

Fig. 5: Reflectancia teórica a 300 K de Mo macizo sin y con una capa de  $Al_2O_3$  de 0,084  $\mu m$  de espesor. Las constantes ópticas del Mo se obtuvieron de la Ref. 17.

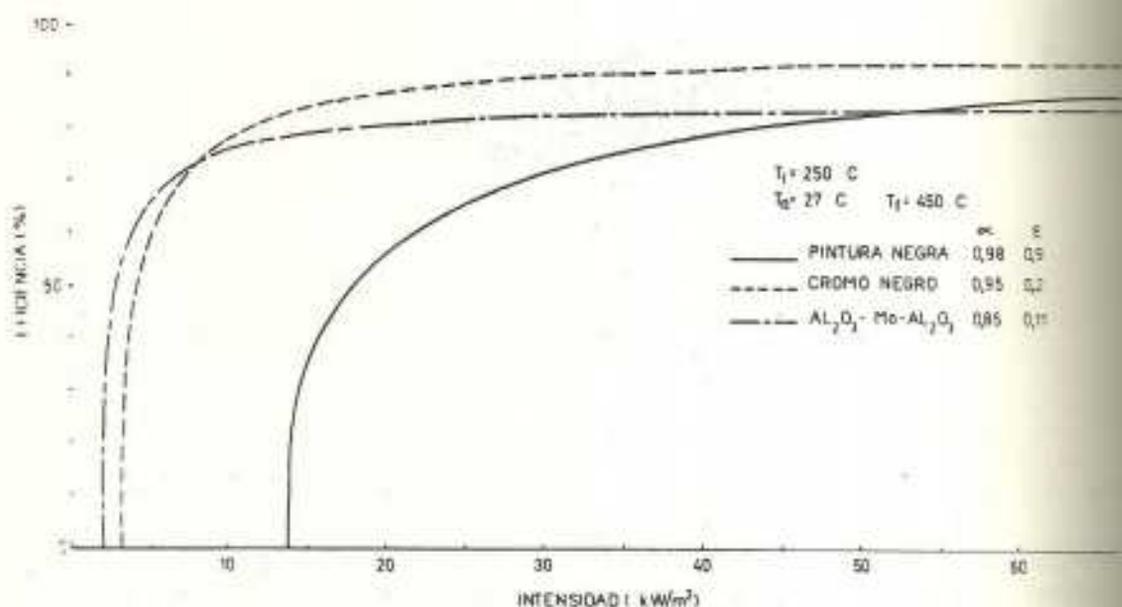


Fig. 6: Eficiencia de tres superficies selectivas reales: cromo negro, AMA y una pintura negra a base de  $Cr_2O_3$ , en función de la intensidad incidente sobre el receptor.  $T_1$  es la temperatura inicial del fluido,  $T_2$ , la temperatura final y  $T_3$ , la temperatura equivalente de la atmósfera.

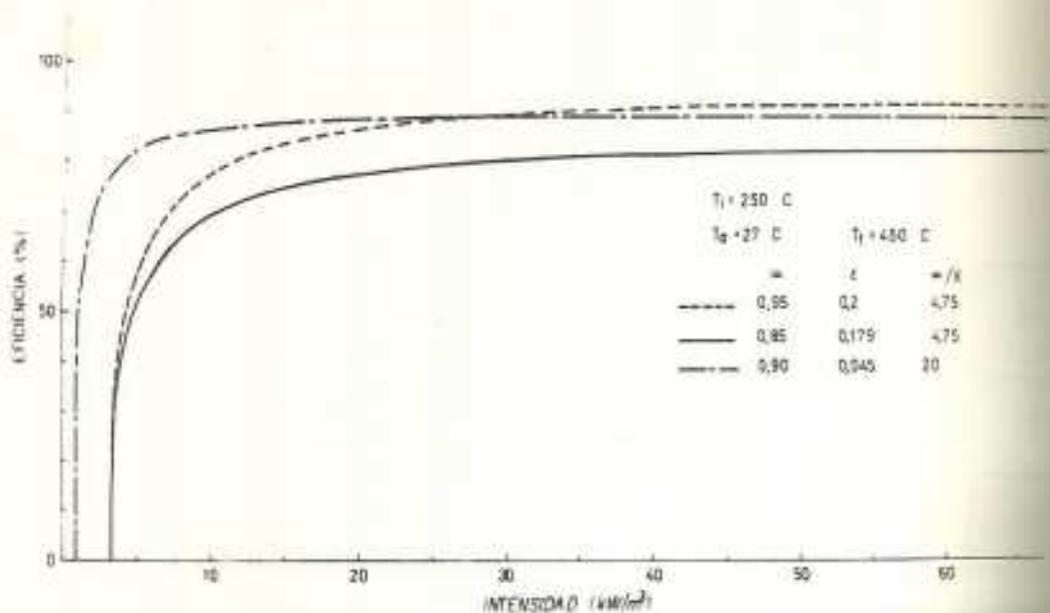


Fig. 2: Eficiencia de tres superficies selectivas en función de la intensidad incidente sobre el receptor ( $I \times C$ ).  $T_i$  es la temperatura inicial del fluido,  $T_f$ , la temperatura final y  $T_a$ , la temperatura equivalente de la atmósfera.

