

# Estudio de Factibilidad Técnica para la Fabricación de Reflectores Ópticos Solares (OSR) en Venezuela

Ricardo José Morales Ocando\*

\*Agencia Bolivariana para las Actividades Espaciales (ABAE), Dirección de Investigación e Innovación Espacial, Venezuela  
rjmoles@gmail.com

**Resumen:** Se realizó un estudio sobre reflectores ópticos solares, basado en las patentes existentes. En dicho estudio se pudo conocer los requerimientos en materiales, equipos de fabricación y equipos de caracterización para la elaboración y prueba, además de los requerimientos técnicos (espesor y función de cada capa) de dichos dispositivos. También se exploró parcialmente las potencialidades que existen en el país para la fabricación de películas delgadas para los OSRs y generar el desarrollo de la investigación en la industria espacial venezolana.

**Palabras Clave:** reflectores ópticos solares (OSR), espejos de segunda superficie (SSM), absorptividad solar, emisividad térmica, películas delgadas, deposición.

**Abstract:** It was made a study about optical solar reflectors, based upon the existing patents. In this study it could be known the requirements in materials, fabrication and characterization equipments, besides the technical requirements (thickness and each layer function) of the devices mentioned before. It was also partially explored the possibilities that exist in the country to fabricate OSR thin films and to generate the Venezuelan spatial industry research development.

**Keywords:** optical solar reflectors (OSR), second surface mirror (SSM), solar absorptivity, thermal emissivity, thin films, deposition.

## I. INTRODUCCIÓN

La gran mayoría de los satélites que operan en órbitas terrestres, requieren mecanismos de control para balance térmico entre la temperatura del satélite y el ambiente exterior, y entre los dispositivos dentro del satélite. Esto se debe principalmente a la radiación recibida en la superficie exterior, proveniente principalmente del sol y la tierra, y la gran cantidad de calor generado por los equipos, tanto de carga útil como de servicio. A la fecha se han ideado diferentes dispositivos y métodos para el mantenimiento de dicho balance térmico. [1]-[6]

Estos dispositivos han sido clasificados en dos grandes categorías: dispositivos de control térmico pasivos y dispositivos de control térmico activo. [1]

Entre los dispositivos de control térmico pasivo encontramos: cubiertas, aislantes térmicos, rellenos conductores y los materiales de cambio de fase. De estos dispositivos de control térmico suelen tener gran relevancia los utilizados para el control del intercambio de calor entre el interior y el exterior del satélite. [1], [6]

Las zonas que cumplen la función de intercambio de calor con el exterior en los satélites se conocen como radiadores y, principalmente, son zonas exteriores del satélite que están cubiertas con pinturas blancas (las cuales tienen como ventaja el bajo costo, pero un desempeño realmente pobre, particularmente, en misiones de larga duración) y la alternativa, que se ha usado ampliamente, son los reflectores solares ópticos (OSR) o espejos de segunda superficie (SSM), que reflejan la energía solar incidente y radian la energía calórica producida dentro del satélite. [1], [3], [6]

Los OSR o SSM son reflectores ópticos basados en una cubierta fina de metal producida por evaporación o deposición. Estas capas metálicas son depositadas sobre un sustrato, que comúnmente es vidrio, cuarzo o algún polímero, mientras que la cubierta metálica es comúnmente de oro, plata o aluminio. Además del sustrato y la capa metálica, regularmente, se coloca adicionalmente una o varias capas de protección contra la oxidación, estas, de silicio amorfo ( $\text{SiO}_2$ ) o de nitruro de silicio ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ), las cuales además de proteger la capa metálica pueden servir para el mejoramiento de la reflectividad de la capa metálica depositada. [1]-[6]

Desde el año 1999 con la fundación de la Quinta República y la nueva constitución, Venezuela empieza a ver como área fundamental de desarrollo la investigación y utilización del espacio ultraterrestre. En el año 2005 se crea, en primera instancia, el Centro Espacial Venezolano (CEV), generándose los proyectos Venesat-1 y el Centro Venezolano de Percepción Remota. La fase final del proceso institucional se concreta en el año 2008 con la creación de la Agencia Bolivariana para Actividades Espaciales (ABAE) y concretándose el primero de sus proyectos con el lanzamiento en Octubre del mismo año del Venesat-1 (Satélite Simón Bolívar). En este mismo año, se inician los proyectos para el primer satélite de percepción remota y para la creación de un centro de diseño y ensamblaje de satélites, Centro de Investigación, Desarrollo e Innovación Espacial (CIDIE), proveyendo este último, la oportunidad de incursionar en la investigación en el área espacial; todo esto con el fin de aportar en la consecución de la independencia tecnológica de la que se habla en el Plan de la Patria. [7]

Habiendo en el país las instalaciones y dispositivos necesarios para la deposición de materiales sobre sustratos de diferentes tipos, además de las capacidades de estudio de propiedades ópticas, parece viable el estudio y fabricación de reflectores ópticos solares (OSR), los cuales son muy utilizados en la industria aeroespacial, como se explico previamente.

