

## APLICACIÓN DE CAPAS ANTIRREFLECTANTES EN CELDAS SOLARES DE SILICIO CRISTALINO

H. Socolovsky<sup>1</sup>, J. García<sup>1,2</sup>, M. Barrera<sup>1,3</sup>, J. Plá<sup>1,3</sup>.

<sup>1</sup> Grupo Energía Solar - Centro Atómico Constituyentes,  
Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA)

Av. General Paz 1499, 1650 San Martín, Provincia de Buenos Aires, Argentina.

<sup>2</sup> Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires

<sup>3</sup> Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

e-mail: barrera@tandar.cnea.gov.ar

**RESUMEN:** Una forma de incrementar la eficiencia de las celdas solares de silicio monocristalino es disminuyendo la reflectividad en la cara frontal del dispositivo, maximizando de este modo la energía absorbida. Con este fin pueden aplicarse técnicas antirreflectantes (AR), como el depósito de películas dieléctricas de índice y espesores optimizados, siendo ejemplo de ellas el ZnS, el TiO<sub>2</sub> y el Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>.

En este trabajo se muestran los resultados de la optimización numérica de las estructuras Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-SiO<sub>2</sub>-Si y MgF<sub>2</sub>-vidrio-ZnS-SiO<sub>2</sub>-Si. Asimismo, se elaboraron y se caracterizaron ópticamente muestras, con las capas dieléctricas mencionadas previamente, a partir de la medición de la reflectividad espectral. Se propusieron métodos de elaboración para las capas AR sobre celdas solares compatibles con el método de elaboración de dispositivos convencionales. Finalmente, los dispositivos fueron caracterizados eléctricamente midiendo la característica I-V y electrónicamente mediante la medición de la eficiencia cuántica.

**Palabras clave:** celdas solares, silicio cristalino, capa antirreflectante, elaboración y caracterización.

### INTRODUCCIÓN

La reflectividad del Si varía desde aproximadamente el 33% en el infrarrojo cercano (NIR) hasta un 55% en el ultravioleta (UV). Una forma de incrementar la eficiencia de las celdas solares de silicio es disminuyendo la reflectividad de la cara frontal de la celda solar, maximizando de este modo la fracción de energía absorbida; a tal fin, se utilizan lo que se denominan técnicas antirreflectantes (AR). Se han desarrollado distintas técnicas AR, las cuales consisten en el depósito de multicapas dieléctricas, la textura superficial, o la combinación de ambas, esto es depositando la multicapa sobre la superficie ya texturada.

Las propiedades AR de las multicapas dieléctricas se basan en el fenómeno óptico de interferencia. Se obtienen depositando capas de materiales dieléctricos de espesores (típicamente un cuarto de la longitud de onda de trabajo) e índices de refracción adecuados. La optimización del índice y espesor de cada capa se realiza numéricamente pesando la transmitancia de la multicapa con el espectro solar y la respuesta espectral del dispositivo en función de obtener la máxima corriente de cortocircuito. Una vez obtenido el índice de refracción adecuado, se seleccionan materiales cuyas propiedades ópticas resulten similares a las obtenidas en el proceso de optimización. Ejemplos de este tipo de procedimiento pueden encontrarse en las referencias Zahó et al., 1991, Wenham et al., 1995, Plá et al., 2003.

Los materiales dieléctricos que pueden emplearse como capa AR son, dado su índice de refracción y según se trate de celdas encapsuladas o no, SiO<sub>2</sub>, ZnS, Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> y Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, para una única capa, MgF<sub>2</sub>/ZnS como bicapa (Bouhafs et al., 1998; Cid et al.; Plá, 1998). El caso de la bicapa AR-pasivante TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> ha sido estudiado en Barrera et al., 2003, Fertig et al., 2007, Barrera et al., 2008a y referencias citadas en esta última. En la literatura pueden encontrarse ejemplos del empleo de las técnicas AR en celdas solares de silicio tanto en aplicaciones terrestres (Boden y Bagnall, 2009) como espaciales (Barrera et al., 2008a).

En el presente trabajo, primeramente se realizó el cálculo numérico para obtener los espesores óptimos de la película AR y con posterioridad se elaboraron muestras para obtener una optimización experimental del método de deposición propuesto. Seguidamente se propusieron y se llevaron a cabo métodos de elaboración de celdas solares con capa AR, las que fueron posteriormente caracterizadas.

En particular, se presentan los resultados de la optimización numérica de capas AR consistentes de estructuras ZnS-Si y Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-SiO<sub>2</sub>-Si, que fueron luego tomados en cuenta para la elaboración de muestras y celdas solares. Se presentan los resultados de la caracterización eléctrica de celdas con AR de distintas características, así como también la eficiencia cuántica de las mismas.

### OPTIMIZACIÓN NUMÉRICA

Durante el proceso de elaboración de la juntura de una celda solar, crece térmicamente una delgada película de dióxido de silicio sobre la superficie de la oblea de Si. La finalidad de esta película es pasivar la superficie frontal del dispositivo, es decir saturar los enlaces libres en la superficie de forma tal de evitar la introducción de una mayor densidad de niveles en el *gap* que favorezcan la recombinación superficial de los portadores fotogenerados. Sin embargo, el SiO<sub>2</sub> tendrá influencia sobre la transmisividad de la multicapa AR, la cual es depositada sobre el mismo. Es por ello que en la optimización

numérica de la multicapa, ya sea para aplicaciones terrestres como espaciales, debe tenerse en cuenta la presencia de dicho óxido. Por este motivo se considera la presencia del  $\text{SiO}_2$  en las estructuras representativas de las celdas a optimizar.

