

## Corte de placas solares con láser. Estudio de modificaciones microestructurales

A. J. RAMÍREZ DEL VALLE, S. PALANCO<sup>1</sup>, J. J. LASERNA<sup>1</sup>, J. PASCUAL COSP

Dpto. Ingeniería Civil de Materiales y Fabricación. ETSII. Universidad de Málaga. Málaga

<sup>1</sup>Dpto. Química Analítica. Facultad de Ciencias. Universidad de Málaga. Málaga

En el proceso de fabricación de placas fotovoltaicas se producen roturas de las células solares, por tanto, el reciclaje es necesario para mejorar la rentabilidad de este proceso, además, la fabricación de piezas de formas curvas no es factible por los métodos tradicionales. El procesado de estos materiales mediante un láser de Nd-YAG, permitirá la fabricación en cualquier forma geométrica además del mejor aprovechamiento de las placas desechadas por estar rotas. El presente trabajo muestra un estudio del proceso de corte de placas solares con láser. En primer lugar se procede a la optimización de los parámetros necesarios para realizar el corte de este material. La microestructura de la zona de corte y los posibles cambios microcomposicionales que se hayan podido producir, se estudian mediante microscopía electrónica de barrido, con microanálisis de energías dispersivas de Rayos X.

*Palabras clave:* Corte con láser, placas solares, procesado cerámico

### Solar cells laser cutting process. Microstructurals modifications study

In photovoltaic solar cells manufacturing process, system breaks are produced. Recycling improves the material profitability. In this sense, manufacturing of components with non-straight shapes is not feasible using traditional methods. The processing of these materials through Nd-YAG laser, allows manufacturing with any geometric shape. This work shows a study of solar cells cutting process with laser. First of all, it is necessary to carry out a parameter optimization in order to make an accurate material cutting. The microstructure of the cutting area and possible microcompositional changes were studied by scanning electronic microscopy (SEM) and X-ray analysis (EDX).

*Keywords:* laser cutting, solar cells, ceramics process

### 1. INTRODUCCIÓN

El procesado láser de materiales es una tecnología en auge que ha revolucionado tanto los sistemas convencionales de producción como los diseños, abriendo posibilidades de fabricación de productos antes impensables [1, 2]. No obstante, la incorporación de nuevas tecnologías a la industria es un proceso lento que requiere fuertes inversiones en infraestructura y en desarrollo científico, así como una correcta transferencia de tecnología.

Tradicionalmente se han utilizado discos de diamante para el corte de materiales cerámicos de alta densificación. La utilización de estos discos produce un acabado con grietas, microgrietas y defectos superficiales, lo que conlleva una disminución importante de la resistencia mecánica del producto. Adicionalmente, la limitada vida media de los componentes utilizados en el proceso y la restricción a la hora de cortar piezas con contornos complejos, conllevan un encarecimiento considerable del producto obtenido.

Recientemente, la tecnología láser se está aplicando al procesado de polímeros, vidrios y materiales cerámicos [3-6]. Los materiales cerámicos, en general, son malos conductores del calor y se ven, afectados a menudo por cambios de fase, por lo que son muy sensibles al choque térmico [7]. El empleo de un gas de aporte que arrastre el material fundido produce el rápido enfriamiento de la zona de corte, provocando la aparición de tensiones, como consecuencia del gradiente térmico y

las variaciones volumétricas inherentes a los cambios de fase [6, 8-9], a pesar de ello el procesado láser presenta una serie de ventajas que lo convierten en una buena alternativa para solucionar los problemas del corte:

- Se reduce el tiempo de procesado comparándolo con un proceso convencional [3-5, 8, 9].

- Las zonas afectadas por el proceso de corte son de menor tamaño que las obtenidas con el disco de diamante.

- Permite la realización de cortes de formas complejas con gran precisión.

Para el aprovechamiento de obleas ya conformadas que sufren algún deterioro, usualmente se corta el trozo defectuoso con cuchillas especiales, aprovechándose los trozos obtenidos para el montaje de paneles de menor tamaño o de geometría distinta a la usual. El corte con cuchilla produce los siguientes problemas:

- Producción de una zona de Deformación Plástica en torno a los 200-250 micrómetros.