## II. DESARROLLO

### A. Materiales Utilizados.

Los reflectores solares ópticos son dispositivos de películas delgadas compuestos por un sustrato, que sirve como base del

dispositivo, una capa metálica altamente reflectiva y una o varias capas de materiales protectores ante la corrosión, que además pueden servir para mejorar la reflectividad del material metálico utilizado para la reflexión. Entre los materiales utilizados se tienen [1]-[6]:

#### 1) Sustratos:

Los materiales utilizados como sustratos son principalmente Vidrio y Cuarzo, para OSRs no flexibles; y Polímeros como: Teflón, Aclar, Kapton, Policarbonato, Mylar, Tedlar y Tefzel, para OSRs flexibles.

#### 2) Materiales Reflectores:

Existe una gran gama de materiales que presentan una alta reflectividad. Los más utilizados para la fabricación de OSRs son: Aluminio, plata y oro, principalmente, y en menor medida: cobre, cromo y aleaciones de níquel-cromo.

#### 3) Películas protectoras

En muchas ocasiones, como medida de protección o para el mejoramiento de la reflexión de la radiación incidente, suelen usarse ciertos materiales como cubierta de la capa metálica. Entre estos materiales, se mencionan: fluoruro de magnesio, Nicrome o Inconel (aleaciones de Níquel-Cromo), óxido de indio, óxido de indio-estaño, dióxido de cesio y dióxido de titanio.

### B. Tipos De OSRs.

Los OSRs pueden clasificarse principalmente en dos tipos[2]:

#### 1) OSRs Flexibles:

Son OSRs compuestos por una película polimérica termorresistente, que funciona como una capa de radiación del calor. Entre sus ventajas no causan gran problema en su ensamblaje al vehículo espacial. Entre sus desventajas figura la poca durabilidad por el deterioro de las resinas que los componen, debido a la influencia de la radiación

#### 2) OSRs rígidos:

Son OSRs cuya capa de radiación de calor puede estar hecha de vidrio o cuarzo. Este tipo de OSRs son excelentes para su uso en satélites de órbitas geosíncronas debido a su durabilidad, lo cual hace que su desempeño sea mejor a largo plazo. Las desventajas que presentan este tipo de OSRs es que necesitan ser localizados en superficies planas, ya que son difíciles de hacer de forma curva, además que se debe tener extremo cuidado en su manejo.

### C. OSR Patentados

#### 1) Patente US4,666,760 [2]

Platean un OSR flexible que puede ser utilizado como capa más externa de un aislante de múltiples capas. Su invención presentó excelente resistencia a la radiación de electrones, propiedades termoópticas y mecánicas, además de prevenirse el deterioro por radiación ultravioleta.

El OSR propuesto consiste de:

- Una capa de resina bien sea del grupo poly[(4'-foxy-4-carbonyl)difenil-eter] o una polieter amida.
- Una capa reflectora de luz, de plata, aluminio o aleaciones de plata-aluminio.
- Una capa de protección contra la radiación ultravioleta de dióxido de cerio.
- También se incluye una capa eléctricamente conductora.

Entre las características que presenta esta invención, se encuentran:

- Excelente resistencia a los rayos de radiación y los rayos ultravioletas.
- Absortividad solar ( $\alpha_s$ ) menor de 0.16.
- Emisividad térmica ( $\epsilon$ ) mayor de 0.77.

La siguiente figura muestra un perfil de la invención de este grupo de investigadores:

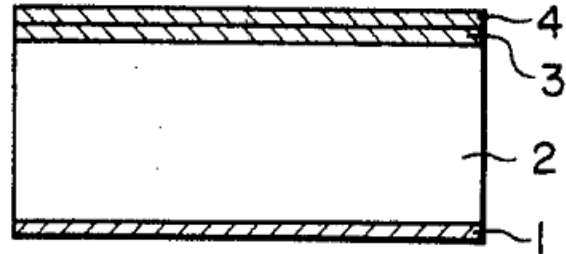


Fig. 1. Perfil de OSR patente US4,666,760

En la figura 1 se puede observar el perfil de uno de los OSRs propuestos en esta patente. La capa 1 está hecha de uno de los materiales reflectores mencionados previamente. La capa 2 es una cubierta para radiación de calor. La capa 3 es la capa protectora de los rayos ultravioleta. La capa 4 está hecha de un material eléctricamente conductor.

