior alcance temperaturas de poco más de 100°C con rampas de temperaturas regulables manualmente. De la misma manera, la serpentina permite enfriar el sistema hasta -100°C .

Para registrar las temperaturas durante el ensayo se instalan sensores de temperatura (termocuplas o termorresistores). Estos sensores se colocan a ambos lados del módulo de ingeniería para poder determinar la temperatura del panel durante el ensayo.

La ubicación de los mismos se define en función del análisis de un modelo térmico. Brevemente, consiste en colocarlos en posiciones tal que se pueda tener el gradiente de temperatura en los distintos ejes. Se colocaron 5 termocuplas, una termorresistencia de $2,4 \text{ k}\Omega$ (PT 2000) y 8 separadores (“*stand-off*”) sobre el sustrato como se muestra en el esquema de la Figura 5.24 [16].

Se montó el panel sobre la placa superior y el contacto térmico se realizó con RTV 566 (Figura 5.25). El RTV es un adhesivo siliconado de color rojo brillante que se utiliza también para pegar las subcadenas de celdas al sustrato y para adherir los cables de conexión en la cara frontal y posterior del sustrato.

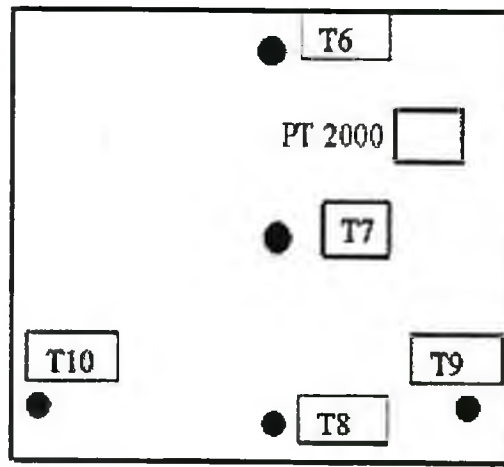


Figura 5.24. Posición de las termocuplas T6 a T12 y la termorresistencia PT 2000 sobre el módulo.

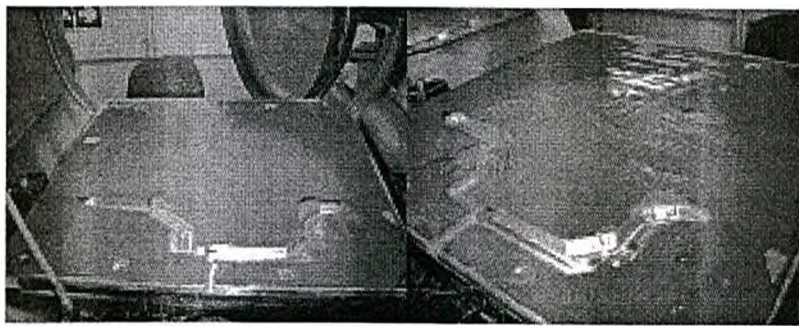


Figura 5.25. Placa base con RTV. Se puede observar la huellas del pobre contacto térmico.

Los parámetros que se establecieron para el ensayo fueron los siguientes [17]:

- Las diferencias de temperatura entre las termocuplas deben ser menor a 7°C ; con una temperatura promedio $\langle T_i \rangle = (95 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ al final de la rampa caliente y una temperatura promedio $\langle T_i \rangle = (-100 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ al final de la rampa fría.
- Se debe establecer una meseta de estabilización de 5 minutos en cada temperatura extrema.
- La presión en la cámara al comienzo del ensayo debe ser del orden de 1×10^{-7} torr

La Figura 5.26 muestra el panel dentro de la cámara de ensayos térmicos.



Figura 5.26. Apertura de la cámara de termovació después del primer ciclo térmico.

Se realizaron 10 ciclos térmicos entre -100°C y 100°C , a una presión media de 1×10^{-5} torr, en forma ininterrumpida.

Una vez concluido el ensayo de termovació, se realizó una inspección visual a simple vista y con lupa 2X, y la correspondiente verificación eléctrica mediante la medición con luz pulsada de las dos cadenas [18].

5.3.4 Conclusiones

Se logró un avance significativo en la puesta a punto de los procesos de fabricación y caracterización de paneles solares para usos satelitales. Utilizando las técnicas desarrolladas, se elaboró el primer módulo de ingeniería para calificación de componentes y procesos. Este módulo fue sometido a ensayos de vibraciones (hasta aceleraciones de 100 g) y de ciclado térmico en vacío en laboratorios de INVAP S.E., en la ciudad de S.C. de Bariloche.

La inspección visual y la medición de las características eléctricas realizadas antes y después de los ensayos no mostraron diferencias relevantes, pudiéndose considerar entonces la experiencia como una calificación preliminar de los componentes y procedimientos de fabricación desarrollados.

Referencias Capítulo 5

- 1 Alenia DIFESA Officine Galileo Space Business Unit. *Solar Array Electrical Design - SAC-C SOLAR ARRAY*, Document SD0582. El contenido de este documento es propiedad de Finmeccanica S.p.A.. Documento reservado.
- 2 C.G. Bolzi, C.J. Bruno, P. Cabot, E. Carella, J.C. Durán, J. Fernández Vázquez, C.D. Franciulli, E.M. Godfrin, V. Goldbeck, M.G. Martínez Bogado, A. Moglioni, J. Plá, S.E. Rodríguez, M.J.L. Tamasi, M. Alurralde, F. Antonuccio, A. Filevich, A. Iglesias, E. Mezzabolta, S.L. Nigro. *Desarrollo, fabricación y ensayo de paneles solares para misiones satelitales argentinas – primer módulo para ensayos*, Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente 7, pág. 04.7 (2003).
- 3 CAC-PSE-CELSI-0080A-IN. *Inspección visual y medición de las características eléctricas- CAC-PSE-CELSI-0080A-IN* (2003)
- 4 N.S. Fatemi, P.R. Sharps, M.A. Stan, D.J. Aiken, B. Clevenger, H.Q. Hou. *Radiation hard high-efficiency multi-junction solar cells for commercial space applications*, Proceedings of the 17th European PVSEC, Munich, Alemania, pág. 2155 (2001).
- 5 CAC-PSE-CELSI-0090A-IN. *Mediciones de Curva I- V de Celdas Solares* (2003)
- 6 Manual de Simulador solar TS – Space (Doc. suministrado por TS - Space)
- 7 Manual de uso Base termostatzada BP-01 (Doc. Grupo Energía Solar)
- 8 Manual de uso Accionamiento de sistema de vacío y puntas de prueba (Doc. Grupo Energía Solar)
- 9 Documento de calibración de Celda/s de referencia XXX (Doc. suministrado por Emcore)
- 10 Manual de uso Radiómetro (Doc. Grupo Energía Solar)
- 11 Manual de uso Carga electrónica (Doc. interno Grupo Energía Solar)
- 12 G. Berbeglia, D. Fernández Slezak, E.M. Godfrin, J.C. Durán. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 7, pág. 08.31 (2003).
- 13 OCLI. A JDS Uniphase Company. *Solar Cells Covers - Radiation-Resistant, Improved Transmittance Glass*,

- 14 P.Rueda and E. Fernández Lisbona. *Multi-junction GaAs solar cell capacitance and its impact upon solar array regulators*, Proc. Sixth European Space Power Conference, Porto, Portugal (ESA SP-502 May 2002).
- 15 INVAP S.E. 0804-PEDD-WDEMD-106-A
- 16 Procedimiento de INVAP, GPES-3501-OPEMD-001-A.
- 17 SOG-AVC-PR-00100-A *Procedimiento de Ensayo de Calificación Térmica de Panel Solar Prototipo*, CONAE-Documento reservado (2003).
- 18 CAC-PSE-PANEL-0030A-PR. *Módulo de Ingeniería para Ensayos*, CNEA- Documento reservado (2003).