Para el caso de celdas solares con  $\text{ZnS}$  como capa AR, se realizó primeramente la optimización numérica de una estructura multicapa representativa de las celdas solares encapsuladas para aplicaciones espaciales:  $\text{MgF}_2$ -vidrio( $200\mu\text{m}$ )- $\text{ZnS}$ - $\text{SiO}_2$ -Si, donde el  $\text{MgF}_2$  es el AR del vidrio.

Los espesores de la capa AR del vidrio y del Si fueron optimizados de modo de obtener una mayor corriente de cortocircuito. Los detalles del cálculo pueden verse en publicaciones previas (Barrera y Plá, 2003; Barrera et al., 2008a). Los resultados obtenidos para incidencia normal y espectro AM0 se muestran en la Figura 1.

Para el caso de aplicaciones terrestres, se consideró la estructura  $\text{Si}_3\text{N}_4$ - $\text{SiO}_2$ -Si. En la Figura 2 se muestran los espesores óptimos de  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , así como la correspondiente corriente de cortocircuito en función del espesor de  $\text{SiO}_2$  pasivante. Se consideró incidencia normal y el espectro AM1,5.

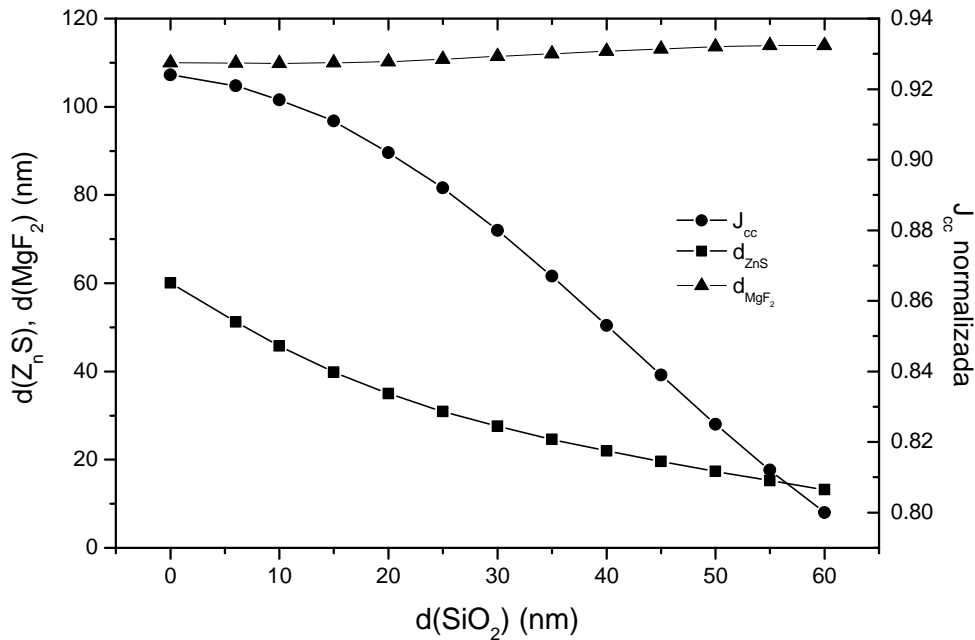


Figura 1: Espesores óptimos de  $\text{MgF}_2$ ,  $\text{ZnS}$  y corriente de cortocircuito normalizada en función del espesor del  $\text{SiO}_2$  pasivante para un espesor de vidrio de  $200\mu\text{m}$ .

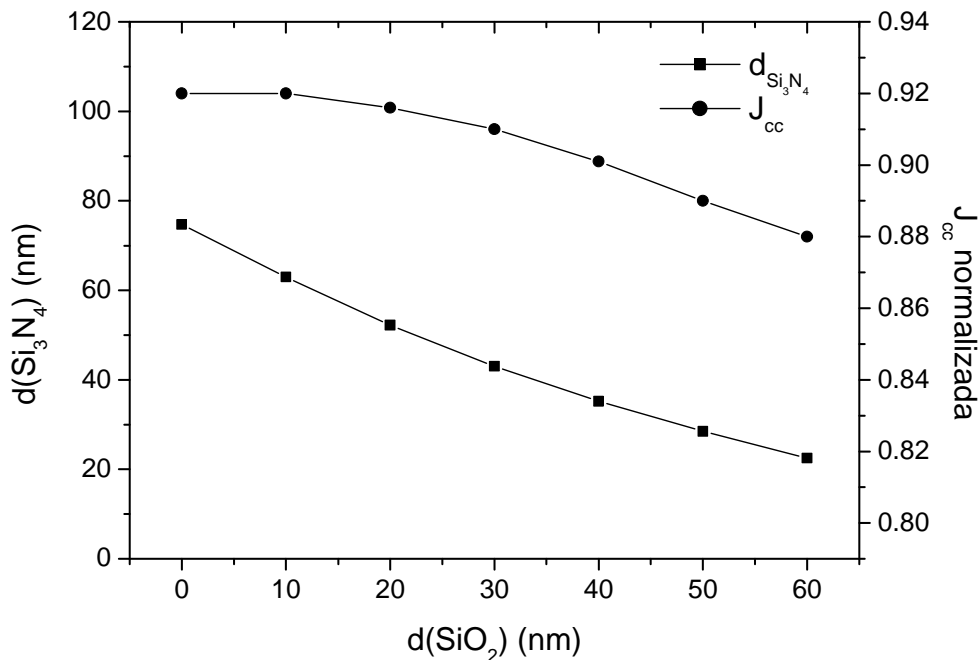


Figura 2: Espesores óptimos de  $\text{Si}_3\text{N}_4$  y corriente de cortocircuito normalizada en función del espesor del  $\text{SiO}_2$  pasivante.