- Rotura de los cristales de silicio próximos a la zona de corte

- Bajo rendimiento del proceso, ya que la presión producida por el corte puede llegar a romper el material

- Corte lineal

Se propone como alternativa la aplicación de la energía láser para minimizar, cuando no paliar completamente estos

problemas. El corte de las células requiere una mínima distorsión del material, así como una escasa pérdida de propiedades eléctricas, de esta forma, se redujo el aporte energético aumentando la velocidad de procesamiento hasta un límite fijado por la superposición mínima necesaria para producir un corte de calidad. Adicionalmente, esta solución es favorable desde el punto de vista de la productividad.

La viabilidad técnica y económica del proceso pasa por un estudio simultáneo de la microestructura de series de muestras obtenidas variando los parámetros de proceso hasta lograr una optimización [10].

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Materiales

Los materiales utilizados para este estudio han sido células solares fotovoltaicas. Estas están constituidas por placas de silicio dopadas con átomos de boro por una cara (Conducción tipo p) y átomos de fósforo por la otra (Conducción tipo n) con un tratamiento de texturizado para aumentar la superficie activa y con inserción de colectores de plata para mejorar la conductividad electrónica (Figura 1).

Estas placas tienen un espesor de 0.4 mm.

### 2.2. Métodos

Se ha empleado un láser de Nd-YAG, Rofin-Sinar RSY-1000P, con una potencia media máxima de 1200 W y una banda de frecuencias de pulsado de 1 a 1000 Hz., pudiéndose obtener una energía máxima por pulso de 120 J. Se ha utilizado una lente de enfoque de 80 mm. El equipo se integra en un sistema Arnold MC7 de 5 ejes gobernados por un CNC Siemens Sinumerik 820.

En el diseño del proceso de corte se tuvo en cuenta, como principal parámetro, la utilización de valores altos de potencia para, poder alcanzar valores elevados de la velocidad de avance, reduciendo por consiguiente el calor por unidad de longitud procesada. En la Tabla 1 se presentan distintos parámetros con los que se ha trabajado y con los que se obtuvieron cortes que aunque de buena calidad alteraban tanto las propiedades eléctricas de la placa, cortocircuitándola, como la microestructura. Los cortes obtenidos a partir de los parámetros presentados en esta comunicación, son con los que se obtuvieron mejores resultados, presentando un aspecto superficial suave y uniforme y unas mínimas alteraciones microestructurales.

La potencia media utilizada ha sido de 950 W con una frecuencia de 187.5 Hz., manteniéndose la energía de pulso a 5 J. Con estos parámetros se procesó el material de estudio a una velocidad de 1.8 m/min, obteniéndose una superposición de 6.25 pulsos/mm.

La utilización de un gas de aporte, está justificada por los siguientes efectos [3-5, 8, 9]:

- Proteger la óptica de focalización.
- Reducir el efecto de absorción de energía incidente.
- Producir o evitar reacciones químicas.
- Eliminar material fundido.

La utilización de argón favorece la inertización de la zona afectada térmicamente, evitando la formación de compuestos no deseados en la zona de corte. Sin embargo, su coste es

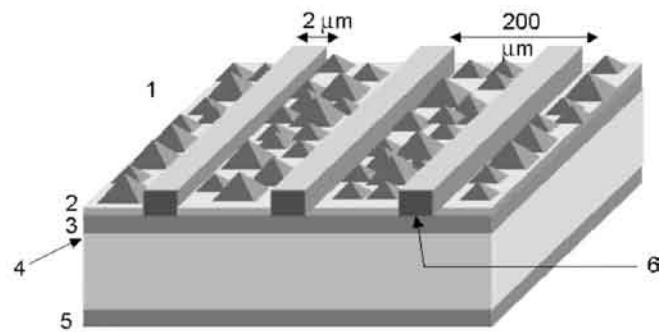


Figura 1. Esquema de una célula solar fotovoltaica: 1, superficie texturizada, 2, recubrimiento de  $\text{TiO}_2$ , 3, silicio dopado con fósforo, 4, unión p-n, 5, Silicio dopado con boro, 6, colectores de plata.