Capítulo 6

SENSORES DE RADIACIÓN Y CELDAS SOLARES DE REFERENCIA

Los radiómetros que utilizan como elemento sensor una celda fotovoltaica se hallan muy difundidos para la medición de radiación solar debido a su bajo costo comparado con el de los piranómetros basados en termopilas. El principal inconveniente es que su respuesta espectral es limitada y no plana. Además, presentan un apartamiento considerable en la respuesta angular con respecto a la dependencia con el coseno del ángulo de incidencia. Como consecuencia de ello, los radiómetros fotovoltaicos pueden diferir en más de un 10%, dependiendo de la altura del Sol y las condiciones meteorológicas, de los basados en termopilas.

Teniendo en cuenta la necesidad de disponer en el país de sensores de radiación solar confiables [1] y de bajo costo [2], en el Grupo Energía Solar de la CNEA [3] se iniciaron actividades tendientes a diseñar y construir en el país este tipo de sensores, aprovechando la experiencia adquirida en el desarrollo de celdas solares de silicio cristalino.

En este Capítulo se presenta el diseño, la elaboración y la calibración de los primeros prototipos de sensores desarrollados. Se describen el procedimiento de fabricación utilizado, los procesos de optimización ensayados y la calibración realizada. La optimización de los dispositivos estuvo orientada a mejorar la salida eléctrica de los mismos, reduciendo la resistencia serie y mejorando la repetitividad en la elaboración. Asimismo, se presenta la calibración de celdas solares de referencia para la medición de irradiancia y de respuesta espectral.

6.1. MEDICIÓN DE RADIACIÓN SOLAR- GENERALIDADES

Los instrumentos para medir radiación solar convierten la energía incidente en otra

forma de energía, la cual se puede medir en forma más conveniente. Dependiendo del principio en el cual están basados se los clasifica en térmicos, termoelectrónicos, fotoeléctricos, etc.. Además, se clasifican de acuerdo al tipo de radiación solar que miden en pirheliómetros y los piranómetros.

La función de los pirheliómetros es medir la radiación directa del Sol sobre la superficie perpendicular a los rayos solares. En este tipo de instrumento, el receptor debe estar protegido de la radiación difusa proveniente del cielo, estando en general está ubicado al final del tubo del instrumento [4].

Los pirheliómetros se asemejan entre sí, en general, por poseer una cavidad ennegrecida destinada a la recepción de la radiación directa incidente (unida por una resistencia térmica a un sumidero de calor), generalmente de forma cónica, la que mejora notablemente la absorbancia con respecto a una superficie plana. Buena parte de ellos es consecuencia de equipos construidos para ser utilizados en vuelos espaciales, debiendo ser luego adaptados a las condiciones de uso a nivel del suelo. Los errores asociados con las determinaciones de la radiación directa efectuadas con estos equipos son del orden del 0,2%. En la Figura 6.1, se muestra el pirheliómetro autocalibrable TMI Mk VI (Kendall, 1969).



Figura 6.1. Pirheliómetro TMI (Kendall).

Los piranómetros se usan para determinar la radiación solar directa más la difusa, es decir la radiación global, sobre un plano horizontal.

En estos instrumentos el factor de calibración puede presentar variaciones durante el

día y con el ciclo del año: variaciones con el coeficiente de temperatura, corrimiento del “cero”, influencias como cambios térmicos, de viento, etc. [4].

El piranómetro *PSP* (*Precision Spectral Pyranometer*) (Figura 6.2) [5], diseñado originalmente por H. Kimball y H. Hobb, posee una termopila típicamente de cobre plateado y constantán con sus junturas calientes pintadas con laca negra de uso óptico, protegida por dos hemisferios de vidrio pulido de precisión. Además, se encuentra compensado por temperatura para evitar errores por el corrimiento de la referencia fría motivado por la temperatura ambiente.

Estos instrumentos deben ser calibrados como mínimo una vez al año y con una frecuencia mayor si existieran razones que hicieran sospechar que su constante se ha modificado [4].

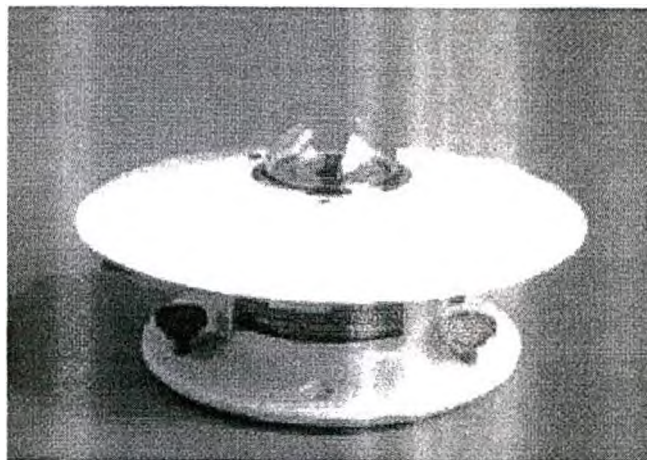


Figura 6.2. Piranómetro Eppley PSP [5].

La calibración de los piranómetros contra un pirheliómetro utilizado como patrón se realiza por el método de tapado-destapado que permite comparar la radiación directa medida por el piranómetro con la determinada por el pirheliómetro de referencia. El citado método consiste en medir la tensión que corresponde a la irradiancia global (V) con el piranómetro destapado y luego determinar la correspondiente a la difusa (V_d) con el piranómetro tapado con un círculo opaco ubicado a una distancia tal que obstruya un ángulo sólido similar al que observa el pirheliómetro; la diferencia entre esos dos valores permite determinar por diferencia la radiación directa recibida sobre el plano de operación que, en general, es horizontal [5].

$$I_d = V_d / k \quad e \quad I = V_g / k \quad \Rightarrow \quad k = (V_g - V_d) / (I_d - I) \cos \theta_z \quad (6.1)$$

Proyectando sobre este plano la componente directa normal ($I_{dn} = (I_d - I)$) medida simultáneamente por el pirheliómetro patrón y comparando, se obtiene la constante de calibración k :

$$k = (V_g - V_d) / I_{dn} \cos \theta_z \quad (6.2)$$

donde θ_z es el ángulo comprendido entre la vertical del lugar y la dirección de incidencia de la radiación directa (ángulo zenital), que depende de la hora de la determinación. Repitiendo esta operación un cierto número de veces se determina un valor promedio de la constante.

Periódicamente estos pirheliómetros deben ser intercomparados, lo cual se lleva a cabo en los Centros Regionales de Radiación (CRR) y en el Centro Mundial de Radiación (*World Radiation Center, WRC*) ubicado en Davos, Suiza, en donde se encuentra un conjunto de al menos cuatro pirheliómetros de referencia de diferentes diseños que integran un Grupo Mundial Estándar (*World Standard Group, WSG*) [7].