Se observa en ambos casos que la presencia del SiO<sub>2</sub> pasivante deteriora las características de la multicapa. Por otra parte, la optimización de la bicapa AR pasivante TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> para aplicaciones espaciales puede observarse en publicaciones previas (Barrera y Plá, 2003; Barrera et al., 2008a).

### Elaboración de celdas solares con AR

Las celdas solares de Si cristalino, con excepción de la deposición de la capa AR, se fabricaron de acuerdo a los procedimientos ya descritos en publicaciones anteriores (Plá et al., 1998). Estos se basan en la difusión de P en un proceso de un paso a alta temperatura y la evaporación de metales en cámara de vacío para la deposición de los contactos utilizando fotolitografía para la transferencia del patrón geométrico de la grilla frontal.

Las celdas solares con Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> fueron elaboradas a partir de obleas de Si cristalino ya difundidas con P para la elaboración del emisor n<sup>+</sup>, depositando el Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> directamente sobre la capa de SiO<sub>2</sub> resultante del proceso de difusión, o bien atacando previamente dicha capa de óxido para depositar el Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> directamente sobre el Si. El espesor del Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> fue definido en función de la optimización numérica presentada en la sección anterior.

La deposición del Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> se realizó por PECVD (*Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition*) en el Instituto IMM-CNR de Bologna, Italia, para 13,56 MHz de frecuencia y 4W de potencia, 0,79 mbar de presión en la cámara, 220°C de temperatura del sustrato y una relación de flujos  $\Phi_{\text{SiH}_4} : \Phi_{\text{NH}_3}$  de 25 : 68. El vacío previo fue  $1,5 \times 10^{-7}$  mbar.

La puesta a punto del depósito de ZnS se realizó sobre muestras de Si monocristalino (Barrera, 2004). Dicho depósito fue realizado mediante evaporación térmica en cámara de vacío y el espesor de la capa depositada fue medido *in situ* con un monitor de espesores. Posteriormente a la evaporación se midió la reflectividad óptica de las muestras con un espectrofotómetro GBC UV/VIS 920 con esfera integradora. Se verificó el espesor medido, evaporando ZnS sobre muestras de Si y ajustando teóricamente la curva de reflectividad medida con el código OPTICAL (Centurioni, 2005) tomando como valores de *n* y *k* los correspondientes a la estructura cúbica del ZnS, ya que esta es la estructura predominante luego de la evaporación (Palik y Addamiano, 1985).

Con el fin de obtener bicapas AR-pasivante de TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> sobre la celda solar, primeramente se procedió a depositar Ti sobre muestras de Si, con las mismas características que para el caso con ZnS, mediante evaporación térmica. El SiO<sub>2</sub> nativo fue atacado mediante una solución diluida de HF, de modo tal que el Ti fue depositado directamente sobre la superficie de Si dando condiciones iniciales controladas. Con posterioridad se oxidaron las muestras en horno a 900°C durante 10 minutos en ambiente de oxígeno. El proceso experimental fue optimizado de modo de asegurar la formación de las capas de TiO<sub>2</sub> y SiO<sub>2</sub> de espesores apropiados simultáneamente (Barrera y Plá, 2003; Barrera, 2008b).

En el caso de las celdas solares con ZnS, la capa fue depositada luego de la elaboración de la grilla frontal, mediante evaporación térmica. El óxido de la cara frontal de las obleas de Si difundidas fue eliminado antes de la deposición de la grilla de contactos debido a que su excesivo espesor (~40 nm) afecta la característica AR que se desea obtener. Para el caso  $d(\text{SiO}_2)=0$  los espesores óptimos son  $d(\text{ZnS}) = 60$  nm;  $d(\text{MgF}_2) = 110$  nm, para los cuales resulta una corriente de cortocircuito relativa de 0,924. Si se tiene una tolerancia del 1% en la caída de la corriente, los espesores óptimos de ZnS se encuentran entre 48 y 76 nm.

Las celdas con TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> se elaboraron siguiendo un proceso que requiere realizar dos veces fotolitografía. A partir de la oblea difundida y con el Ti depositado directamente sobre el Si, se ataca el metal con HF en la zona de los contactos, requiriendo fotolitografía. Luego del proceso térmico de oxidación para formar la bicapa es necesario realizar un segundo paso de fotolitografía para depositar la grilla frontal sobre el Si y así tener un contacto óhmico.

En la Figura 3 pueden observarse las mediciones de reflectividad óptica de dos muestras con Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, el respectivo ajuste con el que se calcularon los espesores y la reflectividad del Si. En la Tabla 1 se muestra el detalle de la estructura de la muestras.