El grosor de la capa 1 está en el rango de 500 a 9000 Å. La capa 2 tiene un grosor de entre 10 y 300 micrones. Es importante mencionar que el grosor de esta capa afecta la absortividad solar y la emisividad térmica, estas se incrementan conforme el grosor de la capa aumenta. Otra característica importante de esta capa es la transparencia a la luz solar, conocida como transmitancia. Para una longitud de onda de 400nm no debe ser menor de 25%, mientras que para una longitud de onda de 450nm no debe ser menor de 76%. Estas características se obtienen cuando la capa de polieter amida tiene un grosor de 75 micrones.

La capa 3, de dióxido de cerio, debe tener un grosor no menor de 500 Å, para mejor la absorción de radiación UV, y no mayor de 10,000 Å para que el producto final posea una flexibilidad satisfactoria.

#### 2) Patente US5,541,010 [3]

En esta patente se plantea el uso de múltiples capas que conforman un dieléctrico, una capa del sustrato (en este caso es nitrato de silicio), una capa para adherir el metal al sustrato, una capa metálica reflectora y una capa protectora.

La figura 2 muestra esta disposición.

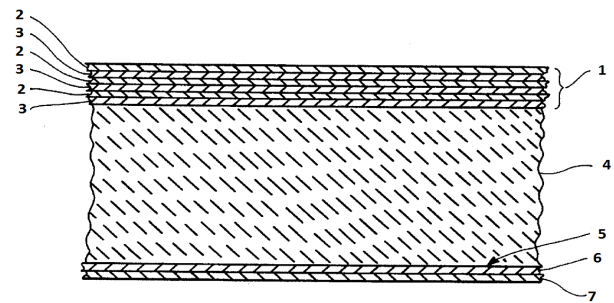


Fig. 2: Perfil de OSR Patente US5,541,010

Esta consiste de:

- La capa 1 es un dieléctrico de múltiples capas. Las capas 2 y 3 que conforman este dieléctrico son de sulfuro de zinc y fluoruro de torio respectivamente.
- La capa 4 es de nitruro de silicio, del que además describen que, preferiblemente, sea cristalino.
- La capa 5 es una capa opcional de alumina para mejorar la adhesión.
- La capa 6 es la de metal reflectivo, que puede ser aluminio, plata, oro o algún otro material reflectivo.
- La capa 7 es también opcional, y es de cromo, inonel (aleación de níquel-cromo) o alumina.

No se dan mayores detalles sobre las características que presenta este OSR, sólo se menciona que el nitruro de silicio transmite alrededor del 80% de la radiación incidente en el espectro visible.

En cuanto a los procesos de fabricación:

- La película de nitruro de silicio (capa 4) se fabrica por deposición química en fase vapor, utilizando un blanco de grafito. Luego son cortadas al tamaño deseado, llevadas a un grosor de entre 200 y 300 micrones, y pulido para mejorar tanto la transmisión en el espectro visible, como la reflectividad en infrarrojo.
- Se deposita en vacío, si se desea, la capa de alumina (capa 5) como adherente, teniendo ésta un grosor de entre 100 y 200 angstroms.
- Posteriormente se deposita en vacío la capa de material reflectivo. En este punto ya se tiene un OSR en su forma básica.
- La capa protectora 7 y las capas que forman el dieléctrico 1, son aplicadas posteriormente al OSR.

### 3) Patente US6,290,180 [4]

En esta patente se propone cubrir un OSR con una película fotovoltaica en la cara que da al espacio exterior, esta capa resulta útil para prevenir y descomponer la acumulación de residuos orgánicos en la superficie del OSR, manteniendo de esta forma su eficiencia a largo plazo. Entre los materiales fotovoltaicos utilizados, la patente menciona óxidos metálicos y materiales compuestos semiconductores. El material genera portadores libres cuando inciden sobre él los rayos ultravioleta. Los electrones en la banda de conducción y los huecos en la de valencia interactúan con el oxígeno de los residuos orgánicos, formando radicales libres, descomponiendo así los contaminantes orgánicos.