TABLA 1. PARÁMETROS EXPERIMENTALES DEL PROCESO DE CORTE

Código	Overlap (p/mm)	Frecuencia (Hz)	Potencia Media (W)	Energía por Pulso (J)	Velocidad (m/min)
1	6	100	900	9	1
2	11.25	187.5	950	5	1
3	7.5	187.5	950	5	1.5

relativamente alto por lo que se ha elegido nitrógeno con un criterio económico y ante la perspectiva de que si resulta eficaz el proceso será más rentable. La selección del caudal de trabajo vino condicionada por la fragilidad del material. Se empleó un caudal de 8 l/min, el mínimo necesario para proteger la óptica de focalización y eliminar el material fundido producido y una boquilla de corte con un orificio de salida de 0.8 mm de diámetro, que permitía un procesamiento libre de fallos.

El análisis de los materiales procesados se ha realizado con un microscopio electrónico de barrido JEOL 6400 equipado con un sistema de análisis químico por espectroscopia de energías dispersivas de Rayos X (EDX), con detector de ligeros. Se ha trabajado a una tensión de aceleración de 20 Kv. y se han analizado las imágenes de electrones secundarios y retrodispersados, adquiriéndose imágenes composicionales de rayos X.

## 3. RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSIÓN

### 3.1. Superficie de Entrada del Haz

En la Figura 2 se muestra una micrografía en la que puede verse el fundido producido en la zona de entrada del haz láser, con una extensión de aproximadamente unas 150 micrómetros, con lo que se disminuye en unos 100 micrómetros la zona de alteración producida por el corte con cuchilla. Ampliada esta zona (Figura 3), se observa un fundido homogéneo que no difunde en la estructura cristalina de la célula, por lo que no afecta a las propiedades de esta.

En la misma zona también puede observarse la aparición de algunas inclusiones debidas a impurezas que arrastra el material original, que corresponden a partículas de carbono, como se puede ver en la cuantificación obtenida por EDX (Tabla 2). Este queda retenido en el material durante el proceso de crecimiento del silicio, debido a que el silicio se funde en hornos o en crisoles de grafito. El carbono queda ocupando

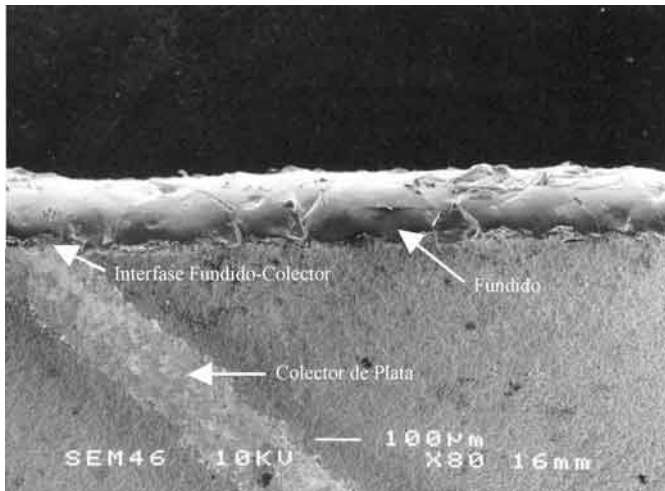


Figura 2. Zona de Entrada del Haz. Cara superior de la oblea.