En la Figura 4 se observa la reflectividad de una muestra con estructura TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>-Si elaborada en el mismo proceso que las celdas con TiO<sub>2</sub>, se muestra también el respectivo ajuste numérico. Los espesores de las capas son  $d(\text{TiO}_2)= 41$  nm y  $d(\text{SiO}_2)= 13$  nm. También se presenta la curva calculada de una estructura ZnS-Si con 60 nm de espesor de ZnS.

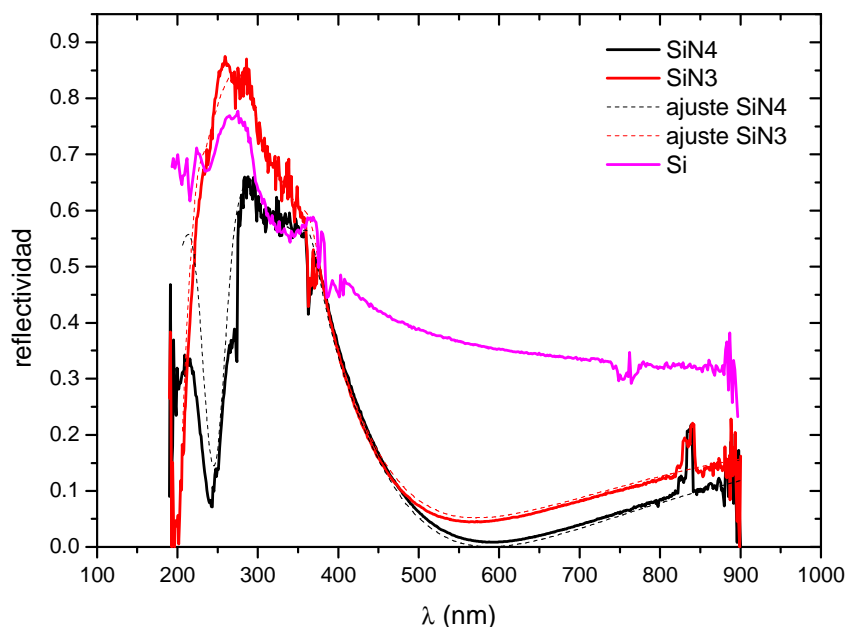


Figura 3: Reflectividad de dos muestras, una con estructura  $Si_3N_4-Si$  y otra con estructura  $Si_3N_4-SiO_2-Si$  y respectivo ajuste.

		d( $Si_3N_4$ ) (nm)	d( $SiO_2$ ) (nm)
SiN3	$Si_3N_4-Si$	72	0
SiN4	$Si_3N_4-SiO_2-Si$	17	56

Tabla 1: Detalle de las estructuras con  $Si_3N_4$  elaboradas y espesores calculados.

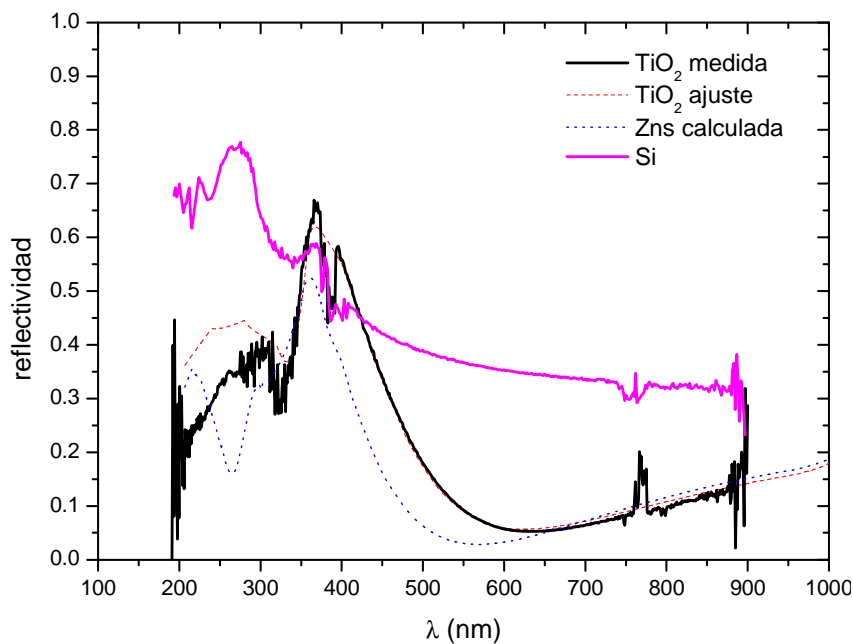


Figura 4: Reflectividad de una muestra con estructura  $TiO_2-SiO_2-Si$  y su ajuste y reflectividad calculada de una muestra con estructura  $ZnS-Si$  características y ajuste.

La elaboración de celdas solares con capa AR exige lograr una compatibilidad entre el proceso de elaboración de la capa o multicapa y el proceso de elaboración de dispositivos convencionales, en particular de la grilla de contacto frontal. El espesor de  $SiO_2$  que resulta de la difusión no es óptimo para formar una capa AR, este hecho se tuvo presente al momento de proponer el proceso de elaboración total del dispositivo. Por este motivo, en el caso de la elaboración de las celdas con  $ZnS$ , dicho óxido fue eliminado mientras que, en el caso de las celdas con  $Si_3N_4$ , se decidió dejar el  $SiO_2$  no optimizado. El problema tecnológico de obtener un espesor de  $SiO_2$  optimizado y compatible con el proceso de elaboración convencional se resolverá en futuros trabajos.