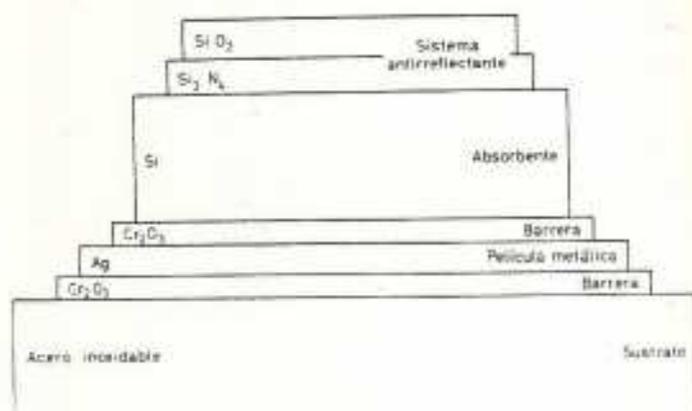


Fig. 3: Corte esquemático de una superficie selectiva que consta, básicamente, de un semiconductor sobre un metal. Las capas sobre el semiconductor actúan como sistema antirreflectante. Las capas entre el sustrato y el metal y entre éste y el semiconductor actúan como barreras que evitan la difusión. De Ref. 5.

Tabla 2  
Constantes ópticas de superficies selectivas  
para alta temperatura

Composición	Técnica de depósito <sup>a)</sup>	$\alpha$ (T[C]) <sup>b)</sup>	$\epsilon$ (T[C])	T <sub>máx</sub> <sup>c)</sup>	Ref.
Ge <sup>d)</sup>	EG	0,91	0,5 (350)	?	3
PbS <sup>d)</sup>	EV	0,98	0,3 (300)	300	3
SiO <sub>2</sub> -Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> -Si-Ag	DFV	0,72 (20) 0,75 (500)	0,048 (20) 0,06 (500)	550	5, 16
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	pintura <sup>e)</sup>	0,98	0,9 (900)	900	3
Cr <sub>x</sub> O <sub>y</sub> -Ni <sup>g)</sup> (cromo negro)	DE	0,95	0,2 (350)	350	3
		0,93	0,12 (100)	450	4
		0,98	0,21 (300)	350	10
		0,87	0,03 (50)	300	11
		0,92	0,08 (50)		
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Mo-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	EV	0,85	0,11 (500)	900	3, 4
		0,95	0,4 (350)		

- a) Las abreviaturas utilizadas corresponden a las siguientes técnicas de depósito: EG, evaporación en medio gaseoso; EV, evaporación al vacío; DFV, depósito en fase vapor; DE, depósito electrolítico.
- b) En la bibliografía consultada, en general, no se especifica a qué temperatura corresponde la absorbancia solar calculada.
- c) Temperatura máxima de estabilidad.
- d) En la referencia correspondiente no se especifica el sustrato.
- e) Pintura a base de sílicona provista por Tradename, Tempil Co., So. Plainfield, NJ 07080.
- g) Existen cromados negros comerciales con propiedades ópticas y de estabilidad apropiadas. Se puede citar, por ejemplo, el Harshaw Chemical Co. Black Chrome (Ref. 3).

Tabla 1  
Absorbancia solar teórica<sup>a)</sup>

Semiconductor <sup>b)</sup>	Espesor (μm)	Capas <sup>c)</sup> antirreflectantes	Absorbancia solar
Si	2	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	0,52
Si	2	SiO <sub>2</sub> -Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	0,52
Si	6	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	0,61
Si	12	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	0,66
Ge	1	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	0,76
Ge	1	SiO <sub>2</sub> -Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	0,77
Ge	3	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	0,78
Ge	3	SiO <sub>2</sub> -Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	0,80
Ge	6	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	0,78
Ge	6	SiO <sub>2</sub> -Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	0,80
Si y Ge	2 y 0,5	4 capas <sup>d)</sup>	0,83

- a) En todos los sistemas de multicapas estudiados, el metal de base considerado es Ag. Sus constantes ópticas se tomaron de la Ref. 14. La absorbancia solar se obtuvo integrando sobre el espectro solar AM1.
- b) Se utilizaron las constantes ópticas de depósitos monocristalinos de Si y Ge a una temperatura de 300 K, dadas en las Refs. 12 y 13.
- c) Las capas antirreflectantes consideradas, excepto la última tabulada, son de cuarto de onda para  $\lambda=0,63 \mu\text{m}$ . Las constantes ópticas de SiO<sub>2</sub> y Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> se obtuvieron de la Ref. 7.
- d) En este caso se trata de un sistema de cuatro capas antirreflectantes de cuarto de onda para  $\lambda=0,65 \mu\text{m}$  y de índices  $n_1=1,43$ ,  $n_2=1,82$ ,  $n_3=2,20$  y  $n_4=2,79$ , propuesto por Seraphin<sup>5)</sup>.