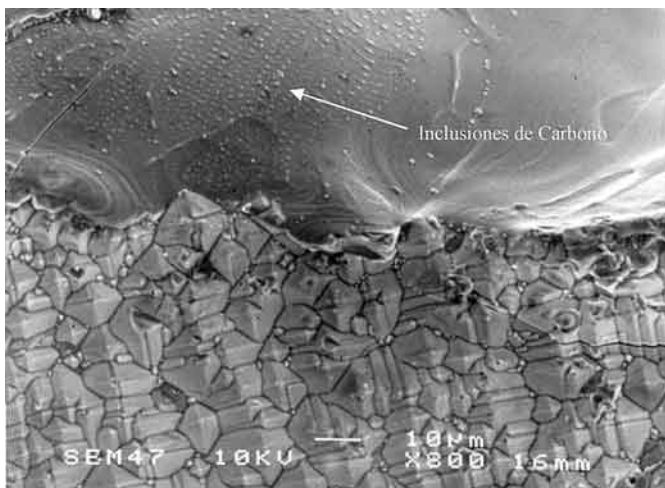


Figura 3. Interfase fundido material original en la Zona de Entrada del Haz

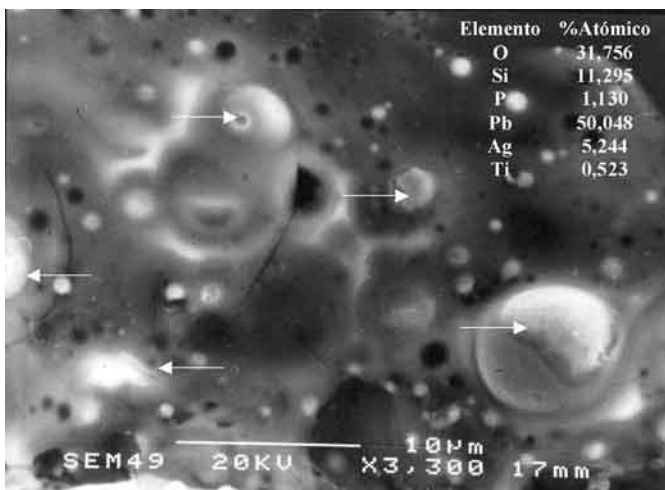


Figura 4. Zona entre el Finger de Plata y el Fundido producido en el Corte, en la que se muestra las distintas formaciones de aleaciones Pb-Ag.

Tabla 2. CUANTIFICACIÓN OBTENIDA POR EDX DE LA ZONA DE INCLUSIONES

Elemento	ZAF	%Elemento+-	Error	%Atómico
O (K)	.285	<.118 +-	.59	
Si (K)	1.107	27.888 +-	.089	2.730
C (K)	.598	424.788 +-	1.750	97.270
Total		452.675 +-		100.000

Tabla 3. COMPOSICIÓN OBTENIDA POR EDX EN %ATÓMICO.

	Material Base	Fundido	Grieta
Si	86.162	96.811	97.874
O	13.838	3.189	2.126

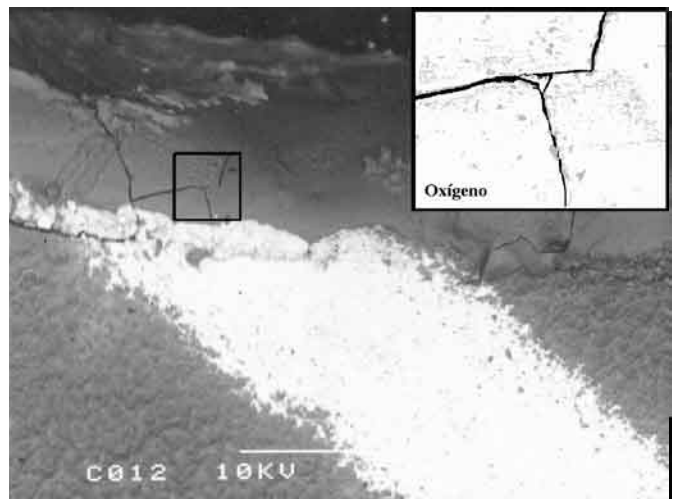


Figura 5. Grietas producidas en la zona de entrada del Haz Láser (x220). Ampliación de la zona de grietas en la que se observa la distribución de oxígeno

posiciones sustitucionales en la red de silicio [11-12]. Durante el proceso de corte migra, produciéndose segregaciones que quedan retenidas en el fundido debido a la rapidez del enfriamiento que no permite que este abandone la matriz.