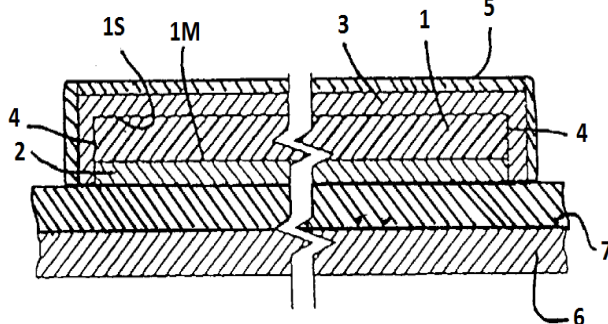


Fig. 3: Perfil de OSR patente US6,290,180

La figura 3 muestra el perfil de un OSR con las características dadas en esta patente. Éste está conformado como sigue:

- Una capa de sustrato (capa 1) que puede ser vidrio, cuarzo o nitruro de silicio.
- Una capa reflectiva (capa 2), que puede ser, por ejemplo, de plata, fijada en su lado al vehículo espacial (1M).
- Una capa de material eléctricamente conductivo y transparente (capa 3), de óxido de indio (IO) u óxido de indio-estaño (TIO), cubriendo esta la cara que da al espacio y los bordes, y en contacto eléctrico con la capa reflectiva.
- La capa más externa (capa 5) es de un material oxidante y cubre la cara que da al espacio, así como los bordes. Los mejores resultados se obtienen con materiales fotocatalíticos. Los materiales óxidos, metálicos de transición, fotoactivos utilizados fueron: dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ), óxido de zinc ( $\text{ZnO}$ ) y trióxido de tungsteno ( $\text{WO}_3$ ), ya que presentaban mejor actividad fotocatalítica. También se sugiere usar materiales semiconductores como sulfuro de zinc ( $\text{ZnS}$ ), selenuro de zinc ( $\text{ZnSe}$ ) o sulfuro de cadmio ( $\text{CdS}$ ).
- Las capas 6 y 7 representan el panel del satélite donde se montará el OSR y el material adhesivo utilizado, respectivamente.

La patente no describe en detalle el grosor de las capas que componen el OSR, sólo describe el grosor de la capa semiconductor más externa. Para el dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) está entre 2 y 40nm, mientras que para el óxido de zinc ( $\text{ZnO}$ ) y el trióxido de tungsteno ( $\text{WO}_3$ ) es menor a 200nm.

Para la fabricación de la película delgada sugieren que se utilice cualquiera de las técnicas conocidas para la fabricación de circuitos integrados: pulverización catódica o *sputtering*, deposición química en fase vapor (CVD), deposición química en fase vapor mejorada por plasma (PECVD) y deposición física en fase vapor (PVD).

### 4) Patente US6,587,263 [5]

En esta patente se busca la producción de OSRs que puedan proveer excelente funcionamiento, reduciendo costo y quiebre. Este comprende un sustrato, una capa de conexión entre el sustrato y la capa metálica, una capa metálica reflectiva, una superficie radiante, una capa para nivelar la superficie y una superficie de barrera entre la superficie reflectiva y la superficie radiante para mejorar la adhesión entre estas capas durante los ciclos térmicos.

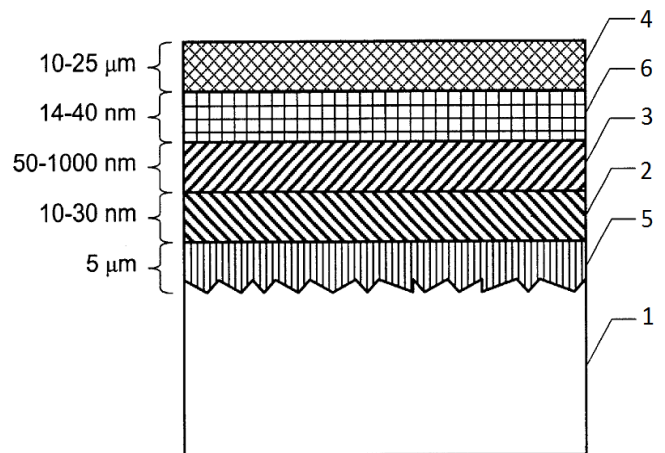


Fig. 4: Perfil de OSR patente US6,587,263

La figura 4 muestra el perfil del OSR presentado en esta patente. Una descripción detallada de éste es:

- La capa 1 es el sustrato, que puede ser de: aluminio, aleaciones de aluminio, poliamidas, poliamidas carbonadas o compuestos de carbono.
- La capa 2 es la capa de conexión, que se sugiere sea de un metal o una aleación metálica como: cromo, titanio o titanio-tungsteno.
- La capa 3 es la superficie reflectiva que típicamente es de plata (Ag) o aluminio (Al)
- Y la capa 4 es la superficie radiante, y en esta patente se sugiere que sea de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  o  $\text{SiO}_x\text{N}_y$ , con baja absorptividad de radiación electromagnética con longitudes de onda entre 200nm y 2500nm, y alta absorptividad y emisividad electromagnética de radiación con longitudes de onda entre  $2.5\mu\text{m}$  y  $25\mu\text{m}$ .
- La capa de nivelación (capa 5) se coloca para disminuir la rugosidad de la superficie del sustrato (sobre todo en el caso de las aleaciones de aluminio). Se utilizan en esta capa cubiertas duras de silicón (SHC) de uso comercial.
- La capa de barrera (capa 6) es de fluoruro de magnesio ( $\text{MgF}_2$ ).

Los grosores sugeridos, como puede verse en la figura 4, son entre 10 y 30nm para la capa de conexión, entre 50 y 1000nm para la capa reflectiva, entre 10 y  $25\mu\text{m}$  para la capa radiante, alrededor de  $5\mu\text{m}$  para la capa de nivelación, y entre 14 y 40nm para la capa de barrera.

Las técnicas utilizadas para la deposición de las películas delgadas son: pulverización catódica o *sputtering*, para la capa de metal reflectivo, mientras que para el resto de las capas se utiliza deposición química en fase vapor mejorada con plasma (PECVD).

#### 5) Patente US8,665,175 [6]

Se plantea una película de control térmico, con una adaptación de filtro de interferencia multicapas, baja absorptividad en el espectro de microondas y alta emisividad en el infrarrojo lejano. No utilizan metales y su uso principal es en antenas. Esta película posee las características deseadas para un radiador, pudiendo ser utilizada en la cara activa de antenas de comunicación o radares, ya que no causa distorsión en las señales de radio frecuencia.

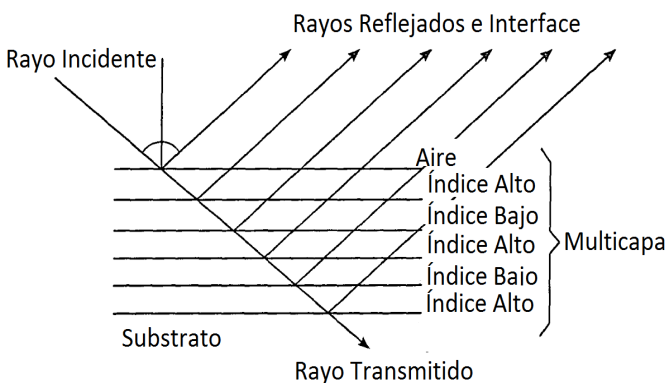


Fig. 5: Perfil de OSR patente US9,665,175

La figura 5 muestra un perfil de lo que sugiere la patente como un OSR sin metales. La estructura muestra un conjunto de capas alternadas de materiales dieléctricos con altos y bajos índices de refracción, cada uno con el grosor de un cuarto de longitud de onda.

El número de capas utilizadas en el dispositivo determinarán la reflectividad efectiva del mismo; mientras más capas, más alta será la reflectividad. El rango de longitudes de onda para el cual la reflectividad se mantendrá alta, dependerá de la proporción entre los índices de refracción de los dos materiales.

En este tipo de estructuras los materiales más comúnmente usados como sustratos son: Fluoruro de Magnesio, Fluoruro de Calcio, Suprasil 1 (nombre comercial de algunos silicios fundidos), silio fundido de grado ultravioleta, Infrasil 301 (nombre comercial para un producto de cuarzo natural con bajo contenido de hidroxilos), cuarzo cristalizado y zafiro. En OSRs se suelen utilizar vidrios ópticos de borosilicatos.

Típicamente las películas delgadas poliméricas se hacen por coextrusión de todas las capas simultáneamente, sin sustrato, y pueden tener desde 10 hasta 1000 capas, con control de la distribución de grosores.

Las características requeridas para la película protectora son: tener baja absorptividad de radiación solar, incluyendo parte del espectro ultravioleta (200-400nm), el espectro visible (400-750nm) y el espectro de infrarrojo cercano (750-2500nm); alta absorptividad y emisividad en el rango de longitudes de onda del infrarrojo lejano (2.5 a  $50\mu\text{m}$ ), que corresponde al calor generado por circuitos de alta frecuencia; y alta transparencia a las frecuencias de microondas de 1 a 30GHz, utilizadas en comunicaciones y observaciones con radar.

En esta patente, la película térmica desarrollada comprende una película polimérica de múltiples capas, donde la capa radiante está hecha de VM2002 (un producto de la empresa 3M) que posee una capa protectora externa de polietilenaftalato, para prevenir la degradación de las propiedades ópticas.

La película muestra alta transparencia a las ondas de microondas, es térmicamente estable hasta  $125^\circ\text{C}$  y posee alta reflectancia sobre un ancho de banda de 400-415nm hasta 775-1020nm, con un ángulo de incidencia de  $0$  a  $80^\circ$ . La película transmite longitudes de onda en el espectro de infrarrojo cercano sobre 775-1020nm, y baja absorción sobre 400nm. Puede aplicarse una capa adicional para obtener baja absorción de UV. El grosor de la película es de entre 50 y 500 micrones.

#### D. Técnicas De Deposición De Películas Delgadas. [8]-[10]

Existe gran cantidad de técnicas de fabricación de películas delgadas, las cuales están clasificadas en dos tipos de métodos:

- Físicos.
- Químicos.

Las técnicas físicas involucran aquellas técnicas que dependen de la evaporación o eyección del material desde una fuente, mientras que los métodos químicos dependen de propiedades físicas.

A su vez los métodos de deposición química pueden clasificarse en dos clases: la primera de estas se relaciona con la formación de la película desde el medio, mientras que la segunda es desde los ingredientes del precursor.

El desenvolvimiento y costo de las películas están relacionados directamente con las técnicas de manufactura sobre una reacción química específica.

La tabla I muestra los métodos físicos de deposición de películas delgadas, clasificandolos en los métodos que utilizan pulverización catódica como base de la técnica y los métodos que utilizan evaporación de los materiales precursores.

TABLA I: MÉTODOS FÍSICOS DE DEPOSICIÓN DE PELÍCULAS DELGADAS

<b>Métodos Físicos</b>	Pulverización Catódica ( <i>Sputtering</i> )	Descarga Incandescente de Corriente Directa
		Triodo
		Adquisición
		Radio Frecuencia
		Magnetron
		Haz de Iones
		Corriente Alterna
	Evaporación	En Vacío
		Calentamiento Resistivo
		Flash
		Haz de Electrones
		Laser
		Arc
		Calentamiento por Radio Frecuencia

En la tabla II se muestran los métodos químicos de deposición de películas delgadas, clasificándolos en los que utilizan las sustancias en fase gaseosa y los que las utilizan en fase líquida.

TABLA II: MÉTODOS QUÍMICOS DE DEPOSICIÓN DE PELÍCULAS DELGADAS

<b>Métodos Químicos</b>	Fase Gaseosa	Deposición Química
		Deposición Química Laser
		Deposición Fotoquímica
		Deposición Mejorada por Plasma
		Deposición Química Metal-Orgánica
	Fase Líquida	Electrodeposición
		Deposición por Baño Químico/Técnica de Precipitación por Retención
		Deposición por Pérdida de Electrones
		Anodización
		Epitaxis
		Sol-Gel
		Cubrimiento por Giro (Spin)
		Técnica de Pirólisis por Atomizador
		Ultrasónica
		Deposición Asistida de Polímeros

### E. Técnicas De Caracterización De OSRs [11]

#### 1) Morfología.

Según el nivel de detalle que se necesite, la muestra puede ser estudiada morfológicamente a diferentes niveles:

- Macroscópico.
- Microscópico.
- Atómico.

Para realizar este estudio pueden utilizarse los siguientes equipos:

- Microscopio Óptico.
- Microscopio Electrónico de Barrido (SEM).
- Microscopio Electrónico de Transmisión (TEM).
- Microscopios de Pruebas por Barrido (Microscopio de Fuerza Atómica AFM, Microscopio de Efecto Tunnel STM, entre otros).

#### 2) Estructura.

Cuando se trabaja con materiales, en general, bien sea puros o compuestos, existe la necesidad de asegurar que el material que se tiene es realmente el que se desea utilizar y que la densidad del mismo también cumple con lo requerido. Para el estudio de estas características en películas delgadas, las técnicas utilizadas son:

- Difracción de rayos X (XRD).
- Perfilometría.
- Monitoreo de cristales de cuarzo (QCM).
- Elipsometría.
- Difracción de electrones de baja energía (LEED).
- Difracción de electrones de alta energía con reflexión (RHEED).

#### 3) Composición.

Otro aspecto importante del estudio de materiales, y en particular de películas delgadas, es el conocimiento de los elementos que componen la muestra, impurezas presentes y estados químicos. Para el estudio de estas características se pueden utilizar las siguientes técnicas:

- Espectroscopía de electrones Auger (AES).
- Espectroscopía de energía de rayos X dispersados (EDS).
- Espectroscopía de fotoelectrones de rayos X (XPS).
- Espectrometría de masa de iones secundarios (SIMS).
- Retrodispersión Rutherford (RBS).

#### 4) Propiedades Ópticas.

Las principales aplicaciones conocidas de las películas delgadas son aplicaciones ópticas, es por ello que las más importantes características que son necesarias conocer son los parámetros ópticos como el índice de reflexión, la absorción y emisión de radiación, y las propiedades dielectricas como función de la longitud de onda. Conociendo la absorción óptica es posible calcular también el espesor de las películas. La técnica por excelencia utilizada para determinar estos parámetros es la elipsometría, aunque algunos métodos opcionales pueden ser espectroscopías de diferentes longitudes de onda.

#### 5) Propiedades Eléctricas.

En muchos casos las aplicaciones de las películas delgadas involucran características eléctricas. Las principales características estudiadas son:

- Resistencia.
- Conductancia.
- Capacitancia.

Además de estas características, se debe estudiar cualquier otra que sea particular del dispositivo del que forma parte la película delgada.

Estas características se estudian haciendo pruebas de resistividad por el método de los 4 puntos y mediciones de capacitancia.

#### 6) Propiedades Magnéticas.

Algunas aplicaciones de las películas delgadas también involucran propiedades magnéticas. Para estos casos se estudian los bucles o

ciclos de histeresis; los cuales pueden obtenerse mediante medidas de Efecto Magneto-óptico de Kerr (MOKE) o resonancia ferromagnética (FMR).

### 7) Propiedades Mecánicas.

Conocer las propiedades mecánicas de las películas delgadas involucra saber cual es el comportamiento de las mismas en los ambientes a los cuales estarán expuestas además de conocer si cumple con los requerimientos para los cuales se está desarrollando. Las principales propiedades mecánicas estudiadas en películas delgadas son:

- Estrés interno en las películas/sustratos.
- Fricción.
- Adhesión.

La medición de estas propiedades pueden realizarse utilizando las siguientes técnicas:

- Medidas de curvatura por estrés.
- Pruebas de fricción con disco o pin.
- Pruebas de adhesión.

## III. FACTIBILIDAD DE FABRICACIÓN DE OSRs EN VENEZUELA

Existen en Venezuela múltiples capacidades para la fabricación y caracterización de películas delgadas, pudiendo procesarse los sustratos poliméricos y adquirirse metales de alta pureza, tanto para la deposición directa de estos en las películas, como para la fabricación de los compuestos necesarios según los requerimientos del usuario, para su posterior deposición; además de poseerse el recurso humano necesario para estas labores.

Siendo los OSRs un conjunto de películas, se considera posible la fabricación de los mismos, pudiendo además establecerse una línea de investigación en el estudio de estos dispositivos, que favorezca el desarrollo de la emergente industria espacial venezolana, además de generar el trabajo articulado de diferentes instituciones e industrias del país.

Para la deposición de películas delgadas por métodos físicos existen en el país dos equipos; uno de ellos ubicado en el estado Zulia (Fundación Instituto Zuliano de Investigaciones Tecnológicas, INZIT) y el otro en el estado Mérida (Centro de Investigaciones de Astronomía CIDA, Centro Nacional de Tecnologías Ópticas CNTO). Estos equipos pueden hacer deposición de películas delgadas utilizando las siguientes técnicas:

- Pulverización Catódica por: Magnetrón y Haz de Iones.
- Evaporación por: Calentamiento Resistivo y Haz de Electrones.

Para la caracterización óptica, además de los equipos que poseen los centros de investigación antes mencionados (los equipos de deposición tienen capacidad de realizar ciertas medidas dentro de la cámara). Existen diferentes grupos de investigación en las universidades y en el Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas (IVIC), que poseen los equipos para realizar aportes a la investigación que se pretende llevar a cabo. También existen en estos centros otras capacidades en cuanto a equipos, como microscopios electrónicos de barrido y transmisión, análisis de energía de rayos X dispersados, equipos de difracción de rayos X, equipos para medidas eléctricas, equipos de medición de resonancia ferromagnética, elipsómetros, entre otros.

## IV. PROPUESTA DE DISEÑO

Como se menciona en la sección anterior, en el país existe la posibilidad de fabricar y caracterizar películas delgadas, es por este motivo que se propone como un proyecto de la Agencia Bolivariana

para Actividades Espaciales la fabricación de reflectores solares ópticos, utilizando las potencialidades y materias prima disponibles en el país. El modelo para los primeros OSRs de prueba que se propone es el mostrado en la figura 6.