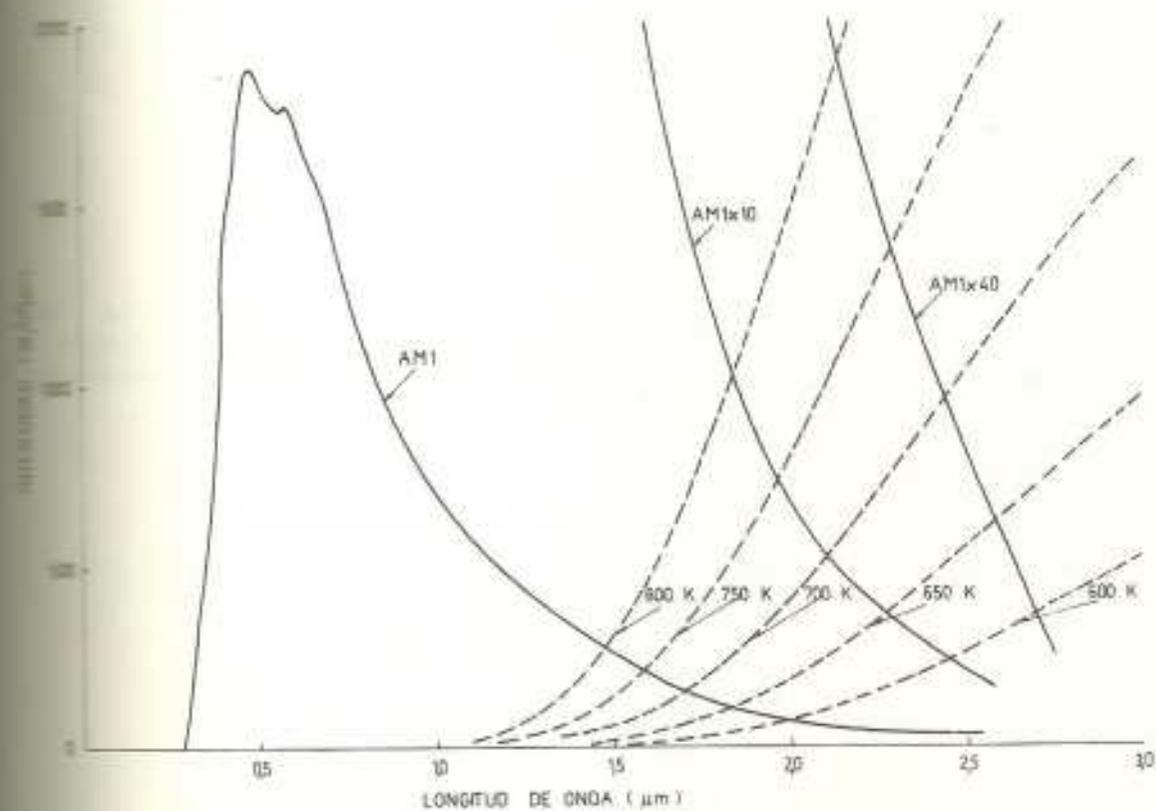


Fig. 1: Espectro de radiación solar AM1 multiplicado por varios factores de concentración (1, 10 y 40), juntamente con los espectros de radiación de cuerpo negro (ley de Planck) para distintas temperaturas.

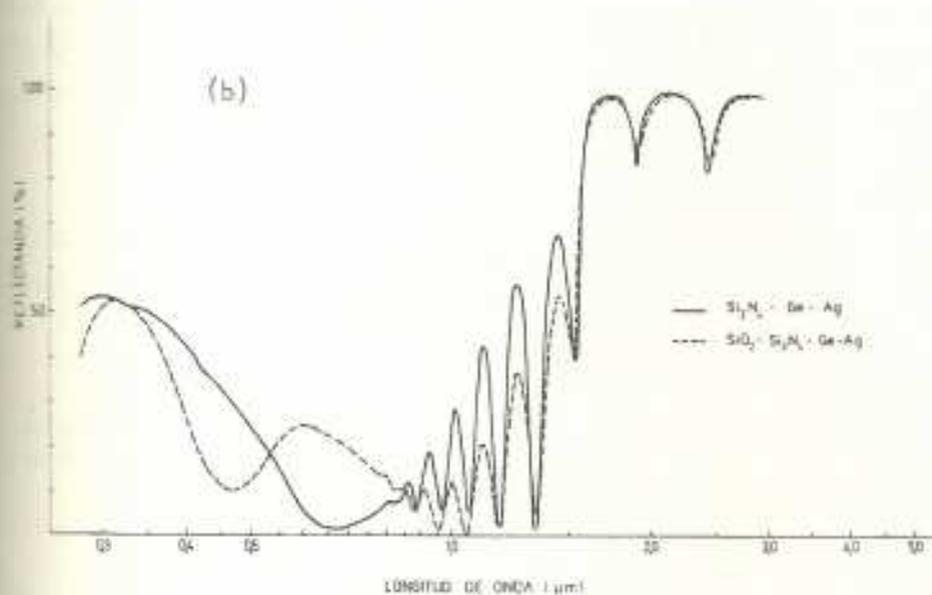
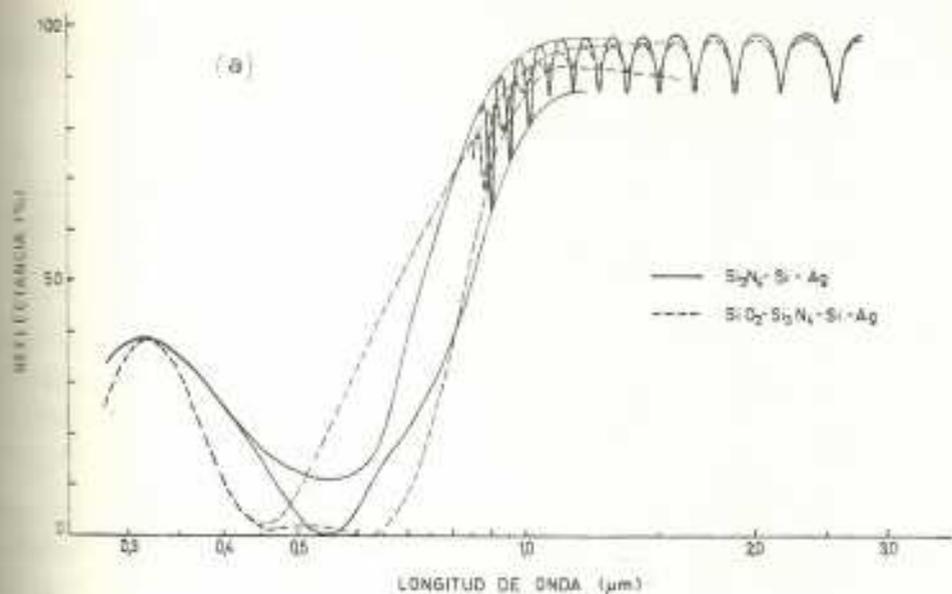


Fig. 4: Reflectancia teórica a 300 K de un sistema de multicapas compuesto por un semiconductor sobre Ag, con una ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) y dos ( $\text{SiO}_2\text{-Si}_3\text{N}_4$ ) capas antirreflectantes de cuarto de onda para  $\lambda = 0,63 \mu\text{m}$ :  
 (a) capa semiconductor de Si de 2  $\mu\text{m}$  de espesor. Entre 0,3 y 1  $\mu\text{m}$  se indica, por simplicidad, la envolvente de las oscilaciones de la curva debidas a efectos de interferencia;  
 (b) capa semiconductor de Ge de 1  $\mu\text{m}$  de espesor.