En la Figura 2, también puede apreciarse una pequeña zona situada entre el fundido y un colector de plata. Esta intercara, es una zona de movilización de elementos tanto de los que forman parte de la cara superior de la oblea como los de la posterior. Estos elementos precipitan en la matriz en forma metálica debido a la congelación de un sistema de no-equilibrio, con lo que se forman aleaciones Plomo-Plata como se puede observar en la cuantificación mostrada en la Figura 4.

En la imagen de electrones retrodispersados mostrada en la Figura 5, puede observarse la aparición de grietas en el fundido. En la tabla 3, se presenta el porcentaje de oxígeno en distintas zonas. En primer lugar se observa una alta presencia de oxígeno en el material base, correspondiente al recubrimiento de TiO<sub>2</sub> que lleva la placa solar para atenuar la reflexión. Si pasamos al fundido la presencia de oxígeno disminuye, al igual que en el caso del interior de la grieta, pero este oxígeno no debería de estar presente, tendríamos que haber obtenido silicio puro, ya que por un lado las temperaturas de trabajo son tan altas que el TiO<sub>2</sub> debería haberse evaporado (Temperatura Evaporación: 2.500°C) y por otro, al haber una presión parcial de oxígeno muy baja, se formarían subóxidos de Titanio cuyo punto de ebullición es inferior al del TiO<sub>2</sub>, por lo que se evaporaría rápidamente, lo que asegurara su eliminación de la matriz. A partir del mapa composicional de Rayos X del oxígeno existente en la zona que nos ocupa, puede observarse como las altas concentraciones de este se encuentran presentes en zonas próximas a estas grietas (Figura 5), por tanto, y a la vista de los datos obtenidos, es muy probable que se hayan formado

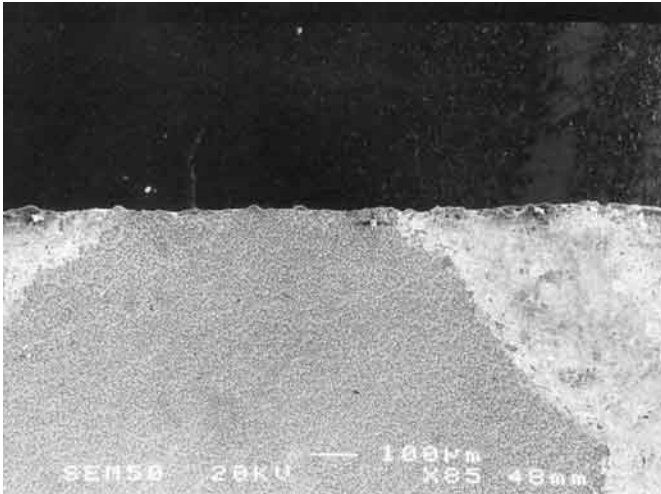


Figura 6. Superficie de Salida del Haz Láser

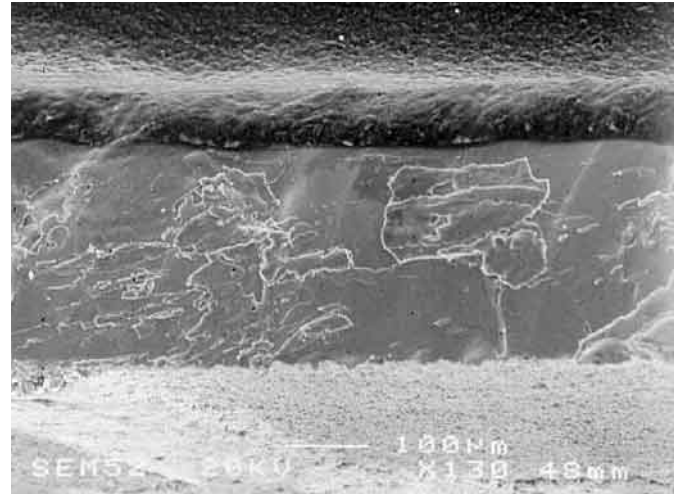


Figura 7. Borde del Corte

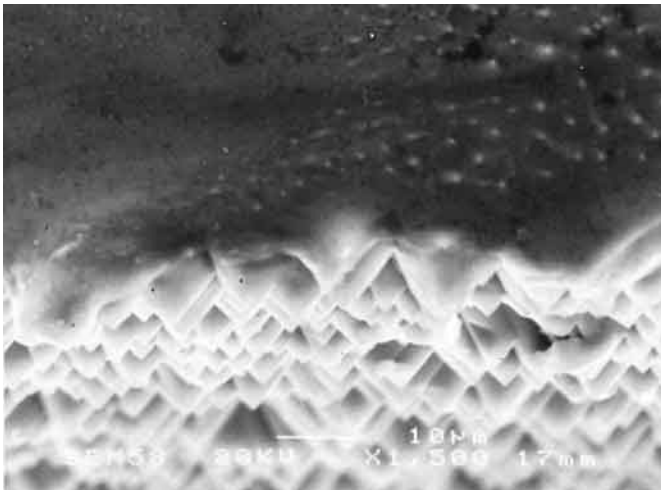


Figura 8. Zona de Salida del Haz Láser.

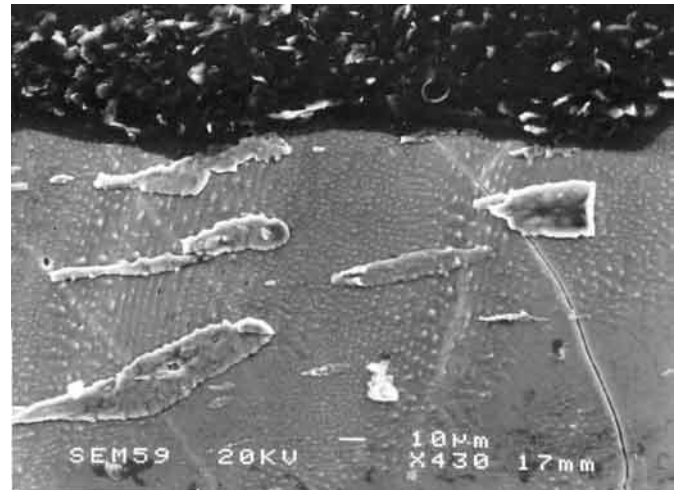


Figura 9. Fundido pegado al borde del corte y grietas producidas por el gradiente térmico producido en el proceso de corte.

nucleoides de cristobalita en el fundido, debido a la presencia residual de oxígeno en el gas de protección por aspiración de aire, que son los responsables de la fractura del fundido.

### 3.2. Superficie de Salida del Haz

Se obtiene un corte limpio de rebabas y de geometría homogénea (Figura 6). Se pueden observar pequeñas acumulaciones de fundido en los picos que aparecen debido a la distribución de pulsos. Este efecto se puede disminuir aumentando la distribución temporal y la energía aplicada en el proceso de corte.

### 3.3. Borde de Corte

En la Figura 7, se observa el borde del corte, en el que aparece el fundido producido en la zona de entrada del haz y a continuación el material con trozos de fundido adheridos. La ampliación de la zona de salida del haz demuestra que no aparece deformación en las pirámides de silicio (Figura 8), por lo que no se merma el acoplamiento óptico de la célula. Asimismo, no existen evidencias de la presencia de elemen-

tos conductores que pudiesen cortocircuitar o disminuir el rendimiento fotoeléctrico de la misma. Este punto ha sido confirmado posteriormente por medidas realizadas en un simulador solar.

Examinando la zona de entrada del haz (Figura 9), y más concretamente la zona próxima al fundido, se observan trozos de material fundido pegados y las inclusiones antes comentadas, junto con una serie de grietas que siguen un patrón definido, concretamente se orientan en el sentido de avance del haz láser. Estas grietas son debidas al choque térmico que se produce en el material en el momento del corte [4].

## 4. CONSIDERACIONES FINALES

A la vista de los datos anteriores se puede concluir que las condiciones óptimas de procesamiento utilizándose nitrógeno como gas de protección son: 950 W, 187.5 Hz, y una velocidad de 1.8 m/min. Así mismo, es necesario minimizar el choque térmico que experimenta el material durante el proceso. El sistema de procesamiento propuesto permite el perfilado de formas de geometría irregular y pequeño tamaño. El rendimiento fotoeléctrico de la oblea no se ve afectado por el corte lo que valida este nuevo método.

Se podría reducir en gran extensión la producción de microgrietas, con un precalentamiento de la oblea a temperaturas del orden de 60-70°C, con lo que se disminuye la velocidad de enfriamiento y consecuentemente el choque térmico, así como con una mayor inertización de la zona afectada térmicamente, conseguida mediante soplado lateral, lo que disminuiría la formación de óxidos. Actualmente ambas vías están siendo desarrolladas.

## BIBLIOGRAFÍA

1. D. Belforte y M. Levitt (Eds.), *The Industrial Laser Handbook*, Springer-Verlag, New York-Berlin-Heidelberg, (1992).
2. W. Sokolowski, G. Herziger y E. Beyer. *High Power Laser Systems and Applications*, SPIE, 1020, 96 (1988).
3. N. Goto, H. Ito, "High-average-power 266nm generation of Nd:YAG Laser and its industrial applications", *Laser Eng.* 21, 885-893 (1993)
4. Yu. V. Khlopkov, "Laser cutting of glass for light filters for TV and personal computers", *Steklo Keram.* 7-8, 33-34 (1994)
5. I. Black, "Laser cutting decorative glass, ceramic tile", *Am. Ceram. Soc. Bull.* 77, 53-57 (1998)
6. J. Pascual Cosp, A. J. Ramírez del Valle, J. García Fortea, P. J. Sánchez Soto. "Evolución térmica de un material cerámico procesado con un láser de Nd:YAG", *Boletín Sociedad Española Cerámica y Vidrio.* Vol. 40, n° 5, 369-376 (2001)
7. J. Hlavac, "The technology of glass and ceramics: an introduction", Elsevier Science Publishers, New York, (1983).
8. J. M. Orza Segade (Coordinador), "Láseres y sus aplicaciones", Edita C.S.I.C., Servicio de Publicaciones, Colección Nuevas Tendencias, Vol. 1, Madrid, (1986)
9. N. Rajendram, M. B. Pate, "The thermal response of a material during a laser-cutting process", *Proceedings of the 6th International Congress on Applications of Lasers and Electro-optics*, Editor S. L. Rean, San Diego, California, 129-134 (1987)
10. A. Ramírez, J. Pascual, J. Laserna, M. V. Moya, J. Zapatero y T. Fernández. "Efecto de las condiciones de corte de un láser de Nd:YAG sobre la estructura y microcomposición de la superficie de aceros inoxidables". *Revista de Metalurgia*, Vol. 34, 220-226. (1998)
11. H. J. Möller. "Semiconductors for solar cells", Artech House, Boston, 125-139 (1993)
12. D. Romero and J. J. Laserna. "Surface and tomographic distribution of carbon impurities in photonic-grade silicon using laser-induced breakdown spectrometry" *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, Vol. 13, 557-560 (1998)

Recibido: 28.05.02

Aceptado: 24.01.03



# UNITECR 2003 CONGRESS

**EcoRefractory for the Earth**

**8th Biennial Worldwide Conference on Refractories**

**Osaka International Convention Center Osaka, Japan**

Hosted by  
TARJ. Technical Association of Refractories, Japan  
in conjunction with the 16th TARJ Annual colloquium

**October 19-22, 2003**



Secretariat of UNITECR '2003 Congress:  
Dr.H.Nishio  
c/o The Technical Association of Refractories,Japan.  
New Ginza Bldg., 7-3-13 Ginza,  
Chuo-ku, Tokyo 104-0061, Japan  
Phone: +81-3-3572-0705 Fax: +81-3-3572-0175

**CALL FOR PAPERS**  
**Deadline for the abstract:**  
**October 31, 2002**

**Deadline for the paper:**  
**May 31, 2003**

[www.plando.co.jp/unitecr2003](http://www.plando.co.jp/unitecr2003) · [hideo-komatu@nifty.com](mailto:hideo-komatu@nifty.com)