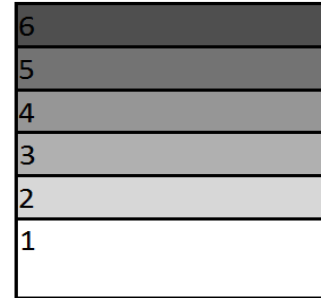


Fig. 6: Perfil de OSR propuesto para su fabricación en Venezuela

Según la figura 6 los materiales sugeridos para la invención serían:

- Capa 1: Nitruro de Silicio ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ), con un espesor de alrededor de  $9\mu\text{m}$ , que cumple la función de sustrato para la deposición del resto de las capas.
- Capa 2: Cromo (Cr), con un espesor de alrededor de  $20\text{nm}$ , que cumple la función de capa adherente entre el sustrato y la capa metálica reflectiva.
- Capa 3: Aluminio (Al), con un espesor de alrededor de  $300\text{nm}$ , que es la capa reflectiva.
- Capa 4: Fluoruro de Magnesio ( $\text{MgF}_2$ ), con un espesor de alrededor de  $40\text{nm}$ , que cumple la función de aumento de la adherencia entre la capa de aluminio y la capa radiante.
- Capa 5: Dióxido de Silicio ( $\text{SiO}_2$ ), con un espesor de alrededor de  $10\mu\text{m}$ , que es la capa radiante del dispositivo que se quiere desarrollar.
- Capa 6: Óxido de zinc ( $\text{ZnO}$ ), con un espesor de alrededor de  $200\text{nm}$ , que es una capa opcional que se sugiere para prevenir y descomponer la acumulación de residuos orgánicos en la superficie del dispositivo.

El área sugerida para el dispositivo a fabricar es un cuadrado de  $3\text{cm}$  por  $3\text{cm}$ , con un espesor de alrededor de  $19.56\mu\text{m}$ .

## V. CONCLUSIONES

De acuerdo con la investigación realizada, se puede concluir que es posible fabricar y caracterizar reflectores ópticos solares (OSR) de buena calidad, utilizando materia prima de las industrias metalúrgicas y poliméricas, y los recursos físicos y humanos del país, favoreciendo así el desarrollo de la industria aeroespacial y el aprovechamiento de los recursos y potencialidades que se tienen en la nación.

## VI. REFERENCIAS

- [1] *Spacecraft Thermal Control Handbook*, Volume I: Fundamental Technologies, El Segundo, CA, 2002, pp. 139-143, 791-795.
- [2] Y. Hasuda; S. Sasaki; T. Ichino, "Flexible Optical Solar Reflector," U. S. Patent 4 666 670, May 19, 1987.

- [3] R. A. Tanzilli; J. J. Gebhardt, "Optical Solar Reflector," U. S. Patent 5 541 010, July 30, 1996.
- [4] K. W. Browall; C. Wey, "Photocatalytic Coatings on Optical solar Reflectors to Decompose Organic Contaminants," U. S. Patent 6 290 180, Sept. 18, 2001.
- [5] C. D. Iacovangelo; Y. Pan; C. Wey; M. Chen, "Optical Solar Reflectors," U. S. Patent 6 587 236, July 1, 2003.
- [6] P. J. Brooks, "Thermal Control Film for Spacecraft," U. S. Patent 8 665 175 B2, Mar. 4, 2014
- [7] R. C. Becerra, "Ciencia y Tecnología Espacial para el Desarrollo Integral de Venezuela," Caracas, Venezuela: ABAE, 2013, ch. 1, pp. 19-27.
- [8] *Handbook of Thin-Film Deposition Processes and Techniques*, 2nd ed., 14-25.
- [9] L. Martínez Pérez, "Fabricación y Caracterización Óptica y Eléctrica de Películas Delgadas Transparentes de Óxidos de Estaño, Circonio y Zinc," PhD Thesis, IPN, México D. F., Mexico, 2005.
- [10] S. R. Mane, "Studies on Preparation, Properties and Applications of Chemically Deposited Heteropolioxometelate Polymeric Thin Films," PhD. dissertation, Material Research Lab., Shivaji U., Kolhapur, India, 2010
- [11] T. M. Christensen. (2000). *Physics of Thin Films*. [Online]. Available: <http://www.uccs.edu/~tchrste/courses/PHYS549/549lectures/index.html>.