## Referencias

- 1) J.A.Duffie y W.A.Beckman, "Solar Energy Thermal Processes" (Wiley and Sons, New York.) (1975).
- 2) F. de Winter, Memorandum interno 342-72-B-111 del Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California (1972).
- 3) D.M.Mattox, G.J.Kominiak, R.R.Sowell y R.B.Pettit, "Selective Solar Photothermal Absorbers", Informe SAND75-0361 de Sandia Laboratories, Albuquerque, New Mexico (1975).
- 4) R.E.Peterson y J.W.Ramsey, "Thin Film Coatings in Solar-thermal Power Systems", J. Vac. Sci. Technol. 12, 174 (1975).
- 5) B.O.Seraphin y A.B.Meinel, en "Optical Properties of Solids-New Developments", editado por B.O.Seraphin (North Holland Publ. Co), p. 927 (1976).
- 6) B.O.Seraphin, "Chemical Vapor Deposition Research for Fabrication of Solar Energy Convertors", Informe NSF/RANN/SE/GI-36731X/PR/73/3 del Optical Sciences Center, University of Arizona, Tucson, Arizona (1973).
- 7) B.O.Seraphin, "Chemical Vapor Deposition Research for Fabrication of Solar Energy Convertors", Informe NSF/RANN/SE/GI-36731X/PR/74/2 del Optical Sciences Center, University of Arizona, Tucson, Arizona (1974).
- 8) J.Jurisson, R.Peterson y H.Y.Mar, "Principles and Applications of Selective Solar Coatings", J. Vac. Sci. Technol. 12, 1010 (1975).
- 9) N.V.Andreeva, "Black Chromium Plating", J. Appl. Chem. USSR 42, 755 (1969). (Zhur. Prikl. Khim. 42, 792 (1969)).
- 10) R.B.Pettit y R.R.Sowell, "Solar Absorptance and Emittance Properties of Several Solar Coatings", J. Vac. Sci. Technol. 13, 596 (1976).
- 11) P.M.Driver, R.W.Jones, C.L.Riddiford y R.J.Simpson, "A New Chrome Black Selective Absorbing Surface", Solar Energy 19, 301 (1977).
- 12) T.S.Moss, "Optical Properties of Semiconductors" (Butterworth, Londres) (1959).
- 13) H.R.Philipp y E.A.Taft, "Optical Constants of Ge in Region 1 to 10 eV", Phys. Rev. 113, 1002 (1959).
- 14) "International Critical Tables of Numerical Data. Physics, Chemistry and Technology" V, editado por E.W.Washburn (McGraw-Hill Book Company, Inc., Nueva York y Londres), p. 249 (1929).
- 15) N.Robinson, "Solar Radiation" (Elsevier Publ. Co., Amsterdam) (1966).
- 16) H.S.Gurev, "Optical Properties of Thin Film Refractory Metals", trabajo realizado en el Optical Sciences Center, University of Arizona, Tucson, Arizona.
- 17) B.T.Barnes, "Optical Constants of Incandescent Refractory Metals", J. Opt. Soc. Amer. 56, 1546 (1966).

- 4) Con los concentradores en desarrollo en la CNEA se esperan alcanzar temperaturas de 400-500 C con factores de concentración superiores a 40. Para estas condiciones:
- a) se descarta probablemente al cromo negro por inestabilidad a la temperatura de trabajo. De las otras dos alternativas estudiadas, ninguna de ellas se destaca claramente. La superficie selectiva AMA presenta propiedades ópticas apropiadas, pero los métodos de fabricación son complejos y costosos. Las superficies de Si o Ge sobre Ag, presentan los siguientes inconvenientes: por un lado, no alcanzan valores de absorbancia solar suficientemente elevados (los valores más altos para Si sobre Ag citados en la bibliografía <sup>16</sup>) no exceden 0,75); por otro lado, de los dos métodos de fabricación citados en este trabajo, el de depósito en fase vapor, que es probablemente el más atractivo para fabricación en serie, se encuentra aún en etapa de laboratorio.
  - b) desde el punto de vista económico, no es obvio deducir si el aumento de eficiencia que se puede lograr con una superficie selectiva, por ejemplo, AMA respecto de una pintura negra estable, justifica la inversión requerida para su desarrollo y el aumento que produce en el costo total del receptor en el cual se la utilizará.

#### Desarrollos futuros

Se efectuará una evaluación comparativa de las superficies selectivas y las estructuras antirradiantes, para el caso de los concentradores que nos ocupa, tanto desde el punto de vista de la eficiencia, cuanto de la complejidad de fabricación de ambos sistemas.

#### Agradecimientos

Agradecemos al Sr. Rubén Nicolás su estrecha participación durante la elaboración del trabajo así como al Dr. Walter Scheuer por su activa colaboración en la discusión del mismo. Asimismo, agradecemos a la Prof. Alicia Díaz Romero la buena disposición con que nos asesoró para asegurar la correcta marcha de los programas.