El GES de la CNEA dispone de un piranómetro *PSP* (N° de serie 10566F4). Su calibración se realizó en la Red Solarimétrica dependiente del Servicio Meteorológico Nacional contra el pirheliómetro patrón primario *TMI* (marca Kendall). La misma se llevó a cabo el día 14 de agosto de 2002, al mediodía y las condiciones meteorológicas fueron: cielo limpio con viento.

Los resultados obtenidos para el piranómetro Eppley *PSP* fueron:

- Constante de calibración $k = 5,8991 \times 10^{-6} \text{ V/Wm}^{-2}$
- Desviación estándar = 0,9%

El error de la calibración del patrón secundario se calcula a partir de la suma del error del piranómetro calibrado (0,9%) más el error del patrón primario *TMI* que es de 0,3%. La estabilidad o variación temporal de la constante aceptada oscila dentro del 1,5% por año, razón por la cual, le permite ser utilizado como patrón secundario.

6.2. RADIÓMETROS FOTOVOLTAICOS

Como ya fue mencionado, los radiómetros fotovoltaicos (FV) poseen como elemento sensible una celda de silicio, en general de tipo monocristalino, que al recibir un flujo radiante genera una diferencia de potencial sobre una resistencia de carga. Su respuesta eléctrica no es plana sino selectiva, dependiendo de la longitud de onda de la radiación, lo cual limita su uso a la determinación de valores diarios de la radiación global una vez que se ha comparado estadísticamente su comportamiento con el de un piranómetro termoelectrico y determinado su constante media [6].

El apartamiento de la respuesta angular de un sensor FV con respecto a la ley del coseno puede solucionarse usando un elemento difusor como cobertura, lo que asemeja su comportamiento en este aspecto al de los piranómetros termoelectricos. Otro de los inconvenientes que presentan estos piranómetros es la dependencia de la respuesta eléctrica del semiconductor con la temperatura, pero este problema se soluciona mediante la utilización de un circuito eléctrico compensador (esencialmente, un termistor).

De todos modos, su bajo costo, su salida eléctrica elevada (un orden de magnitud superior a la de los termoelectricos) y su respuesta casi instantánea los hace particularmente útiles para integrar una red de bajo costo [7], como piranómetros secundarios para interpolar estaciones termoelectricas o para la detección de pequeñas fluctuaciones rápidas.

Los errores determinados en las integrales diarias son del orden del 6% [8], pero su comportamiento a través del tiempo no ha sido suficientemente estudiado ni se ha establecido todavía ninguna dependencia del error con la época del año, el estado del cielo o algún otro parámetro.

6.2.1 Diseño y armado de los sensores

El área activa del dispositivo diseñado es de 13 mm^2 y de forma circular (4mm de diámetro). Con el fin de definir dicha área de manera precisa y repetitiva, se confeccionaron máscaras sobre película fotográfica para el proceso de fotolitografía. En un principio el diseño de la máscara fue el que se observa en la Figura 6.1.

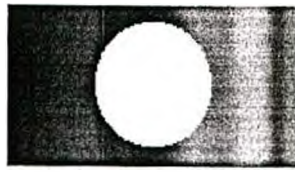


Figura 6.3. Esquema de la máscara utilizada para un sensor (escala 4:1)

De cada oblea de silicio de 5 cm x 10 cm se pueden obtener 48 sensores de este tipo. Con esta máscara y utilizando las técnicas descriptas en el Capítulo 4 se fabricaron los primeros sensores de radiación que fueron utilizados en distintos dispositivos tales como radiómetros y detectores de actitud en satélites. En particular, dos radiómetros fotovoltaicos fueron calibrados por personal del Servicio Meteorológico Nacional [2].

Se elaboraron 200 sensores aproximadamente con obleas difundidas en distintos procesos de difusión. En una primera selección, se descartaron algunos por cuestiones estéticas o por defectos en los contactos eléctricos. Al resto de las muestras se les midió la curva I-V y se las clasificó según su corriente de cortocircuito.

Después de haber seleccionado el elemento sensor se conecta una resistencia para poder medir un punto de trabajo cercano a la corriente de cortocircuito de la celda. En el caso de estos radiómetros, para poder tener una tensión de salida de alrededor de 10mV, la resistencia utilizada fue de alrededor de 2Ω .

La base de los radiómetros es un cilindro de aluminio, sobre el cual se adhiere el elemento sensor protegido por una cubierta de vidrio esmerilado sellado con adhesivo. La cubierta de vidrio tiene dos finalidades, por un lado proteger al sensor fotovoltaico y por el otro, mejorar la respuesta angular debido al esmerilado superficial del mismo.

Para la cubierta se utilizó un vidrio de 2 mm de espesor con la cara exterior arenada. El pegado de la celda sobre la base de aluminio y el pegado y sellado de la cubierta de vidrio se realizó con adhesivo *Wacker Multipurpose* transparente [9].

A fin de realizar una caracterización del material de la cubierta de los sensores se midió la transmitancia del vidrio utilizado, con y sin adhesivo (Figura 6.4). Se observa que la presencia del adhesivo no modifica sustancialmente la característica espectral de la luz transmitida.

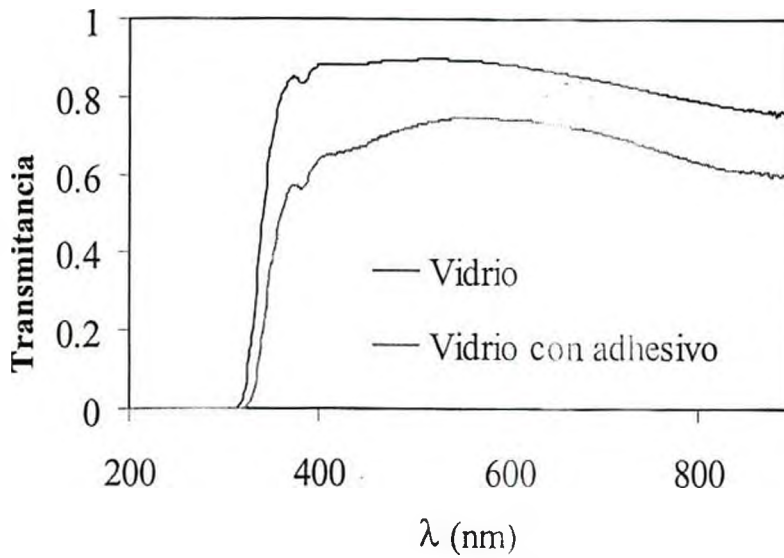


Figura 6.4. Transmitancia del vidrio y del vidrio con adhesivo.

Los sensores fotovoltaicos se caracterizaron eléctricamente midiendo la curva corriente-tensión (I-V) como se observa en la Figura 6.5.