## Caracterización eléctrica

Se caracterizaron eléctricamente, midiendo la característica I-V, celdas solares no encapsuladas con AR de ZnS de 60 nm de espesor y celdas con Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>. Los resultados se muestran en la Tabla 1, junto con aquéllos obtenidos para la bicapa TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> (Barrera et al., 2004, Barrera et al., 2009). Las mediciones en el caso de las celdas con AR ZnS fueron realizadas antes y después de depositar el ZnS en condiciones estándar para la caracterización de dispositivos para aplicaciones espaciales. Se utilizó un simulador solar *TS-Space close match* AM0, que cuenta con dos lámparas de xenón y cuatro lámparas incandescentes para un óptimo ajuste espectral. La irradiancia sobre el plano de trabajo fue ajustada a 1,367 kW/m<sup>2</sup> utilizando celdas de referencia calibradas.

Celda	AR	V <sub>ca</sub> (mV)		J <sub>cc</sub> (mA/cm <sup>2</sup> )		FF		η (%)	
		sin AR	con AR	sin AR	con AR	sin AR	con AR	sin AR	con AR
298a	ZnS	579	577	25,25	36,38	0,78	0,75	8,4	11,5
298b	ZnS	563	592	25,86	34,69	0,78	0,78	8,3	11,7
299a	ZnS	600	601	26,31	34,44	0,79	0,77	9,1	11,7
272-05	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> -SiO <sub>2</sub>	-	555	-	35,6	-	0,80	-	11,6
309-1	TiO <sub>2</sub> -SiO <sub>2</sub>	-	560	-	26,5	-	0,58	-	6,2
309-2	TiO <sub>2</sub> -SiO <sub>2</sub>	-	566	-	28,4	-	0,75	-	8,8
309-3	TiO <sub>2</sub> -SiO <sub>2</sub>	-	567	-	28,3	-	0,53	-	6,2
309-5	SiO <sub>2</sub>	-	589	-	28,2	-	0,64	-	7,8

Tabla 2: Parámetros eléctricos de celdas solares de Si cristalino con y sin capa AR de ZnS (AM0, 1,367 kW/m<sup>2</sup>), celdas con AR de Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> y TiO<sub>2</sub>, una celda convencional con SiO<sub>2</sub>.

Los espesores de las capas AR de las celdas elaboradas son: d(ZnS)= 60 nm para la celda con ZnS, d(Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>)=17 nm y d(SiO<sub>2</sub>)=56 nm para la celda con nitruro, d(TiO<sub>2</sub>)=41 nm y d(SiO<sub>2</sub>)=13 nm para la celdas con bicapa AR-pasivantes. La última celda es convencional y con d(SiO<sub>2</sub>)= 50 nm. El área total de la celda 272-05 es de 8 cm<sup>2</sup>, mientras que el área del resto de las celdas se encuentra entre 14 y 16 cm<sup>2</sup>.

La caracterización eléctrica de las celdas de Si con y sin AR optimizado de ZnS muestran un incremento del 35 % en la corriente de cortocircuito y en la eficiencia de conversión. Como estas celdas fueron elaboradas sin la capa de SiO<sub>2</sub>, la superficie frontal quedó sin pasivar, ya que el ZnS no provee dicha pasivación. Mediante simulaciones numéricas con PC1D (Clugston y Basore, 1997), se verificó que debido a este motivo se pierde cerca de un 7-8 % de la I<sub>cc</sub>. Tomando en cuenta un espesor de SiO<sub>2</sub> de 1,5 nm, es decir el que corresponde al óxido nativo, para S = 1x10<sup>6</sup> cm/s en la superficie frontal (superficie no pasivada) para la simulación numérica de una celda típica se obtiene J<sub>cc</sub>=25,3 mA/cm<sup>2</sup> y V<sub>ca</sub>=588,3 mV (AM0, 1,367 kW/m<sup>2</sup>), valores compatibles con los obtenidos experimentalmente.

Se puede observar una caída en la tensión de circuito abierto V<sub>ca</sub> de las celdas con TiO<sub>2</sub> respecto a la celda convencional con SiO<sub>2</sub>, la que puede ser debida a alguna degradación de la celda durante la oxidación. Existen dos causas que explican la baja eficiencia η en las celdas con TiO<sub>2</sub>. Una de ellas es la falta de alineación de los contactos ya que, dado que se requieren dos pasos de fotolitografía, al no disponer de un alineador de máscaras en algunos casos la grilla de contactos frontal no estaba haciendo contacto con el Si, sino que estaba apoyada sobre el TiO<sub>2</sub> en algunos tramos provocando un aumento de la resistencia serie. Esto se pudo observar con un proyector de perfiles en el Departamento de Combustibles del CAC-CNEA. El aumento de la resistencia serie incide directamente en la degradación del factor de forma FF. La otra causa es que los dedos de la grilla de contactos frontal resultaron más gruesos que lo esperado, de alrededor de 200 μm, tapando la zona activa de la celda y disminuyendo la generación de corriente con la consecuente disminución de la corriente de cortocircuito I<sub>sc</sub>. De hecho, este efecto de sombra dado por los dedos excesivamente gruesos prácticamente compensa la ganancia introducida por la estructura AR. El promedio del área cubierta por los contactos en las celdas con TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> resultó del 19%, mientras que en el caso de las celdas con solo SiO<sub>2</sub> es del 11,6%. (Barrera et al., 2009).

Cabe aclarar que las celdas elaboradas corresponden a distintos procesos de elaboración

## Medición de eficiencia cuántica

La eficiencia cuántica externa (EQE) de una celda fotovoltaica se define como la relación entre el número de electrones que circulan en el circuito externo (N° e<sub>circ</sub><sup>-</sup>) y el número de fotones incidentes por unidad de tiempo para una determinada longitud de onda (N° fot<sub>inc</sub><sup>-</sup>) esto es:

$$EQE(\lambda) = \frac{N^{\circ} e_{circ}^{-}}{N^{\circ} fot_{inc}^{-}} = \frac{I_t}{S(\lambda)t} = \frac{RE(\lambda)}{\lambda} \frac{hc}{q} \quad (1)$$

donde:

I es la corriente eléctrica que circula por el circuito externo [A]

h es la cte de Planck [J.s]

$q$  la carga del electrón [C]  
 $c$  velocidad de la luz en el vacío [m/s]  
 $t$  tiempo [s]  
 $S(\lambda)$  es la potencia incidente de luz monocromática [W]  
 $RE(\lambda)$  es la respuesta espectral de la celda [A/W]

Dicha eficiencia permite evaluar la performance de un dispositivo fotovoltaico para distintas longitudes de onda.

Para llevar a cabo esta medición en el GES se utilizó una lámpara incandescente de 250 W y una rueda que porta un conjunto de filtros de interferencia de banda angosta (del orden de los 10nm) cubriendo la banda espectral comprendida entre 340nm y 1100nm con saltos de 50nm. Como la intensidad del haz luego de pasar por el filtro es extremadamente débil, es necesario desacoplarlo de posibles fuentes de ruido lumínico continuo (como por ejemplo luz ambiente) utilizándose para ello un *chopper* que conmuta un haz de luz proveniente de la lámpara con una determinada frecuencia. Luego, a través de un detector sincrónico (amplificador *lock-in*) enclavado a la misma frecuencia del *chopper* se puede medir con precisión la perturbación eléctrica generada por la luz monocromática conmutada. Finalmente, y con el objeto de poner a la celda en condiciones de funcionamiento, se utiliza una fuente de polarización lumínica (en nuestro caso una lámpara con reflector dicróico de 250W) y una fuente de tensión continua que permite, al ser intercalada en el circuito, asegurar la condición de cortocircuito de la celda. En la actualidad el movimiento de la rueda de filtros y la adquisición de datos a través del *lock-in* se encuentran automatizados y controlados desde una PC, de modo que el operador sólo tiene que conectar las celdas a medir.

Para calcular las respuestas espectrales y las eficiencias cuánticas de las celdas se consideró solamente el área activa de los dispositivos, debido a que las grillas de contacto frontal de cada celda tienen distintos patrones geométricos, en particular el espesor de los dedos. De este modo se pueden comparar las diferencias intrínsecas entre capas AR. En la Figura 5 se muestra la EQE de las celdas medidas.

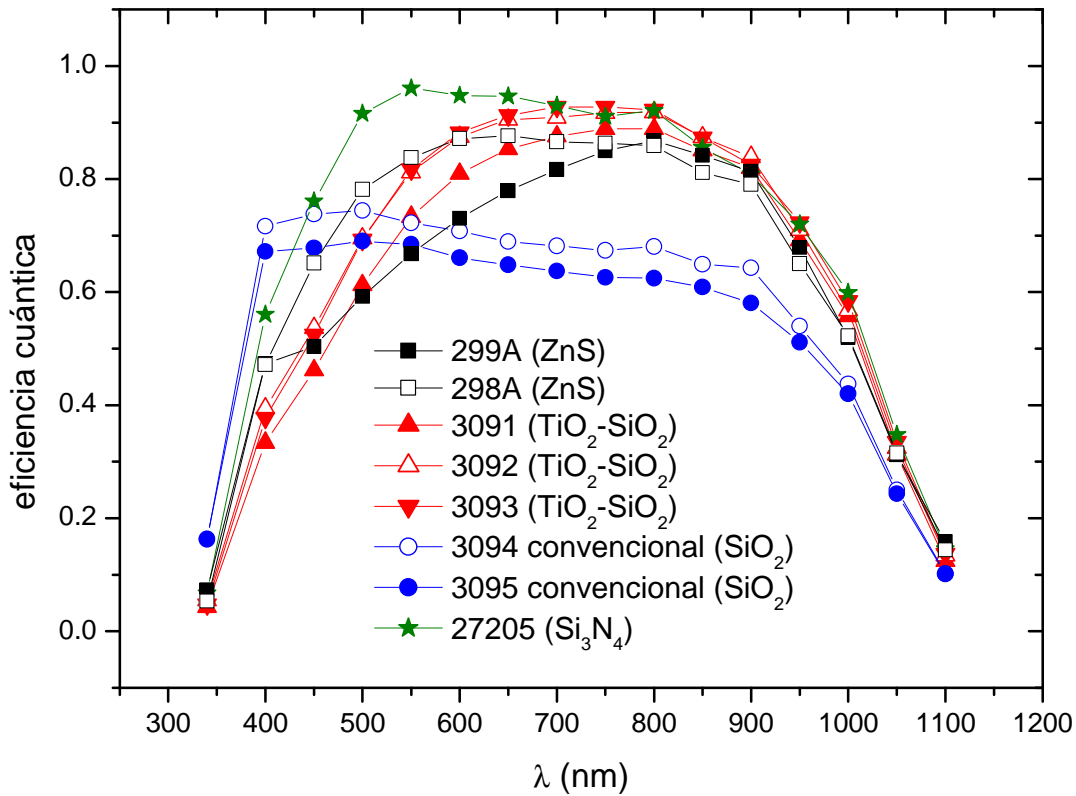


Figura 5: Eficiencia cuántica externa de las celdas con AR.

En la cara superficial de las celdas compiten el tema de la pasivación, de la absorción y de la reflectividad. En cuanto a la diferencia de la EQE en celdas con  $Si_3N_4$  respecto a las con  $TiO_2$  y  $ZnS$  podría deberse a una mayor absorción en el UV, es mayor para el  $TiO_2$  y el  $ZnS$  que para el  $Si_3N_4$  (Palik y Addamiano, 1985; Ribarsky, 1985; Philipp, 1985). La celda con  $ZnS$  carece de pasivación en la cara frontal, lo cual se ve reflejado en una baja EQE para bajas longitudes de onda.

A fin de comparar el desempeño de las distintas estrategias AR, resulta conveniente independizarse de las distintas geometrías presentes en las celdas elaboradas. Dado que la densidad de corriente de cortocircuito es el principal parámetro eléctrico afectado por la estructura AR, se recalculó dicha densidad de corriente utilizando el área activa e integrando la respuesta espectral medida pesada con el espectro estándar AM0 en cada caso. Los resultados se presentan en la Tabla 3. Se puede observar que las distintas estrategias AR producen resultados comparables en cuanto a la corriente de cortocircuito, aunque con un incremento levemente mayor en el caso de las celdas con ZnS.

Celda	AR	$J_{cc}^{medida}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	A activa (cm <sup>2</sup> )	$J_{cc}^{recalculada}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$J_{cc}(RE)$ (mA/cm <sup>2</sup> )
298a	ZnS	36,38	13,4	43,4	42,5
299a	ZnS	34,44	14,3	38,5	38,3
272-05	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> -SiO <sub>2</sub>	35,6	7,17	39,7	40,9
309-1	TiO <sub>2</sub> -SiO <sub>2</sub>	26,5	11,9	35,6	35,2
309-2	TiO <sub>2</sub> -SiO <sub>2</sub>	28,4	10,5	37,9	37,6
309-3	TiO <sub>2</sub> -SiO <sub>2</sub>	28,3	10,5	37,7	37,9
309-5	SiO <sub>2</sub>	28,2	14,5	31,1	29,9

Tabla 3: Valores de densidad de corriente recalculados utilizando el área activa e integrando la respuesta espectral medida.  $J_{cc}^{medida}$  es la densidad de corriente de cortocircuito medida utilizando el área total del dispositivo, en  $J_{cc}^{recalculada}$  se utiliza el área activa de la celda, mientras que  $J_{cc}(RE)$  es la integral de la respuesta espectral medida pesada con el espectro AM0.

## CONCLUSIONES

Se presentó el trabajo realizado en capas AR optimizadas sobre Si monocristalino. En particular se mostraron los resultados de la optimización numérica de capas AR consistentes de estructuras MgF<sub>2</sub>-vidrio-ZnS-SiO<sub>2</sub>-Si y Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-SiO<sub>2</sub>-Si, que fueron luego tomados en cuenta para la elaboración de muestras y celdas solares.

Asimismo, se presentaron los resultados de la caracterización eléctrica de celdas con AR de distintas características, ZnS-Si, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-SiO<sub>2</sub>-Si y TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>-Si, así como también la eficiencia cuántica de las mismas.

Se observaron diferencias en la eficiencia cuántica entre las distintas opciones de capa AR estudiadas debido a las diferentes características ópticas de los materiales involucrados y a la presencia o no de pasivación en la cara frontal del dispositivo. Si bien se observaron muy buenos resultados para la eficiencia cuántica en los casos de celdas con AR de Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> y TiO<sub>2</sub>, en este último caso los parámetros eléctricos se vieron afectados debido a problemas asociados al proceso de fabricación. En el caso de las celdas con AR de ZnS, la falta de pasivación de la cara frontal redujo globalmente la mejora en la eficiencia obtenida por su buen comportamiento AR.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la colaboración de R. Rizzoli del IMM-CNR de Bologna, Italia, en la deposición de las capas de Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, así como la de E. Godfrin en la medición y ajuste de las curvas I-V y la determinación de los parámetros eléctricos.