5-6 % sobre el valor obtenido con un sustrato de níquel pulido <sup>10)</sup>. Una ventaja adicional del sustrato rugoso es que la absorbancia solar  $\alpha$  varía más lentamente en función del ángulo de incidencia <sup>\*)</sup>. Variando las condiciones y el tiempo de depósito, se pueden obtener tanto superficies con alta selectividad como con alta absorbancia solar y menor selectividad. Entre estas últimas, se pueden citar <sup>3)</sup> como valores característicos los siguientes:

$$\alpha = 0,95 \text{ (20 a 350 C)}, \epsilon = 0,2 \text{ (350 C)}, \text{ espesor } 0,15 - 0,18 \mu\text{m}.$$

Ensayos de estabilidad de muestras de cromo negro calentadas en aire indicaron <sup>10)</sup> disminuciones de la absorbancia solar: 2,5 % para 350 C durante 120 h y 10 % para 400 C durante 70 h (sin variación de la emitancia térmica). En aire o vacío pobre, a temperaturas superiores a 450 C, todo el cromo se convierte en  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  y el sustrato de níquel se oxida, deteriorando entonces las propiedades selectivas de la superficie <sup>3)</sup>. Esta es la principal desventaja del cromo negro con respecto a las otras superficies selectivas consideradas en párrafos anteriores. Por el contrario, tiene la gran ventaja de ser más económico y de más fácil fabricación en cantidades industriales.

En la Fig. 6 se comparan las eficiencias (ecuación (7)) de: cromo negro, una superficie selectiva AMA y una pintura negra a base de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , de gran estabilidad a alta temperatura.

En la Tabla 2 se enumeran las propiedades ópticas de las principales superficies selectivas para alta temperatura.

## 6. Conclusiones

- (1) La elección de una superficie selectiva apropiada depende fundamentalmente de la temperatura de operación y del factor de concentración. Si se desean lograr altas temperaturas de trabajo (400-500 C) con bajos factores de concentración es imprescindible utilizar superficies con alta selectividad; si se las obtiene, en cambio, con factores de concentración elevados (superiores a 40) es más importante una alta absorbancia solar.
- (2) Para temperaturas de operación menores que 350 C, se puede utilizar cualquiera de las tres superficies selectivas estudiadas en el presente trabajo, siendo el cromo negro el más atractivo, tanto desde el punto de vista económico como por sus propiedades ópticas.
- (3) En el intervalo de temperatura 350-500 C, de las superficies estudiadas, las estables son las de Si o Ge sobre Ag y las de  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Mo-Al}_2\text{O}_3$  sobre un sustrato de Mo. Con respecto al cromo negro, la información de que disponemos no es concluyente acerca de la estabilidad del mismo en el intervalo 350-450 C; se deteriora a temperaturas superiores a 450 C.

\*)  $\alpha(75^\circ)/\alpha(0^\circ) = 0,78$  sustrato de níquel pulido,  
 $\alpha(75^\circ)/\alpha(0^\circ) = 0,92$  sustrato de níquel rugoso.

## III. SUPERFICIE SELECTIVA COMPUESTA POR $Al_2O_3$ -Mo- $Al_2O_3$ (AMA)

El sistema de multicapas AMA, construido por evaporación al vacío, fue inicialmente diseñado para aplicaciones espaciales<sup>4)</sup>, en las que se prevían condiciones de operación a 860 C con factores de concentración de 50. Entre las superficies selectivas para alta temperatura, la de constitución AMA es probablemente la más estable, ya que soporta<sup>4,8)</sup> temperaturas superiores a 900 C sin deteriorarse.

Las capas de  $Al_2O_3$ -Mo- $Al_2O_3$ , depositadas generalmente sobre un sustrato de Mo, tienen propiedades selectivas debido a la combinación de una pequeña selectividad del Mo con efectos de interferencia óptica producidos por las capas de dieléctrico. La capa central de Mo, de  $\sim 200 \text{ \AA}$ , es semi-transparente y puede ser descripta probablemente como  $MoO_x$ , ya que el depósito se realiza en una atmósfera que contiene  $O_2$ . Una superficie selectiva de este tipo, con una longitud de onda de corte de aproximadamente  $1,5 \mu m$ , tiene<sup>4)</sup> una absorbancia solar de 0,85 y una emitancia térmica de 0,22 a 1000 C, (0,11 a 500 C). Cambiando los espesores de las capas se puede lograr<sup>3,4)</sup> una alta absorbancia sobre todo el espectro solar hasta  $2 \mu m$ , pero con un aumento de la emitancia ( $\alpha = 0,95$ ,  $\epsilon(350 \text{ C}) = 0,4$ ).

No pudimos estudiar teóricamente la reflectancia en función de la longitud de onda de la superficie selectiva AMA por falta de datos de las constantes ópticas de películas delgadas de metal de distintos espesores en el intervalo de longitudes de onda necesario. Calculamos las curvas de reflectancia del Mo macizo sin y con una capa de  $Al_2O_3$  de distintos espesores (ver Fig. 5). Se observa que el sustrato de Mo tiene escasas propiedades selectivas, que aumentan, por efectos de interferencia, al agregar una lámina de dieléctrico de espesor adecuado.

Si bien este tipo de superficie selectiva posee propiedades ópticas apropiadas y es a la vez muy estable a alta temperatura, los métodos de fabricación actualmente conocidos (por ejemplo, evaporación al vacío) no la hacen atractiva desde el punto de vista de producción masiva debido al elevado costo y complejidad de aquéllos.