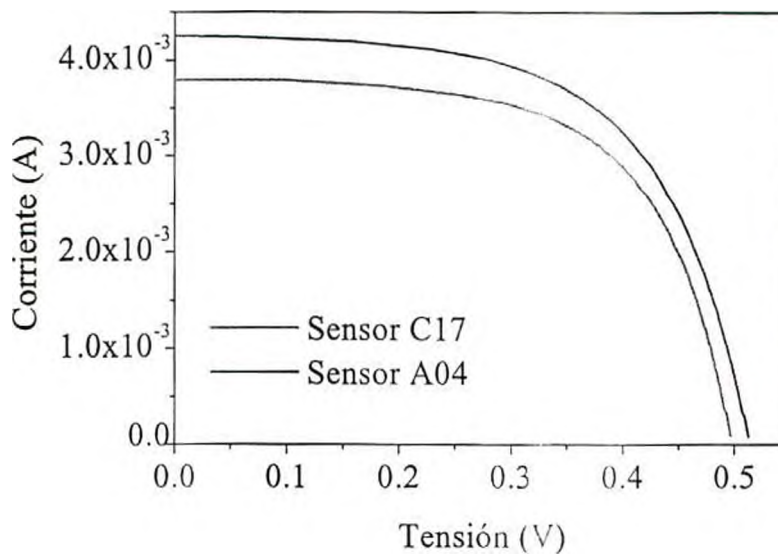


Figura 6.5. Curvas I-V de las celdas que fueron utilizadas como sensores para los radiómetros

A fin de optimizar la colección de portadores reduciendo a su vez la resistencia serie del dispositivo, se confeccionó una nueva máscara con una grilla metálica en forma de cruz en

el centro del área activa (Figura 6.6 y 6.7). La Figura 6.8 muestra las características eléctricas de un sensor con este nuevo diseño en comparación con un sensor del tipo de la Figura 6.3.



Figura 6.6. Esquema de la máscara utilizada con el nuevo diseño (escala 4:1).

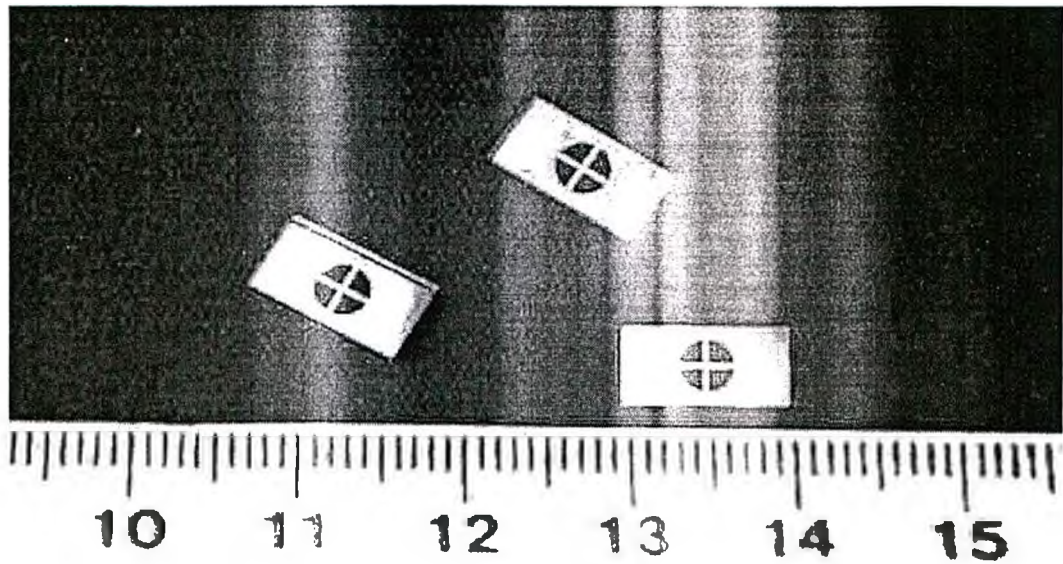


Figura 6.7. Fotografía de los sensores fotovoltaicos.

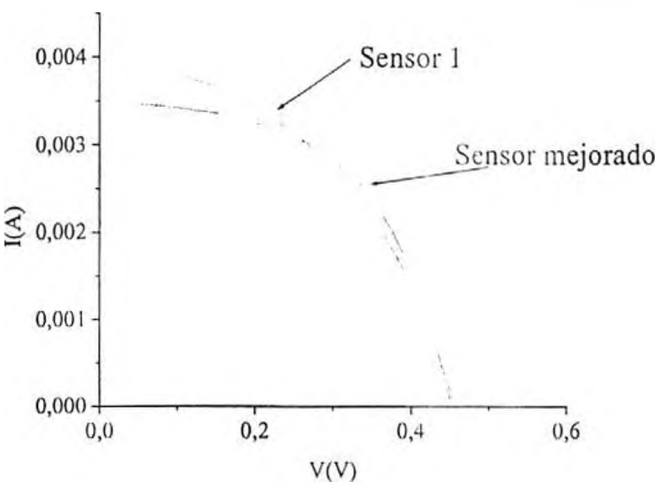


Figura 6.8. Curvas corriente-tensión de los dos tipos de sensores desarrollados en el Grupo Energía Solar.

6.2.2 Calibración de sensores de radiación

El procedimiento para la calibración de sensores de radiación consiste en tomar en campo simultáneamente lecturas instantáneas del piranómetro termoeléctrico utilizado como patrón secundario (marca *EPPLEY* modelo *PSP* No. 18070F3) y del sensor fotovoltaico (utilizándose un divisor de tensión a fin de adecuar la respuesta al intervalo del detector), integrándoselas en base horaria y grabándoselas en una memoria de estado sólido, el que se retira para llevar la información a fin de ser procesada.

Las mediciones se realizan en un período de tiempo de unas semanas hasta algunos meses, midiendo al mismo tiempo la radiación global media diaria en ese período y determinando, además, sus valores máximo y mínimo.

Para obtener la constante media de calibración del sensor, a fin de ser utilizada para determinar las sumas diarias de radiación global, se calculan las integrales diarias registradas por el sensor y se las correlaciona linealmente, obteniéndose del ajuste la pendiente y el coeficiente de correlación. Dicha pendiente dará la constante de calibración mientras que la desviación estándar, permite estimar el error de cada medición.

La calibración de los radiómetros fotovoltaicos fue realizada por personal de la Red Solarimétrica con un piranómetro marca Eppley, modelo *PSP*, N° de serie 10566 F4 mediante un procedimiento de intercomparación.

La calibración de los radiómetros A4 y C17 fue realizada desde el 30 de mayo al 25 de junio de 2002 y en la Tabla 6.1 se adjuntan los datos de ambas calibraciones mostrándose los gráficos correspondientes en las Figura 6.9 y 6.10.

Tabla 6.1. Resultados de la regresión lineal radiómetro A4 y C17

Constante =	A4	C17
	$13,6 * 10^{-6} \text{ V / W * m}^{-2}$	$15,0 * 10^{-6} \text{ V / W * m}^{-2}$
R =	0,997	0,994
Δr =	0,028	0,035
$\Delta m / m$ =	0,015	0,022

donde *r* es el coeficiente de correlación, Δr es el error del coeficiente de correlación y $\Delta m / m$ es el error relativo.

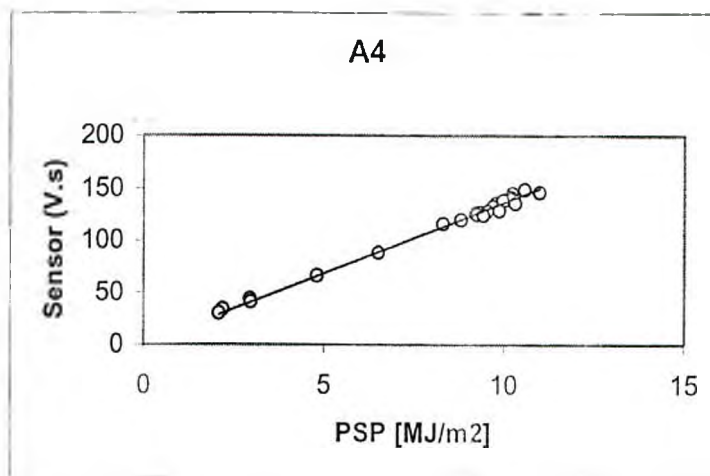


Figura 6.9. Curva de calibración del radiómetro fotovoltaico A4

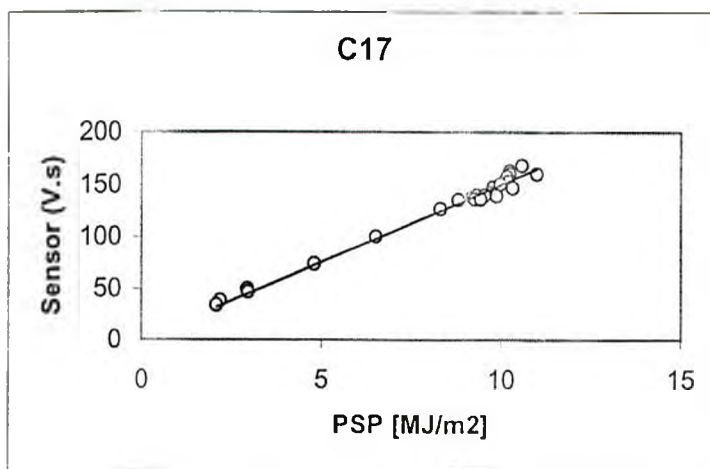


Figura 6.10. Curva de calibración del radiómetro fotovoltaico C17

Los errores que se muestran son los estadísticos, a los que hay que sumarles el error de calibración del patrón secundario, el error de su posible corrimiento anual y el error del patrón absoluto contra el que se calibró el patrón secundario, lo cual equivale a un error porcentual total del 2%, aproximadamente [5].

Se analizó el comportamiento de la respuesta horaria para diferentes intervalos de altura solar para ver qué efectos tendría sobre las mediciones el uso del sensor en muestreo horario a lo largo del año, con diferentes aeromasas pero sin diferenciar por calidad de cielo, es decir, por índice de claridad o transmitancia. La respuesta hallada no muestra una dependencia definida con la altura solar, manteniendo un valor prácticamente constante [2].

6.3. CELDA SOLAR DE REFERENCIA PARA LA MEDICIÓN DE LA RESPUESTA ESPECTRAL E IRRADIANCIA

Para realizar la medición de las características eléctricas corriente-tensión y de la respuesta espectral de celdas solares en condiciones normalizadas, se requieren sensores calibrados o celdas de referencia calibradas.

Una celda de referencia calibrada es un dispositivo que debe estar fabricado con la misma tecnología de la celda bajo ensayo, con el fin de asegurar la misma respuesta espectral.

Se fabricaron y seleccionaron a partir de sus características I-V dos celdas solares que fueron enviadas al INTA-Spasolab (España) para su calibración mediante la medición de la respuesta espectral a AM0. Para proteger las celdas, se adhirió un vidrio tipo borosilicato de 100 μm como cubierta frontal y se soldaron cuatro contactos de plata (Ag). Se construyeron los soportes mecánicos de estas celdas para posibilitar el cableado y la termalización de las mismas durante la medición (Figura 6.11).

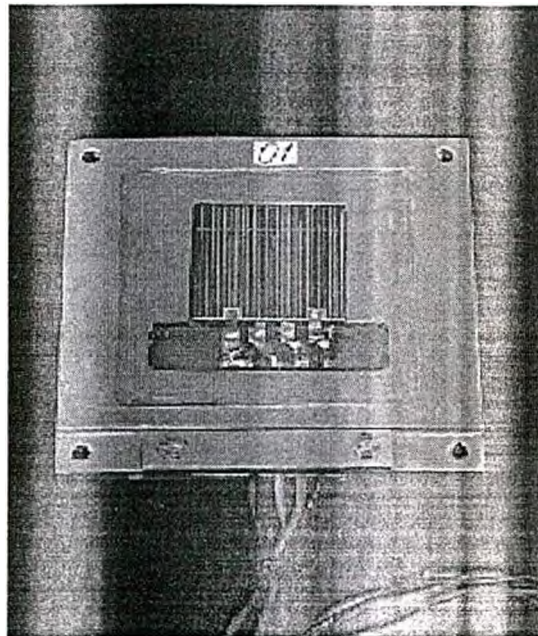


Figura 6.11. Celda solar con vidrio protector y pegada con adhesivo a la base.

Se elaboraron celdas de similares características a las enviadas para su calibración, disponiéndolas también en soportes mecánicos.

La respuesta espectral de las celdas de referencia medidas en España, en adelante

llamada *esp1* y *esp2*, fue normalizada a la respectiva corriente de cortocircuito: $I_{cc1} = 186,1$ mA y $I_{cc2} = 213,0$ mA, de acuerdo a la medición realizada en Spasolab con un simulador solar a AM0.

Se transfirió la curva de calibración de estas celdas (*esp1* y *esp2*) a otras dos celdas de $6,25 \text{ cm}^2$ de área activa y a tres celdas de dimensiones $2,5 \text{ cm} \times 2,5 \text{ cm}$, sin soporte mecánico y ni posibilidad de sensado de la temperatura para ser utilizadas como celdas de referencia calibradas.

Los resultados de la transferencia de calibración de la celda *esp1* a la celda *ref01* se muestran en la Figura 6.12.

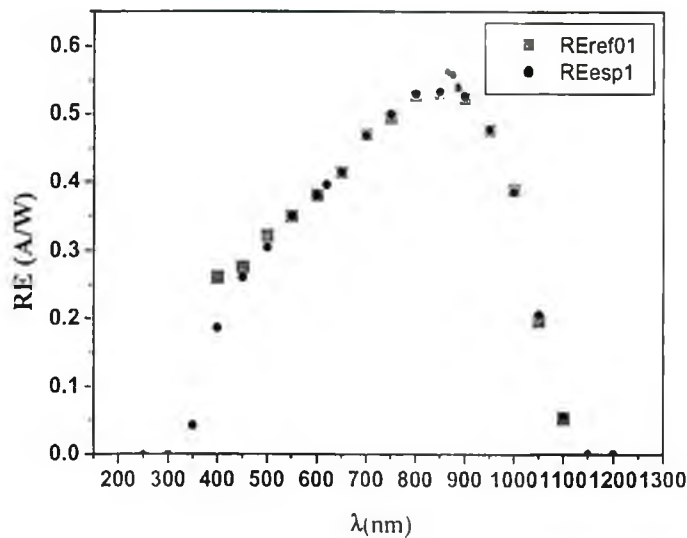


Figura 6.12. Respuesta espectral absoluta de la celda *esp1* (calibrada en España) y la respuesta espectral de la celda de referencia (patrón secundario, *ref01*)

Se midió al Sol la corriente de cortocircuito de la celda *esp1* para compararla con el resultado obtenido previamente con el simulador solar. Luego se renormalizó la respuesta espectral de la celda de referencia, *ref01*, de manera tal que su integral, pesada con el espectro AM1.5, diera la corriente de cortocircuito medida [10].

Tanto para uso terrestres como espaciales es necesario contar con celdas de referencia calibradas en irradiancia. En el caso de celdas solares para aplicaciones espaciales existen diferentes alternativas para realizar este tipo de calibración: extraterrestres y en Tierra [11].

Las alternativas para la calibración extraterrestre de celdas solares son:

- 1) Vuelo de gran altitud en globo
- 2) Vuelo en aeronave de gran altitud

Entre los métodos llevados a cabo en tierra o también llamados *métodos de calibración estándar sintética a AM0* se pueden mencionar:

- Medición con radiación solar global
- Medición con radiación directa
- Medición con simulador solar

En estos métodos la medición debe ser corregida a fin de ajustar el espectro utilizado al espectro AMO.

A continuación se describe el *método de calibración con simulador solar*, el cual es comparativamente menos costoso si se posee el equipamiento apropiado [11].

En este método el valor de calibración se calcula a partir de las siguientes mediciones:

- a) Respuesta espectral relativa de la celda solar.
- b) Corriente de cortocircuito bajo iluminación solar simulada.
- c) Irradiancia espectral del simulador solar.
- d) Irradiancia espectral solar extraterrestre AM0 de referencia.

El método de calibración de una celda de referencia a AM0 consiste en la medición de la corriente de cortocircuito I_{cc} de la celda en el simulador solar con una irradiancia similar a la radiación solar extraterrestre de referencia AM0 y se corrige la I_{cc} medida contra la radiación solar extraterrestre de referencia AM0 usando un espectralradiómetro, éste está calibrado con una lámpara estándar [11].

El valor de calibración de la I_{cc} bajo una irradiancia de 1367 W m^{-2} de la radiación extraterrestre AM0 se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$I_{cc \text{ cal}} = I_{ccm} \times \frac{\int \Phi_s(\lambda) \cdot Q(\lambda) d\lambda}{\int \Phi_m(\lambda) \cdot Q(\lambda) d\lambda} \quad (6.3)$$

- $I_{cc\ cal}$: corriente de cortocircuito calibrada,
- $I_{cc\ m}$: corriente de cortocircuito medida en el simulador solar con una irradiancia de 1367W m^{-2} ,
- $Q(\lambda)$: respuesta espectral relativa de la celda solar,
- $\Phi_s(\lambda)$: irradiancia espectral medida del simulador solar y,
- $\Phi_m(\lambda)$: irradiancia espectral del AM0 extraterrestre (1367W m^{-2}).

Procedimiento de ensayo

El ensayo de calibración de las celdas elaboradas en el GES-CNEA se realizó en el INTA Spasolab (SPAce SOlar cell testing LABoratory) de Madrid, España.

El nivel de irradiancia del simulador solar se ajustó en el plano de ensayo, utilizando el valor de la corriente de cortocircuito a AM0, del patrón **ECB-262**. Las características de la celda patrón son: sensor de Si, área = $(4 \times 2)\text{ cm}^2$, I_{cc} (AM0) = 299 mA a 25 °C. Bajo estas condiciones, se midió en el plano de ensayo la irradiancia espectral del simulador solar con un espectralradiómetro (modelo 6600 OSA).

Se midió la respuesta espectral relativa de las celdas de ensayo y del patrón AM0, con el equipo de respuesta espectral “*Miniflaser*”, utilizando la respuesta espectral calibrada del patrón **8724-PTB-81**, sensor de Si, cuya área es de $(5 \times 5)\text{ cm}^2$, como detector de intensidad de luz monocromática.

A partir de las respuestas espectrales relativas de las celdas de ensayo y de la celda patrón ECB-262, el espectro AM0 provisto por la Organización Meteorológica Mundial, WMO (*World Meteorological Organization*), y la curva de irradiancia espectral del simulador solar, se calculó el error de desajuste espectral para cada una de las celdas bajo ensayo.

El valor de la corriente de cortocircuito AM0, para cada una de las celdas bajo ensayo, se obtuvo corrigiendo los valores de corriente de cortocircuito, medido bajo condiciones de laboratorio, teniendo en cuenta el valor hallado de desajuste espectral, para cada una de las celdas bajo ensayo.

En la Tabla 6.2 se observan los resultados obtenidos de las celdas medidas en España.

Tabla 6.2. Resultados de la celdas medidas en Spasolab-España

Celda	I_{ccm} (mA)	ϵ (%)	I_{cc} (AM0)(mA)
1	212,5	-0,25	213,0
2	186	-0,26	186,5

Donde I_{ccm} es la corriente de cortocircuito medida utilizando como patrón la **ECB-262**; ϵ (%) es el error de desajuste espectral e I_{cc} (AM0) es la corriente de cortocircuito AM0 equivalente.

6.4. CONCLUSIONES

Las celdas solares de silicio cristalino modificadas para su uso como sensores de radiación resultan ser una alternativa de bajo costo para algunas aplicaciones, en particular, para las mediciones solarimétricas.

A partir de los resultados de la calibración de los radiómetros fotovoltaicos (radiómetro C17 y radiómetro A4) fabricados en el Grupo Energía Solar de la CNEA se observa que la lectura proveniente de los mismos presenta buena correlación con la radiación solar incidente. La evaluación de los primeros prototipos y los métodos de construcción utilizados han sido apropiados, garantizando la confiabilidad de los radiómetros. Esto se observó gracias a las pruebas realizadas en campo bajo diferentes condiciones climáticas y por períodos prolongados.

Dado que el espectro de la radiación solar varía en función de las características de la atmósfera, no resulta apropiado medir la intensidad de la radiación solar con un radiómetro de tipo termopila para determinar la eficiencia de conversión de una celda o panel FV.

Referencias del Capítulo 6

- 1 J.C. Durán, C.G. Bolzi, E.M. Godfrin, J.C. Plá, L.M. Merino, C.J. Bruno y M.J.L. Tamasi. *Fabricación de solarímetros de bajo costo en la Argentina. Algunas propuestas teóricas y primeras experiencias*. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente 2 (2), pág. 05.9-05.12 (1998).
- 2 H. Grossi Gallegos, G. Renzini y O. Dursi. *Actas del IX Congreso Latinoamericano e Ibérico de Meteorología (CLIMET IX) y VII Congreso Argentino de Meteorología CONGREMET VIII*, (2001).
- 3 C.G. Bolzi, L.M. Merino, M.J.L. Tamasi, J.C. Plá, J.C. Durán, C.J. Bruno, E.M. Godfrin, A. Lamagna, M.P. Barrera y L.B. Quintero. *Elaboración y caracterización de celdas y paneles solares de silicio cristalino para su ensayo en el satélite SAC-A*, Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente 1, Nro. 2, 1(1997).
- 4 *Solar radiation*, ed. N. Robinson, Solar Physics Laboratory, Technion-Israel Institute Technology. Elsevier Publishing Company (1966).
- 5 H. Grossi Gallegos. *Medición de la radiación solar en la superficie de la Tierra: instrumental y errores asociados*, Universidad Nacional de Luján / Servicio Meteorológico Nacional Argentina, III JORNADAS IBEROAMERICANAS SOBRE ENERGÍAS RENOVABLES. SOLARIMETRÍA, Santa Cruz de la Sierra - Bolivia, (2001).
- 6 R. Lopardo, M. García y G. Atienza. *Comportamiento de un detector fotovoltaico en distintas condiciones*, Actas de la 15ª. Reunión de Trabajo de la ASADES, vol. I, pp. 5-11, La Plata, Argentina (1979).
- 7 W. Klein. *Rapporteur's Report from Solar Resource Session*, Proceedings of the ISES Congress, Hall, D. and Morton, J. (Eds.), vol. 3, pp. 2311-2312, Pergamon Press, Brighton, Inglaterra (1981).
- 8 H. Grossi Gallegos, R. Lopardo and G. Atienza. *Solar radiation network*, Proceedings of the ISES Congress, Hall, D. and Morton, J. (Eds.), vol. 3, pp. 2456-2460, Pergamon Press, Brighton, Inglaterra (1981).
- 9 Wacker-Chemie GmbH. Silicone Division, Alemania.

10 M.A.Green, *Silicon solar cells-Advanced Principles & Practice*, ed. Centre for Photovoltaic Devices and Systems, University of New South Wales, Australia (1995).

11 S. Matsuda, D.J. Flood, T.J. Gómez, Y. Yiqiang. *Second International Round Robin Plan for Space Solar Cells*, 2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion, Viena, Austria (1998).

CONCLUSIONES GENERALES

Los trabajos desarrollados durante esta Tesis constituyeron los primeros pasos del desarrollo de dispositivos solares para uso espacial, tanto en lo que se refiere al diseño y elaboración de celdas solares de silicio cuanto a la caracterización de componentes de un módulo fotovoltaico para una misión satelital.

En lo referente a la fabricación de celdas solares de silicio cristalino, el control del proceso de difusión es de vital importancia para obtener las características eléctricas y electrónicas apropiadas. La difusión de Al para la formación del emisor posterior parece ser la etapa más importante al procesar las obleas, en relación con el aumento de la vida media de los portadores minoritarios de la base. En particular, el “*gettering*” por la codifusión de Al y P es más eficaz que la difusión exclusiva de P, como lo indican los mayores valores de τ obtenidos en el primer caso. Los estudios realizados en relación con la influencia del espesor de Al evaporado sobre el proceso de captura de impurezas no dieron resultados concluyentes.

Las celdas solares de *c-Si* elaboradas se utilizaron para realizar ensayos y desarrollar procedimientos dentro del proyecto “Paneles Solares para Uso Espacial”, permitiendo en particular poner a punto técnicas como soldado de interconectores, pegado de vidrios, estudios de daño por radiación y elaboración de sensores de radiación. Además, un conjunto de dichas celdas se emplearon en la fabricación del primer panel de uso terrestre, el cual fue integrado al sistema de seguimiento de una cocina solar desarrollada en el Instituto de Energías no Convencionales (INENCO) de la Universidad Nacional de Salta.

Se realizó la caracterización electrónica de las celdas solares de silicio cristalino irradiadas con protones de 10 MeV y diferentes fluencias, mediante la medición de la vida media efectiva τ_{ef} utilizando las técnicas PCD y OCVD modificada. Los resultados obtenidos confirman el modelo de degradación según el cual la variación de la inversa de la vida media de portadores minoritarios de la base en celdas solares de silicio cristalino es proporcional a la fluencia (ϕ).

Se diseñó, construyó e implementó un equipo que permite la medición de la respuesta espectral de celdas solares que cumple los requisitos de la Norma IRAM 210013-14 y la Norma ASTM N° E 297. Con este equipo se realizaron mediciones de celdas solares de silicio cristalino elaboradas en el GES, antes y después de su irradiación con protones y electrones. Las mediciones realizadas validaron la hipótesis de que el efecto del daño por radiación sobre celdas solares de Si es básicamente la disminución de la longitud de difusión en la base.

Se exploró un método para estimar la longitud de difusión de los portadores minoritarios en la base L_D , a partir de las mediciones de respuestas espectrales y de la simulación de dispositivos. Para ello, se simularon celdas solares con similares características a las fabricadas en el laboratorio y, a partir de un conjunto de valores de L_D , se determinó para qué intervalo de longitudes de onda el valor de L_D (ajuste) estimado por el ajuste lineal presentaba mejor correlación con el ingresado en la simulación. A partir de los resultados obtenidos se concluye que el método ofrece una buena alternativa para la evaluación del valor de la longitud de difusión de un dispositivo.

Se realizaron numerosas simulaciones numéricas variando parámetros de los dispositivos como: velocidad de recombinación superficial frontal y posterior, y longitud de difusión de los portadores minoritarios en la base. Esto permitió analizar la dependencia de la respuesta espectral con dichos parámetros y así evaluar el funcionamiento de las distintas partes del dispositivo.

Se realizaron actividades relacionadas con el diseño, la fabricación y el ensayo de módulos solares para usos espaciales. En lo que respecta al diseño, se desarrolló un modelo para el cálculo del momento dipolar magnético, el cual fue utilizado para estimar el momento magnético de los paneles solares del satélite SAC-C y para proponer diferentes configuraciones geométricas para los paneles del satélite SAOCOM. Los resultados obtenidos en todos los casos son compatibles con los requerimientos de la misión SAC-C.

Para la calificación del primer módulo de ingeniería se realizaron una serie de caracterizaciones y ensayos a cada uno de los componentes del panel solar: celdas, vidrios de protección, cables, diodos de paso y de bloqueo, etc..

Se realizó la caracterización por microscopía electrónica de barrido y análisis por EDAX de celdas solares de doble y triple juntura de GaAs sobre sustrato de Ge. La composición de los "buses" colectores de estas celdas indica que está conformado por una

capa de Ag y otra de Au. La presencia de una fina de capa de Au y el espesor de los contactos confirman la información provista por el fabricante.

Se midió la curva I-V de las subcadenas del panel, lo cual permitió verificar el correcto funcionamiento de las mismas y comparar sus características eléctricas con las obtenidas por simulación a partir de las curvas I-V medidas de las cuatro celdas que la conforman.

Se determinó la capacidad eléctrica equivalente de una celda ATJ. Los valores obtenidos se encuentran en buen acuerdo con los encontrados en la bibliografía.

El módulo de ingeniería fue sometido a ensayos de vibraciones (hasta aceleraciones de 100 g) y de ciclado térmico en vacío en laboratorios de INVAP S.E., en la ciudad de S.C. de Bariloche. La inspección visual y la medición de las características eléctricas realizadas antes y después de los ensayos no mostraron diferencias relevantes, pudiéndose considerar entonces la experiencia como una calificación preliminar de los componentes y procedimientos de fabricación desarrollados. Por otro lado, proporcionaron los elementos y la capacitación necesarios para realizar en Argentina los ensayos referidos a este tema en las celdas y los demás componentes de vuelo que se utilizarán en el satélite SAOCOM.

Se realizó el diseño, elaboración y calibración de prototipos comerciales de sensores FV de radiación basados en celdas solares de c-Si. Se analizó su comportamiento durante un año para determinar si son aceptables como instrumentos de medición. Se concluye que estos sensores son útiles para el estudio de la radiación solar global con fines energéticos, ya que su comportamiento es similar al de otros sensores fotovoltaicos comerciales. Asimismo, su estabilidad temporal es muy satisfactoria dado que al ser la cubierta de vidrio no sufre el deterioro que provoca la radiación UV.

Por último, cabe destacar que las actividades desarrolladas en esta Tesis, de carácter claramente interdisciplinarias, pudieron ser realizadas gracias a la disponibilidad de equipamiento y personal especializado en distintas áreas dentro de la misma institución (CNEA).

Agradecimientos

Lista de publicaciones

- Bolzi, C.G., Bruno, C.J., Durán, J.C., Godfrin, E.M., Martínez Bogado, M.G., Merino, L.M., Plá, J.C., Tamasi, M.J.L., Barrera M., "First experiment of argentine solar cells in space: modules fabrication, characterisation, and telemetry data analysis from SAC-A satellite", *Solar Energy Materials and Solar Cells* 73, pp. 269-280 (2002).
- Filevich, A., Bruno, C.J., Fernández Vázquez, J., Alurralde, M., Prario, I., Tamasi, M.J.L., Martínez Bogado, M.G., Plá, J.C., Durán, J.C., Schuff, J., Burlon, A., Stoliar, P., Minsky, D., Kreiner, A. and Mayer, R.. "A Compact Portable Setup for in situ Solar Cells Degradation Studies". *Proc. IEEE Nuclear and Space Radiation Effects Conference (NSREC) Monterey, California (EE.UU.)*, Vol 50, 6 pág. 2380-2384 (2003).
- Bruno, C.J., Martínez Bogado, M.G., Plá, J.C. and Durán, J.C.. "Determination of minority carrier lifetime in solar cells: a novel biased OCVD technique". *Physica Status Solidi (a)* 174, 231 (1999).
- Godfrin, E.M., Martínez Bogado, M.G., Tamasi, M.J.L. y Durán, J.C. "Primera experiencia de celdas solares argentinas en el espacio: análisis preliminar de los resultados", *AVERMA* 3(1), pág. 04.25-04-28 (1999).
- Martínez Bogado, M.G., Tamasi, M.J.L., Plá, J.C., Bolzi, C.G., Durán, J.C., "Influencia de la difusión de aluminio y fósforo sobre la vida media de portadores minoritarios en obleas de silicio cristalino", *AVERMA* 4(1), pág. 04.23-04.28 (2000).
- Bolzi, C.G., Bruno, C.J., Godfrin, E.M., Martínez Bogado, M.G., Merino, L.M., Plá, J.C., Tamasi, M.J.L., Durán, J.C., "Primera experiencia de celdas solares argentinas en el espacio: elaboración, caracterización y análisis de datos de telemetría del satélite SAC-A", *ERMA* 8, pág. 1-8 (2000).
- 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., Durán, J.C. "Convenio de cooperación CONAE-CNEA: desarrollo, fabricación y ensayo de paneles solares para misiones satelitales argentinas", *AVERMA* 5, pág. 4.07-4.12 (2001).
- Alurralde, M., Tamasi, M.J.L, Bruno, C.J., Martínez Bogado, M.G., Plá, J. C., Fernández

- Vázquez, J., "Estudios de daño por radiación con protones de 10 MeV en celdas solares de silicio cristalino utilizando el acelerador TANDAR". Avances en Energía Renovables y Medio Ambiente 5, pág. 08.43-08.48 (2001).
- 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., Tamasi, M.J.L., "Convenio de cooperación CONAE-CNEA: desarrollo, fabricación y ensayo de paneles solares para misiones satelitales argentinas - Actividades desarrolladas en el último año", AVERMA 6, pág. 04.13-04.17 (2002).
 - Alurralde, M., Tamasi, M.J.L., Martínez Bogado, M.G., Plá J., "Evaluación del daño por radiación de celdas solares de distintos materiales con protones de 10 MeV". AVERMA 6, pág. 04.25-04.30 (2002).
 - Cadena, C., Bárcena, H., Echazú, R., Caso, R., Saravia, L., Martínez Bogado, M.G., Tamasi, M.J.L. y Godfrin, E.M. "Sistema de seguimiento para cocinas solares alimentado por módulo fotovoltaico". AVERMA 6, pág. 05.01-05.08 (2002).
 - Bolzi, C.G., Tamasi, M.J.L., Martínez Bogado, M.G., Plá, J.C., "Radiómetros fotovoltaicos de bajo costo desarrollados en la C.N.E.A.: prototipo comercial", Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente 6, Comunicaciones, pág. 11.01-11.02 (2002).
 - Tamasi, M.J.L., Martínez Bogado, M.G., Alurralde, M., Plá, J.C. "Estudio teórico-experimental de daño por radiación con protones de 10 MeV en celdas solares de silicio cristalino". Energías Renovables y Medio Ambiente (ERMA) 11, pág.19-24 (2002).
 - M.J.L. Tamasi, M. Alurralde, I. Prario, A. Filevich, R. Mayer, J.C. Durán, M.G. Martínez Bogado, J. Plá. Comparación del daño por radiación producido por protones y electrones en celdas solares para uso espacial, AVER MA 7, pág. 04.01-04.06 (2003).
 - G. Bolzi, C.J. Bruno, P. Cabot, E. Carella, J.C. Durán, J. Fernández Vázquez, C.D. Franciulli, E.M. Godfrin, V. Goldbeck, M.G. Martínez Bogado, A. Moglioni, J. Plá, S.E. Rodríguez, M.J.L. Tamasi, M. Alurralde, F. Antonuccio, A. Filevich, A. Iglesias, E. Mezzabolta, S.L. Nigro. Desarrollo, fabricación y ensayo de paneles solares para misiones satelitales argentinas - primer módulo para ensayos. AVERMA 7, pág. 04.07-04.12 (2003).
 - Tamasi, M.J.L., Plá, J.C., Bolzi, C.G., Martínez Bogado, M.G., Venier, G.L., Durán, J.C.

“Comparison of different simple fabrication processes for high efficiency silicon solar cells”, Proceedings of the 2nd. World Conference on Photovoltaic Solar Energy Conversion, pp. 1874-1877, Viena, Austria, 6 al 10 de julio (1998).

- Bolzi, C.G., Bruno, C.J., Durán, J.C., Godfrin, E.M., Martínez Bogado, M.G., Merino, L.M., Plá, J.C., Tamasi, M.J.L., Barrera, M., “SAC-A satellite: first experiment of argentine solar cells in space”, Proceedings of the 28th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, pp. 1344-1347, Anchorage, Alaska, EE.UU., 15-22 de septiembre (2000).
- Centurioni, E., Summonte, C., Rizzoli, R., Iencinella, D., Plá, J., Mellassi, K., Martínez Bogado, M., Tamasi, M., Desalvo, A., Zignani, F. , “Junction formation and interface passivation in homojunction and heterojunction silicon solar cells deposited by VHF-PECVD”, Proceedings of the 17th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, pp. 3001-3004, Munich, Alemania, 22 al 26 de octubre (2001).
- A. Filevich, C.J. Bruno, J. Fernández Vázquez, M. Alurralde, I. Prario, M.J.L. Tamasi, M.G. Martínez Bogado, J.C. Plá, J. Duran, J. Schuff, A. Burlon, P. Stoliar, D. Minsky, A. Kreiner and R. Mayer. "A Compact Portable Setup for in situ Solar Cells Degradation Studies". Proc. IEEE Nuclear and Space Radiation Effects Conference (NSREC). Julio de 2003, Monterrey, California (EE.UU.). Vol 50, 6, pág. 2380-2384 (2003).
- Tamasi M.J.L., Alurralde M., Prario I., Filevich A., Mayer R., Durán J.C., Martínez Bogado M.G., Plá J. , Bruno C.J., Fernández Vázquez J. Comparison of electron and proton radiation damage in solar cells for space uses. Aceptado para su publicación en la 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 7-11 June 2004, Paris, France.