## REFERENCIAS

- Barrera M., Plá J. (2003). Películas dieléctricas antirreflectantes-pasivantes en celdas solares de silicio cristalino para uso espacial. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente 7, 09.07-09.12.
- Barrera M., J. Plá, C. Bocchi, A. Migliori (2008a). Antireflecting– passivating dielectric films on crystalline silicon solar cells for space applications. Solar Energy Materials & Solar Cells 92, 1115-1122.
- Barrera M.P. (2008b). Optimización teórico-experimental de capas dieléctricas antirreflectantes en celdas solares de silicio para aplicaciones espaciales. Tesis de Maestría, UNSAM.
- Barrera M., Socolovsky H., Plá J. (2009). Elaboración de celdas solares de silicio monocristalino para aplicaciones espaciales con capas dieléctricas antirreflectantes: primeros resultados. Trabajo aceptado para su publicación en las actas del 9º Congreso Internacional de Metalurgia y Materiales SAM/CONAMET 2009.
- Boden S.A., Bagnall D.M. (2009). Sunrise to sunset optimization of thin film antireflective coatings for encapsulated, planar silicon solar cells. Progress in Photovoltaics: Research and Applications 17, 241-252.
- Bouhafs D., Moussi A., Chikouche A., Ruiz J.M (1998). Design and simulation of antireflection coating systems for optoelectronic devices: application to silicon solar cells. Solar Energy Materials & Solar Cells 52, 79-93.
- Centurioni E. (2005). Generalized matrix method for calculation of internal light energy flux in mixed coherent and incoherent multilayer. Applied Optics 44, 7532.
- Cid M., Stem N., Brunetti, C., Beloto A.F., Ramos C.A.S. (1998). Improvements in anti-reflection coatings for high-efficiency silicon solar cells. Surface Coatings Technology 106, 117-120.
- Clugstone D. y Basore P. (1997). PC1D version 5: 32-bit solar cell modeling on personal computers. 26<sup>th</sup> Photovoltaic Specialist Conference, Anaheim, California, 207.
- Elidrissi B., Regragui M., Bougrine A., Kachouane A., Bernède J.C. (2001). Structure, composition and optical properties of ZnS thin films prepared by spray pyrolysis. Materials Chemistry and Physics 68, 175-179.
- Fertig F. y Franklin E. (2007). Titanium dioxide as anti-reflecting coating for crystalline silicon solar cells. Proceedings of the 22<sup>nd</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference, pp. 326–329, Milan, Italia.

- Holland L. (1963). Vacuum Deposition of thin films. Chapman & Hall Ltd.
- Kern W. (1990). The evolution of silicon wafer cleaning technology, Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Symposium on Cleaning Technology in Semiconductor Device Manufacturing 90-9, pp 3. The Electrochemical Society.
- Palik E. y Addamiano A. (1985). Zinc sulfide (ZnS), en Handbook of Optical Constants of Solids, pp. 597-619. Editado por E. Palik. Academic Press, New York.
- Ribarsky M.W. (1985). Titanium dioxide (TiO<sub>2</sub>) (rutile), en Handbook of Optical Constants of Solids, pp. 795-798. Editado por E. Palik. Academic Press, New York.
- Philipp H.R. (1985). Silicon nitride (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) (noncrystalline), en Handbook of Optical Constants of Solids, pp. 771-774. Editado por E. Palik. Academic Press, New York.
- Plá J. (1998). Tratamientos superficiales antirreflectantes y elaboración de junturas para celdas solares de silicio cristalino. Tesis Doctoral.
- Plá J.C., Godfrin E.M. y Durán J.C. (1998). Diseño, elaboración y caracterización de celdas solares de silicio cristalino con textura superficial. Energías Renovables y Medio Ambiente 4, 1-5.
- Plá J., Tamasi M., Rizzoli R., Losurdo M., Centurioni E., Summonte C., Rubinelli F. (2003). Optimization of ITO layers for heterojunction a-Si/c-Si solar cell applications, Thin Solid Films 425, 185-192.
- Wenham S.R., Green M.A., Watt M.E. (1995). Applied Photovoltaics, pp. 39-41. University of New South Wales, Australia.
- Zhang G., Zhao J., Green M.A. (1998). Effect of substrate heating on the adhesion and humidity resistance of evaporated MgF<sub>2</sub>/ZnS antireflection coatings and on the performance of high-efficiency silicon solar cells. Solar Energy Materials and Solar Cells 51, 393-400.
- Zhao J., Green M.A. (1991). Optimized antireflection coatings for high efficiency silicon solar cells, IEEE Transactions on Electron Devices 38, 1925-1934.

## ABSTRACT

One way to enhance the efficiency in crystalline silicon solar cells is to decrease the reflectivity, maximizing consequently the absorbed energy. With this objective, antireflecting (AR) techniques can be applied, as the deposition of dielectric films with appropriate refraction index and thickness, for instance ZnS, TiO<sub>2</sub>, and Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>.

In this work we show the numerical optimization results obtained on the structures Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-SiO<sub>2</sub>-Si y MgF<sub>2</sub>-vidrio-ZnS-SiO<sub>2</sub>-Si. Furthermore, samples with the mentioned dielectric films were fabricated and optically characterized by the measurement of the spectral reflectivity. Fabrication methods for the AR films were proposed, taking into account their application on conventional devices. Finally, the devices were characterized measuring the I-V curve and the external quantum efficiency.

**Keywords:** solar cells, crystalline silicon, antireflective coating, elaboration and characterisation