## III. CROMO NEGRO

El cromado negro que se usa comercialmente en decoración y terminación de superficies posee propiedades selectivas<sup>3)</sup>. Además, por ser de uso corriente en la industria, constituye potencialmente una superficie selectiva de bajo costo. Consiste, básicamente, en un depósito electrolítico de compuestos de cromo sobre un sustrato, usualmente de níquel, cobre o aluminio (este último con un depósito previo de una delgada película de níquel). El depósito está compuesto por partículas de cromo mezcladas con óxidos de cromo. La relación entre átomos de cromo y de oxígeno varía linealmente a través de la capa, con la más alta composición de cromo en la interfase (10:1) y la más baja en la superficie (1:1). Según la Ref. 9, el proceso de absorción se debe a que las pequeñas partículas de cromo embebidas en la película de óxido forman centros de absorción.

En lo que sigue nos limitamos a considerar sustratos de níquel. Si su superficie es rugosa, la absorbancia solar del cromo negro aumenta

sistemas antirreflectantes compuestos por una, dos y cuatro capas (la mayoría de estas combinaciones fueron propuestas y analizadas en la Ref. 6). En cada caso obtuvimos, mediante computadora, la reflectancia en función de la longitud de onda y la absorbancia solar, para distintos espesores, tanto del semiconductor como de las capas antirreflectantes. Las constantes ópticas de Si y Ge utilizadas en el cálculo corresponden a una temperatura de 300 K y fueron extraídas de las Refs. 12 y 13; las constantes ópticas de la Ag fueron obtenidas de la Ref. 14. Los cálculos de la absorbancia solar se realizaron integrando sobre el espectro AM1 dado en la Ref. 15 para varios ángulos de incidencia hasta  $60^\circ$ ; en este intervalo, la absorbancia solar de los sistemas de multicapas considerados es prácticamente invariante. Con respecto a las capas antirreflectantes, utilizamos generalmente las constantes ópticas de  $\text{SiO}_2$  y  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , obtenidas de la Ref. 6.

Las Figs. 4.a y 4.b muestran, respectivamente, las curvas de reflectancia resultantes en función de la longitud de onda para una capa de Si de  $2 \mu\text{m}$  y para una de Ge de  $1 \mu\text{m}$ , ambas sobre Ag y con una y dos capas antirreflectantes. Comparando las curvas correspondientes a  $2 \mu\text{m}$  de Si con las calculadas por Seraphin<sup>7)</sup>, se observa un corrimiento de la longitud de onda de corte de aproximadamente  $0,2 - 0,3 \mu\text{m}$  hacia longitudes de onda menores. En la Tabla 1 damos los valores de la absorbancia que obtuvimos para varios sistemas de multicapas. Los resultados para una ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) y dos capas ( $\text{SiO}_2$  y  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) antirreflectantes, parecen indicar que en la práctica no se justifica utilizar más de una de dichas capas. Todos los sistemas con únicamente Si como semiconductor resultan con una baja absorbancia solar. Esto se debe a que el ancho de la banda prohibida en el Si corresponde a una longitud de onda de  $1,1 \mu\text{m}$ , o sea bastante menor que la longitud de onda de corte óptima (aproximadamente  $2 \mu\text{m}$ ). Para lograr una absorbancia solar alta conviene utilizar sistemas combinados de Si y Ge, o directamente de Ge, que tiene una energía de corte más apropiada. Aun así, los valores obtenidos no son mayores que 0,8.

Los valores experimentales de la absorbancia solar, para diversas temperaturas de operación, citados en la bibliografía (ver Tabla 2) alcanzan valores mayores que los que obtuvimos teóricamente para depósitos monocristalinos a  $T = 300 \text{ K}$  (ver Tabla 1). Esto, entre otros efectos, puede deberse a la fuerte dependencia de las constantes ópticas respecto de la pureza y demás características del depósito.

Este tipo de superficie selectiva se puede construir por evaporación al vacío y por depósito en fase vapor. De estas dos técnicas, la última puede ser en un futuro cercano la más económica y, a la vez, más práctica para fabricación de superficies en cantidades industriales. Ambas técnicas están siendo estudiadas, entre otros, por el Optical Sciences Center de la Universidad de Arizona<sup>6,7)</sup>, donde se comprobó que las superficies selectivas resultantes son estables hasta temperaturas de por lo menos  $550 \text{ C}$ . No se ha desarrollado aún, sin embargo, la tecnología necesaria para la fabricación en serie y a costos aceptables de superficies selectivas con las propiedades ópticas apropiadas que su empleo requiere.

encia tiende a un valor límite dado por la absorbancia solar  $\alpha$  (ver ec.

En la Fig. 2 se dan las curvas de eficiencia en función de la intensidad incidente sobre el receptor para tres superficies selectivas. Se eligieron valores de temperatura de interés para generación de electricidad por conversión fototérmica ( $T_i = 250$  C,  $T_f = 450$  C). Se observa que para dos superficies con igual valor de  $\alpha/\epsilon$ , la más eficiente es aquella con mayor absorbancia solar.

Se concluye, entonces, que la elección de una superficie selectiva apropiada depende fuertemente del factor de concentración. Para factores de concentración mayores que 40 suele ser más importante una alta absorbancia solar que una alta selectividad.

### 5. Superficies selectivas para alta temperatura

Dado que para la generación de electricidad por conversión fototérmica de energía solar es conveniente obtener un fluido a temperatura elevada (400 a 500 C), la superficie receptora debe ser estable a estas temperaturas.

Muchas de las superficies que aparecen en la bibliografía <sup>3,4</sup> se deterioran a temperaturas superiores a 250-300 C. De la evaluación de la información a nuestra disposición, se destacan esencialmente tres superficies selectivas para alta temperatura: Si o Ge sobre Ag (Refs. 5-7), un sistema de multicapas compuesto por  $Al_2O_3$ -Mo- $Al_2O_3$  (Refs. 4,8) y el denominado "cromo negro" (Refs. 3, 9-11).

### 6. SEMICONDUCTOR SOBRE METAL

Para este tipo de superficies selectivas se debe utilizar un semiconductor opaco a la radiación solar y transparente a la infrarroja. Su ancho de banda prohibida debe estar entonces comprendido entre aproximadamente 0,5 eV (2,5  $\mu$ m) y 1,2 eV (1  $\mu$ m). El metal de base debe tener una alta reflectancia en el intervalo del espectro correspondiente al infrarrojo térmico. De esta forma, el conjunto tiene una alta absorbancia solar con una baja emitancia térmica.

Los semiconductores más indicados son <sup>3)</sup>: Si (1,1 eV), Ge (0,7 eV), SiS (0,4 eV); el último es el menos apropiado para ser utilizado como absorbente solar, debido a que se descompone al ser expuesto a radiación ultravioleta en presencia de oxígeno. La plata es uno de los metales con alta reflectancia más comúnmente utilizado. Además de los dos elementos básicos, el semiconductor y un metal, existen <sup>5)</sup> generalmente, por lo menos, tres capas más (ver Fig. 3). Las dos capas de, por ejemplo,  $Cr_2O_3$  no modifican sustancialmente las propiedades ópticas del sistema, y son las encargadas de evitar la interdifusión entre capas y la posible aglomeración del metal. Por el contrario, las capas depositadas sobre el semiconductor actúan como sistema antirreflectante, aumentando la absorbancia solar del conjunto.

Hemos realizado un análisis teórico de distintas combinaciones posibles, usando Ag como reflector, Si o Ge como semiconductor y distintos

volumen de fluido ( $a \times b \times d$ ), se obtiene una ecuación que relaciona la variación de temperatura con el tiempo:

$$a b C_e \delta d l dT = I_s C a d l dt - \sigma \varepsilon (T^4 - T_a^4) a d l dt, \quad (3)$$

donde  $C_e$  es el calor específico del fluido,  $\delta$ , su densidad,  $I_s$ , la radiación solar incidente,  $T$ , la temperatura del elemento de volumen y  $T_a$ , la temperatura equivalente de la atmósfera.

Integrando la ecuación (3) se obtiene el tiempo que debe tardar un diferencial de volumen del fluido en recorrer el receptor para que su temperatura varíe desde  $T_i$  hasta  $T_f$ . En primera aproximación, despreciando las variaciones de  $\alpha$ ,  $\varepsilon$ ,  $C_e$  y  $\delta$  con la temperatura, se obtiene:

$$\frac{\Delta t}{b \delta C_e} = \frac{1}{2 T_M^3 \sigma \varepsilon} \left[ \frac{1}{2} \ln \frac{T_M + T_f}{T_M - T_f} + \operatorname{arctg} \frac{T_f}{T_M} - \frac{1}{2} \ln \frac{T_M + T_i}{T_M - T_i} - \operatorname{arctg} \frac{T_i}{T_M} \right], \quad (4)$$

donde  $T_M$  es la máxima temperatura alcanzable que corresponde al fluido en reposo dentro del receptor y está dada por:

$$T_M = \left[ \frac{\alpha}{\varepsilon} \frac{I_s C}{\sigma} + T_a^4 \right]^{1/4}. \quad (5)$$

Por otra parte, el tiempo necesario para elevar la temperatura desde  $T_i$  hasta  $T_f$  si se aprovechara totalmente la energía incidente sobre el receptor, está dado por:

$$\frac{\Delta t_0}{b \delta C_e} = \frac{\Delta T}{I_s C} = \frac{T_f - T_i}{I_s C}. \quad (6)$$

Teniendo en cuenta que para  $T_i$  y  $T_f$  fijos,  $U$  y  $Q$  son inversamente proporcionales a  $\Delta t$  y  $\Delta t_0$  respectivamente, se tiene la siguiente expresión para la eficiencia:

$$\eta = \frac{U}{Q} = \frac{\Delta t_0}{\Delta t}, \quad (7)$$

que se puede calcular utilizando las ecuaciones (4) y (6).

De la ecuación (5) se deduce que la mínima intensidad ( $I_s \times C$ ) necesaria para alcanzar la temperatura final requerida depende de  $T_a$  y del cociente  $\alpha/\varepsilon$  y no separadamente de  $\alpha$  y  $\varepsilon$ . La eficiencia, por el contrario, depende de  $I_s \times C$ ,  $T_a$ ,  $\alpha$  y  $\varepsilon$  independientemente. En particular, para una temperatura de operación dada, y para valores de  $I_s \times C$  muy altos, la eficiencia

## 1. Introducción

En la Comisión Nacional de Energía Atómica se está desarrollando un programa de generación de electricidad por conversión fototérmica de la energía solar mediante el uso de concentradores, con los que se esperan alcanzar factores de concentración superiores a 40 y temperaturas de operación de 400 a 500 C.

El objeto del presente trabajo es analizar la conveniencia de utilizar superficies selectivas y las características que éstas deben tener para el sistema en desarrollo, frente a la complejidad que su fabricación puede presentar, dado el requerimiento de estabilidad a alta temperatura.

## 2. Propiedades ópticas de una superficie selectiva ideal

Una superficie selectiva ideal debe tener una absorbancia igual a uno en el intervalo de longitudes de onda correspondiente al espectro solar, y una emitancia nula, o sea una absorbancia nula, en la zona de infrarrojo térmico a la temperatura de operación. Debido a la superposición entre ambos espectros, no es posible lograr una absorción total de la radiación solar con una emisión nula, ni siquiera en condiciones ideales.

La longitud de onda de corte óptima  $\lambda_c$  está definida por la intersección de la curva espectral de la radiación incidente (radiación solar por factor de concentración C) con la curva de radiación de cuerpo negro a la temperatura de trabajo (ley de Planck). Depende, por lo tanto, de tres factores: el espectro de radiación solar, el factor de concentración y la temperatura del receptor. En la Fig. 1 se muestran el espectro de radiación solar AM1 y los correspondientes a distintos factores de concentración con la misma distribución espectral, juntamente con los de radiación de cuerpo negro para distintas temperaturas. Para factores de concentración superiores a 30 y temperaturas de operación menores que 500 C, la longitud de onda de corte óptima es mayor que 2  $\mu\text{m}$ .

## 3. Superficies selectivas reales; figura de mérito

Para estudiar las características ópticas de una superficie selectiva real, se definen comúnmente dos parámetros <sup>1)</sup>:

ABSORBANCIA SOLAR  $\alpha$ : cociente entre la energía total absorbida y la energía incidente.

EMITANCIA TÉRMICA  $\epsilon$ : cociente entre la radiación total emitida por la superficie y la emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura.

Consideremos una superficie plana que recibe un flujo de energía  $Q$ , y que tiene una absorbancia solar  $\alpha$  y una emitancia térmica  $\epsilon$ . Mediante una elección apropiada de las condiciones de operación, las pérdidas provocadas por conducción y convección se pueden hacer despreciables respecto de las pérdidas por reflexión e irradiación. Si suponemos que la superficie está a temperatura T en una atmósfera a una temperatura ambiente

temperatura  $T_a$  <sup>3)</sup>, el balance de energía está dado por:

$$U = \alpha Q - \epsilon \sigma (T^4 - T_a^4) \quad (1)$$

donde  $U$  es la energía total por unidad de tiempo disponible para realizar un trabajo.

Se define <sup>1)</sup> la eficiencia  $\eta$  de una superficie selectiva como:

$$\eta = \frac{U}{Q} = \alpha - \frac{\epsilon \sigma (T^4 - T_a^4)}{Q} \quad (2)$$

Resulta evidente de esta expresión que la eficiencia de una superficie selectiva no se puede expresar únicamente en función del cociente  $\alpha/\epsilon$ , el cual suele usarse, erróneamente, como figura de mérito de la superficie. Como se discute en la sección siguiente, para una radiación incidente y una temperatura  $T_a$  dadas, dicho cociente sólo determina la máxima temperatura alcanzable. Dado que  $\eta$  depende también de  $Q$  y  $T$ , variaciones de estos parámetros pueden definir la conveniencia de utilizar una superficie u otra.

#### Análisis de la eficiencia en función de $C$ , $\alpha$ , $\epsilon$ y $T$

El análisis de la eficiencia en función de  $C$ ,  $\alpha$ ,  $\epsilon$  y  $T$  lo hemos realizado para el caso de un concentrador con foco lineal, pero considerando que las conclusiones obtenidas son de aplicación más general. Consideremos un caño de longitud  $l$  y sección rectangular de ancho  $a$  y altura  $b$ , que actúa como receptor; la cara inferior, sobre la que incide la radiación, está recubierta por una superficie con una absorbancia solar  $\alpha$  y una emisividad térmica  $\epsilon$ .

En un colector solar, el fluido que circula dentro del receptor no está a temperatura constante. Por lo tanto, las pérdidas por radiación son variables a lo largo del receptor. Hemos calculado una eficiencia de la superficie selectiva en estado estacionario, independiente de las propiedades del fluido y del caño, con las siguientes hipótesis:

- a) las pérdidas por conducción y convección son despreciables,
- b) los efectos de la conducción térmica a lo largo del receptor son despreciables,
- c) la temperatura en el receptor es sólo función de una coordenada longitudinal, o sea que es constante en toda sección transversal del receptor,
- d) las pérdidas por radiación se producen por la cara inferior del receptor.

Con estas hipótesis, haciendo un balance de energía para un diferencial de

---

<sup>3)</sup> Es necesario definir una temperatura de cuerpo negro equivalente debido a que la atmósfera no se encuentra a temperatura uniforme y que, además, irradia sólo en algunas bandas del espectro. De Ref. 1:

$$T_{eq} = 0,0552 T_{aire}^{1,5}$$

ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE SUPERFICIES SELECTIVAS  
PARA TEMPERATURAS ELEVADAS

Julio Durán\* y J.A. Moragues#  
Comisión Nacional de Energía Atómica  
Avda. del Libertador 8250 - (1429) Buenos Aires

A fin de alcanzar temperaturas de 400-500 C con elevada eficiencia de conversión de la radiación solar en energía térmica utilizando concentradores en desarrollo en la CNEA, se estudian diferentes alternativas posibles para disminuir las pérdidas por radiación en el receptor. Como primer paso, se encaró un análisis de los distintos tipos de superficies selectivas destinado a escoger las más apropiadas, teniendo en cuenta que deben ser estables a la temperatura de trabajo requerida. Asimismo, se realizó un análisis teórico de algunos sistemas de multicapas que se utilizan en la construcción de superficies selectivas, simulando su comportamiento con computadora, obteniéndose en cada caso la curva de reflexión en función de la longitud de onda, como también la absorptancia solar.

To attain temperatures of 400-500 C with high conversion efficiency of solar radiation into thermal energy using the concentrators being developed at the Argentine AEC, we are studying several ways to decrease the radiation losses in the receptor. An analysis of the different types of selective surfaces has been started in order to identify the appropriate ones which have to be stable at the high working temperature required. A theoretical analysis of some multilayer systems used in the construction of selective surfaces was performed by a computer simulation of its behavior, and the reflection curves as a function of the wavelength, as well as the solar absorptance, were obtained.

\*Miembro de la Comisión Nacional de Energía Atómica

#Miembro de la Carrera del Investigador del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas.