

Fabricación, Caracterización Óptica y Superficial de Prototipos de Reflectores Solares Ópticos Obtenidos por Deposición de Películas Delgadas

Production, Optical and Surface Characterization of Optical Solar Reflector Prototypes Obtained by Thin Film Deposition

Ricardo J. Morales, *Ingeniero de Diseño, ABAE*, Keyffer V. Salas, *Director, CNTO*

Resumen—Los reflectores solares ópticos (OSR) son dispositivos de control térmico utilizados en el exterior de los satélites, para la radiación del calor excedente del interior del satélite hacia el espacio. Basado en un estudio de factibilidad realizado anteriormente, cuyo fundamento fueron algunas patentes de OSR disponibles en internet, se pudo fabricar, mediante técnicas de deposición física de materiales, y caracterizar ópticamente, utilizando espectrofotometría, y superficialmente, recurriendo a las técnicas de microscopía de fuerza atómica (AFM) y perfilometría, con la colaboración del Centro Nacional de Tecnología Óptica, reflectores solares ópticos con diferentes propiedades, variando el número de capas y los materiales de dichas capas, obteniéndose diversos resultados tanto en el comportamiento óptico de los mismos como en su superficie. Los resultados obtenidos muestran en estos dispositivos desarrollados algunas características ópticas similares a las que se pueden tener en los dispositivos comerciales, en particular en lo referente a la reflectividad, debiendo mejorarse los tiempos de deposición para obtener mejores resultados para la absorptividad, uno de los parámetros más importantes a tomar en cuenta cuando se seleccionan este tipo de dispositivos para su uso en los satélites.

Palabras clave—deposición de películas delgadas, espectroscopía, microscopía de fuerza atómica, OSR.

Abstract— Optical solar reflectors (OSR) are thermal control devices used on satellites external surfaces, to radiate exceeding hot from satellite inside to the space. Based on a feasibility study made before, whose fundamentals were some OSR patents available on the internet, it was possible to fabricate, by mean of material deposition physical technics, and characterizing optically, by spectrophotometry, and superficially, appealing to atomic force microscopy (AFM) and profilometry, with the National Center of Optical Technology collaboration, optical solar reflectors with different properties. By means of thin films quantity variation and materials used, they were obtained variations in optical and superficial behavior. Obtained results in these devices developed shown some similar optical properties to those on commercial devices, particularly with regard to reflectivity, having to improve

deposition times in order to obtain better results for absorptivity, one of the most important parameters to take into account when choosing this kind of devices for use them on satellites.

Index terms— atomic force microscopy, OSR, spectroscopy, thin films deposition.

I. INTRODUCCIÓN

LOS satélites que se colocan en órbita para diferentes aplicaciones requieren, según su ubicación, diferentes mecanismos de control para mantener los equipos que los componen en sus rangos de temperatura de trabajo. Esto se conoce como balance térmico y para mantener dicho balance los satélites utilizan lo que se conoce como dispositivos de control térmico. [1] - [6]

Estos dispositivos de control térmico se suelen clasificar, según su modo de operación, en dispositivos de control térmico pasivos y activos, siendo los dispositivos pasivos de uso preferencial ya que los mismos no consumen energía eléctrica y permiten una mejor administración del presupuesto de potencia eléctrica asignado al subsistema de control térmico. [1]

Dentro de la clasificación de dispositivos pasivos se encuentran: cubiertas térmicas, aislantes térmicos, rellenos conductores y materiales de cambio de fase. [1], [6]

La utilización de cubiertas térmicas va a depender de las necesidades en la zona del satélite, regularmente solo se necesitan dos comportamientos: aislamiento o radiación. Si se necesita que la zona esté aislada se utilizarían las cubiertas aislantes de múltiples capas (MLI por sus siglas en inglés). Si en cambio, se necesita que cierta zona del satélite irradie calor al exterior los dispositivos a utilizar serían los reflectores solares ópticos (OSR). [1], [3], [6]

Los reflectores solares ópticos cumplen la función de irradiar calor al exterior además de reflejar la radiación incidente proveniente principalmente del sol.

Estos son reflectores ópticos basados en una cubierta fina de

metal (generalmente oro, plata o aluminio), depositada sobre un sustrato (vidrio, cuarzo o algún polímero). Regularmente por el lado opuesto al sustrato se colocan múltiples capas que protegen al dispositivo de oxidación y que además pueden mejorar su desempeño. [1], [3], [6]

II. TÉCNICAS DE DEPOSICIÓN DE PELÍCULAS DELGADAS UTILIZADAS

Dado que existe un gran número de técnicas de deposición de películas delgadas, para este estudio se tomaron en cuenta las capacidades con las que cuentan las Instituciones Venezolanas, en particular el Centro Nacional de Tecnología Óptica (CNTO), en cuanto a la deposición por métodos físicos se refiere, así como la experiencia de esta institución para la selección de las técnicas a utilizar en la deposición de cada capa. Basados en estos criterios, las técnicas seleccionadas fueron:

A. Evaporación por Haz de Electrones [7], [8], [9].

La evaporación en vacío es la técnica de deposición más ampliamente utilizada para la deposición de películas. Este proceso consiste básicamente en los siguientes pasos:

- La generación de vapor hirviendo o sublimando la fuente del material a ser depositado.
- El transporte de vapor de la fuente al sustrato, y
- La condensación del vapor en una película sólida sobre la superficie del sustrato.

La evaporación puede producirse por diferentes métodos en un medio a alto vacío. Uno de los métodos más utilizados actualmente es el haz de electrones.

El diseño típico de un evaporador por haz de electrones incluye un filamento de trabajo pesado (generalmente de tungsteno) para emitir muchos miliamperios de corriente y algunos kilovoltios de alto voltaje, esto para generar la potencia necesaria. El haz de electrones es direccionado utilizando un campo magnético transverso dirigiendo el haz de electrones hacia la superficie de la muestra a depositar. El calentamiento producido está muy localizado y se debe tener cuidado que el mismo esté dirigido hacia donde es necesario. El material a ser depositado se coloca en un crisol enfriado por agua. El material del crisol varía según la muestra a depositar, siendo este de un material que no reaccione con la muestra.

La figura 1 muestra la configuración y el funcionamiento de un sistema de deposición por evaporación con haz de electrones.

B. Pulverización Catódica Asistida por Magnetron [7], [8], [9].

La pulverización catódica, también conocida en inglés como sputtering, consiste en el bombardeo de un blanco sólido con iones energéticos que producen la eyección de partículas del material bombardeado. La eyección de partículas es el resultado de la transmisión de momento de los iones energéticos a las partículas que forman parte del blanco. La eyección solo se produce si los iones que chocan con el blanco tienen la suficiente energía para romper el enlace que mantiene a las partículas del blanco juntas.

El rendimiento de la pulverización va a depender de la cantidad de átomos expulsados por la superficie debido a la cantidad de iones incidentes. Los iones utilizados en este

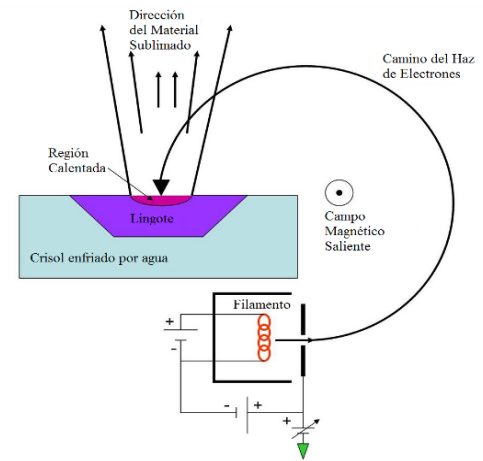


Fig. 1. Esquema de deposición utilizando evaporación por haz de electrones.

proceso (Iones de Argón, por ejemplo) se generan a partir de un plasma en el interior del equipo de pulverización. La pulverización catódica puede ser considerada un proceso de grabado, que es utilizado para limpieza de superficies y delineación de patrones.

La técnica de pulverización catódica con magnetron utiliza campos magnéticos transversos a los campos eléctricos en la superficie del blanco a ser pulverizado. La inclusión de campos magnéticos produce algunas modificaciones importantes en el proceso básico de pulverización. Los electrones secundarios producidos en el blanco quedan atrapados en trayectorias cicloidales, por tanto, no bombardearán el sustrato y no se producirán altas temperaturas en el mismo debido a esto. Este fenómeno permite el uso de sustratos sensibles a la temperatura.

Otra ventaja del uso de campos magnéticos es que produce mayores tasas de deposición que los métodos convencionales, lo cual le permite ser utilizado a nivel industrial.

Las configuraciones más comunes de pulverización catódica utilizan blancos planos, toroidales (con sección transversal rectangular), y toroidal-cónica (con sección transversal trapezoidal). En sistemas de pulverización catódica con magnetron planares de tipo comercial, el plano del sustrato se traslada a través de cámaras de vacío interconectadas para permitir operaciones de cubierta semi-continuas. El blanco circular (toroidal-cónico), por otro lado, es centrado en la cámara, creando una geometría de deposición aproximada al plano análogo de la fuente de evaporación.

La figura 2 muestra a grandes rasgos el funcionamiento de un sistema de pulverización catódica asistida con magnetron.

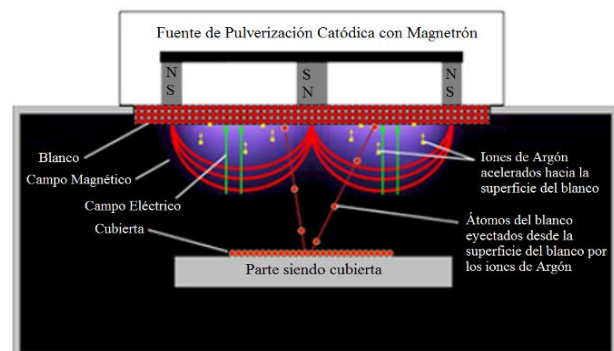


Fig. 2. Configuración típica y funcionamiento de un pulverizador catódico asistido con magnetron.

III. TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN UTILIZADAS

Según la Real Academia Española se define caracterizar como: “Determinar los atributos de alguien o algo, de modo que claramente se distinga de los demás”.

Cuando se trata de películas delgadas existe un número considerable de técnicas para determinar los atributos de un ensayo. Dependiendo de la utilidad para la cual se esté fabricando el ensayo se seleccionan unas u otras. Para este estudio se seleccionaron las siguientes técnicas de caracterización:

A. Perfilometría [10]

Es una técnica óptica de escaneo puntual utilizada para realizar una imagen de la superficie de una muestra. El aparato que realiza este estudio es conocido como perfilómetro.

Un perfilómetro está compuesto básicamente de dos partes: un detector y un porta-muestra. El detector determina el estado de la muestra en el punto que es apuntado y el porta-muestra es donde se coloca la muestra a ser estudiada. Dependiendo del sistema para la detección puede moverse el detector, la muestra o ambos.

Existen básicamente dos tipos de perfilómetro:

1) Perfilómetro de aguja:

Este tipo de perfilómetro utiliza una punta la cual es desplazada sobre la muestra para la adquisición de datos. Los datos son tomados por un sistema que mide la fuerza con la que la aguja es empujada hacia arriba por la superficie de la muestra. El sistema usa un brazo con un torque específico que permite medir la fuerza. Los cambios en la posición Z de este brazo permiten reproducir la superficie de la muestra en sistemas computarizados. Esta técnica puede arrojar resultados de muy alta resolución, pero a la vez puede resultar destructiva para algunos tipos de muestra por la necesidad de estar en contacto con la misma y la aguja puede llegar a contaminarse debido a este contacto.

2) Perfilómetro óptico:

Este tipo de perfilómetro utiliza luz en lugar de una aguja. Puede haber diferentes maneras de realizar el estudio. El componente clave de la técnica es el direccionamiento de la luz de tal manera que esta pueda detectar la superficie en tres dimensiones. Algunas maneras de realizar estas mediciones incluyen: interferencia óptica, mediante el uso de una apertura confocal, detección de enfoque y fase, o la proyección de un patrón sobre la imagen óptica.

B. Microscopía de Fuerza Atómica [11]

Es una técnica que permite observar y medir la estructura de una superficie con gran resolución y precisión. Permite, entre otras cosas, observar el arreglo de los átomos en una muestra. Es posible tomar imágenes de hasta 5nm que muestren tan sólo 40 o 50 átomos y determinar a través de estas la estructura cristalográfica de los materiales.

El microscopio de fuerza atómica consiste básicamente de una punta afilada que pasa haciendo un barrido sobre la muestra construyendo un mapa de las diferentes alturas en la muestra, lo que permite construir imágenes que exponen diferentes ángulos de la muestra utilizando los programas de análisis de imágenes adecuados. En la figura 3 puede observarse el principio de funcionamiento de un microscopio de fuerza atómica.

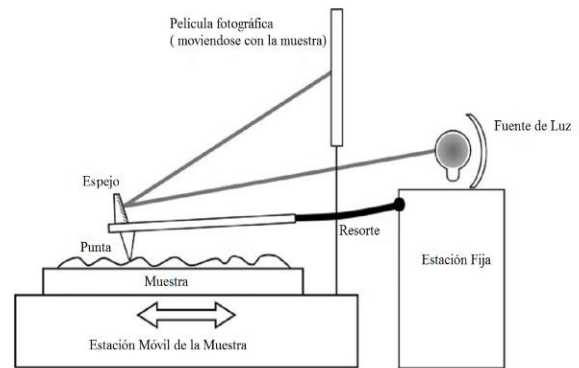


Fig. 1. Diseño esquemático de un microscopio de fuerza atómica.

El microscopio de fuerza atómica es capaz de detectar la fuerza de repulsión entre los átomos de la muestra y los que forman parte de la punta, de ahí su nombre. Utilizando este principio se puede determinar la topografía de la muestra estando o no en contacto con la misma.

C. Espectrofotometría [12]

La espectrofotometría es un método para medir cuanta luz es absorbida por una sustancia mediante la medida de la intensidad de luz cuando un haz de luz pasa a través de una muestra. Este es uno de los métodos más útiles de análisis cuantitativo en diferentes campos entre ellos la física, ciencia e ingeniería de materiales.

En la figura 4 puede observarse un diagrama del principio básico del funcionamiento de un espectrofotómetro

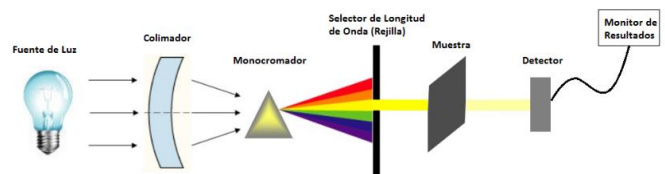


Fig. 2. Estructura básica de los espectrofotómetros

Los espectrofotómetros están compuestos básicamente de:

- **Espectrómetro:** es el encargado de producir la luz en el rango de longitud de onda deseado. Está conformado por un colimador que se encarga de dar coherencia a la luz proveniente de la fuente, un monocromador que divide el haz de luz en sus diferentes componentes (espectro) y una rejilla para la selección de la longitud de onda deseada.
- **Fotómetro:** es el encargado de medir la cantidad de fotones que pasan a través de la muestra a ser medida enviando la señal a un galvanómetro o un monitor digital.

IV. PATENTES DE REFLECTORES SOLARES ÓPTICOS

Para establecer los ensayos se realizó un estudio de las patentes de prototipos existentes de reflectores solares ópticos. Los más relevantes encontrados fueron los siguientes:

A. Patente US4,666,760 [2].

En esta patente se plantea 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 termo-ópticas 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'fenoxy-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 ultravioleta.
- Absortividad solar (α_s) menor de 0.16.
- Emisividad térmica (ϵ) mayor de 0.77.

En la figura 5 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.

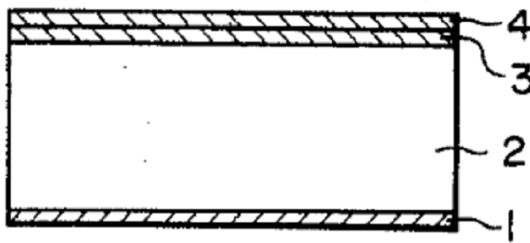


Fig. 5. Perfil de OSR patente US 4,666,760.

El espesor de la capa 1 está en el rango de 500 a 9000Å. La capa 2 tiene un espesor de entre 10 y 300 micrones. Es importante mencionar que el espesor de esta capa afecta la absortividad solar y la emisividad térmica, estas se incrementan conforme el espesor de la capa aumenta. Otra característica importante de esta capa es la transparencia a la luz solar, conocida como tramitancia. 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 espesor de 75 micrones. La capa 3, de dióxido de cerio, debe tener un espesor no menor de 500Å, para mejorar la absorción de radiación UV, y no mayor de 10,000Å para que el producto final posea una flexibilidad satisfactoria.

B. 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, que 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 ultravioletas. 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.

La figura 6 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 conductor 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 (TiO_2), óxido de zinc (ZnO) y trióxido de tungsteno (WO_3), ya que presentaban mejor actividad fotocatalítica. También se sugiere usar materiales semiconductores como sulfuro de zinc (ZnS), selenuro de zinc ($ZnSe$) o sulfuro de cadmio (CdS).
- Las capas 6 y 7 representan el panel del satélite donde se montará el OSR y el material adhesivo utilizado, respectivamente.

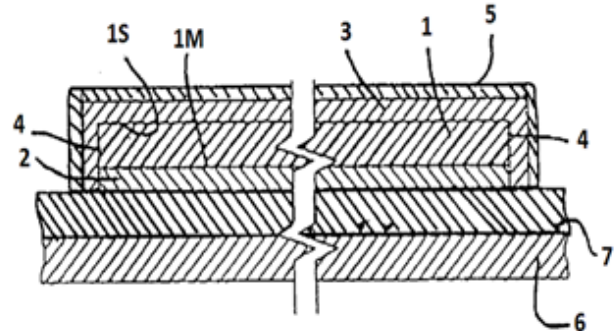


Fig. 6. Perfil de OSR patente US 6,290,180.

La patente no describe en detalle el espesor de las capas que componen el OSR, sólo describe el espesor de la capa semiconductor más externa. Para el dióxido de titanio (TiO_2) está entre 2 y 40nm, mientras que para el óxido de zinc (ZnO) y el trióxido de tungsteno (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).

C. 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.

La figura 7 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, que en esta patente se sugiere que sea de SiO_2 , Si_3N_4 o SiO_xN_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 μm y 25 μm .
- 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 (MgF_2).

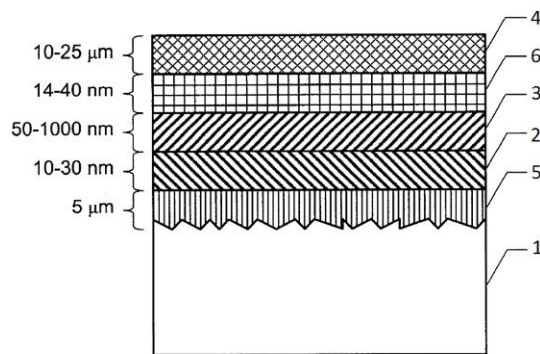


Fig. 7. Perfil OSR patente US 6,587,263.

Los espesores sugeridos, como puede verse en la figura 7, son entre 10 y 30nm para la capa de conexión, entre 50 y 1000nm para la capa reflectiva, entre 10 y 25 μm para la capa radiante, alrededor de 5 μm 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).

V. METODOLOGÍA UTILIZADA PARA LA DEPOSICIÓN DE PELÍCULAS DELGADAS

A. Ensayo 1, Al + SiO_2

Para este ensayo la técnica de deposición utilizada fue haz de electrones y el sustrato empleado fue vidrio. El vacío al que se encontraba la cámara antes del proceso de deposición fue de $7,79 \times 10^{-4} \text{Pa}$. Mediante un sistema asistido por iones (ABS) se realizó la limpieza previa del sustrato, proceso que duró dos minutos.

Para la deposición de aluminio el blanco empleado poseía un

grado de pureza de 99.999% y para medir el espesor de la capa obtenida se utilizó el espectrofotómetro del que dispone el aparato de deposición insitu, mediante la medición del porcentaje de transmisión del ensayo. El espesor obtenido fue de 1708Å. La presión de trabajo en la cámara era de $4 \times 10^{-2} \text{Pa}$ durante la deposición de esta capa, mientras la potencia del haz de electrones estaba en el rango de 15mA a 20mA. El tiempo de deposición fue de 18 minutos.

Para la deposición del óxido de silicio el blanco tenía una pureza de 99.9% y para medir el espesor de la capa obtenida se empleó nuevamente el espectrofotómetro insitu, y la medición del porcentaje de transmisión del ensayo. El espesor obtenido para esta capa fue de 150Å. La presión de trabajo en la cámara era de $4 \times 10^{-2} \text{Pa}$ durante la deposición, mientras la potencia del haz de electrones estaba en 21mA. El tiempo de deposición fue de 2 minutos.

En la figura 8 se muestra el esquema de deposición del primer ensayo realizado para esta investigación.



Fig. 8. Esquema de deposición del ensayo 1.

B. Ensayo 2, Al + MgF_2 + SiO_2

Este ensayo se realizó, al igual que el anterior, aplicando nuevamente la técnica de haz de electrones y el sustrato de vidrio. El vacío al que se encontraba la cámara antes del proceso de deposición fue de $7,10 \times 10^{-4} \text{Pa}$, se realizó la limpieza del sustrato con el sistema asistido por iones (ABS), proceso que duró dos minutos.

El blanco de aluminio empleado fue de las mismas características del empleado en el ensayo anterior (pureza de 99.999%). El espesor obtenido, por medición del porcentaje de transmisión, fue de 740Å. La presión de trabajo en la cámara fue de $5 \times 10^{-2} \text{Pa}$. La potencia del haz de electrones estaba en el rango de 15mA a 20mA. El tiempo de deposición fue de 5 minutos.

Para la deposición del fluoruro de magnesio se utilizó un blanco con una pureza de 99.9%. El espesor obtenido en este ensayo fue de 130Å. La presión a la que se encontraba la cámara fue de $5 \times 10^{-2} \text{Pa}$. La potencia del haz de electrones fue de 18mA y el tiempo de deposición fue de 4 minutos.

Para la deposición del óxido de silicio se utilizó un blanco con una pureza de 99.9%. El espesor obtenido para esta capa fue de 125Å. La presión de trabajo en la cámara $5,2 \times 10^{-2} \text{Pa}$. La potencia del haz de electrones estaba en 21mA. El tiempo de deposición fue de 2 minutos.

En la figura 9 se muestra el esquema de deposición del segundo ensayo realizado para esta investigación.

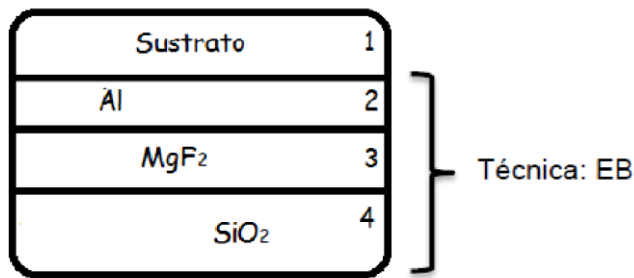


Fig. 9. Esquema de deposición del ensayo 2.

C. Ensayo 3, Cr + Al + MgF₂ + SiO₂

Para este ensayo se utilizaron dos técnicas de deposición, nuevamente la técnica de haz de electrones y además la técnica de pulverización catódica magnética RF. El sustrato utilizado fue vidrio, el vacío al que se encontraba la cámara antes del proceso de deposición fue de $7,50 \times 10^{-4}$ Pa. Se realizó nuevamente la limpieza del sustrato con el sistema asistido por iones (ABS) y el proceso que duró dos minutos.

En este ensayo para la capa de cromo se aplicó la técnica de deposición pulverización catódica magnética RF, con un blanco de cromo cuya pureza era de 99,95%. El espesor obtenido para esta capa fue de 495 Å. La presión de trabajo $7,10 \times 10^{-1}$ Pa. La potencia 300 mA. Durante el uso de esta técnica es necesario tener un flujo alto de argón en la cámara en principio, el cual se va regulando gradualmente hasta obtener la tasa de deposición deseada. Para este ensayo el flujo de argón estuvo en 20 Sccm. La tasa de deposición utilizada en este caso fue de 1.1 Å, durante un tiempo de 10 minutos.

Al igual que en los ensayos anteriores el blanco de aluminio fue de alta pureza (99.999%) y la técnica de haz de electrones. El espesor obtenido fue de 500 Å. La presión de trabajo en la cámara 5×10^{-2} Pa. La potencia del haz de electrones estaba en el rango de 15 mA a 20 mA. El tiempo de deposición fue de 4 minutos y medio.

De la misma forma que en el ensayo anterior se empleó un blanco de fluoruro de magnesio con una pureza de 99,9%. El espesor obtenido en este ensayo fue de 100 Å. La presión a la que se encontraba la cámara fue de $5,2 \times 10^{-2}$ Pa. La potencia del haz de electrones fue de 18 mA y el tiempo de deposición fue de 1 minuto.

En la deposición de la capa de óxido de silicio la pureza del blanco fue de 99,9%. El espesor obtenido para esta capa fue de 100 Å. La presión de trabajo en la cámara $5,2 \times 10^{-2}$ Pa. La potencia del haz de electrones estaba en 21 mA. El tiempo de deposición fue de 1 minuto.

En la figura 10 se muestra el esquema de deposición del tercer ensayo realizado para esta investigación.

D. Ensayo 4, Cr + Al + MgF₂ + SiO₂ + ZnO

Para este ensayo se utilizaron nuevamente las técnicas de deposición haz de electrones y pulverización catódica magnética RF. El sustrato utilizado fue vidrio, el vacío al que se encontraba la cámara antes del proceso de deposición fue de 7×10^{-4} Pa, se utilizó nuevamente el sistema asistido por iones (ABS) para realizar la limpieza previa del sustrato y el proceso que duró dos minutos.

Se empleó la misma técnica de deposición del ensayo anterior

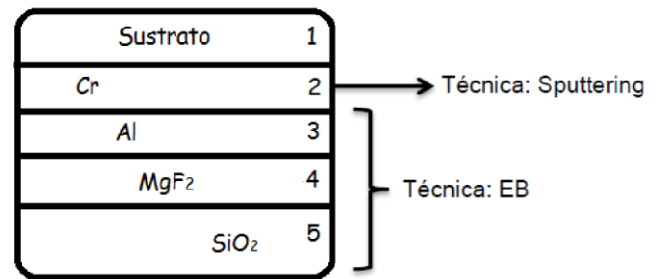


Fig. 10. Esquema de deposición del ensayo 3.

(pulverización catódica magnética RF) y un blanco de características similares para la capa de cromo (pureza 99,95%). El espesor obtenido para esta capa fue de 580 Å. La presión de trabajo $3,97 \times 10^{-1}$ Pa. La potencia 300 mA. El flujo de argón fue de 50 Sccm. La tasa de deposición en este caso fue de 0.8 Å durante un tiempo de 9 minutos.

El blanco de aluminio, al igual que en los ensayos anteriores, fue de alta pureza (99.999%) y la técnica empleada la de haz de electrones. El espesor obtenido fue de 446 Å. La presión de trabajo en la cámara 5×10^{-2} Pa. La potencia del haz de electrones estaba en el rango de 15 mA a 20 mA. El tiempo de deposición fue de 2 minutos.

Como se aplicó en los dos ensayos anteriores para la deposición del fluoruro de magnesio se utilizó un blanco con una pureza de 99,9%. El espesor obtenido en este ensayo fue de 100 Å. La presión a la que se encontraba la cámara fue de $3,2 \times 10^{-2}$ Pa. La potencia del haz de electrones fue de 18 mA y el tiempo de deposición fue de 1 minuto.

Para la deposición del óxido de silicio el blanco poseía una pureza de 99,9%. El espesor obtenido para esta capa fue de 100 Å. La presión de trabajo en la cámara $5,34 \times 10^{-2}$ Pa. La potencia del haz de electrones estaba en 18 mA. El tiempo de deposición fue de 1 minuto.

En este último ensayo realizado la última capa depositada fue de óxido de zinc con un grado de pureza de 99,99%, la técnica fue pulverización catódica magnética RF. Se obtuvo un espesor de 127 Å. La presión de trabajo estaba en $3,11 \times 10^{-1}$ Pa. La potencia fue de 300 mA. El flujo de argón 30 Sccm. La tasa de deposición fue de 0,4 Å durante un tiempo de 2 minutos.

En la figura 11 se muestra el esquema de deposición utilizado para el cuarto ensayo de la presente investigación.

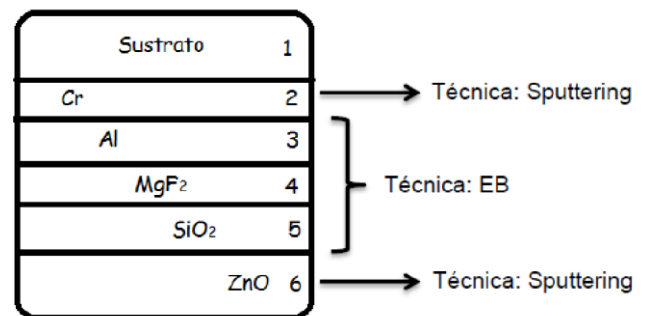


Fig. 11. Esquema de deposición del ensayo 4.

VI. RESULTADOS DE CARACTERIZACIÓN.

A. Ensayo I, Al + SiO₂

Los resultados obtenidos por medio de la caracterización realizada para este ensayo fueron los siguientes:

1) Perfilometría

En la figura 12 se muestra una de las imágenes obtenidas por perfilometría para este ensayo.

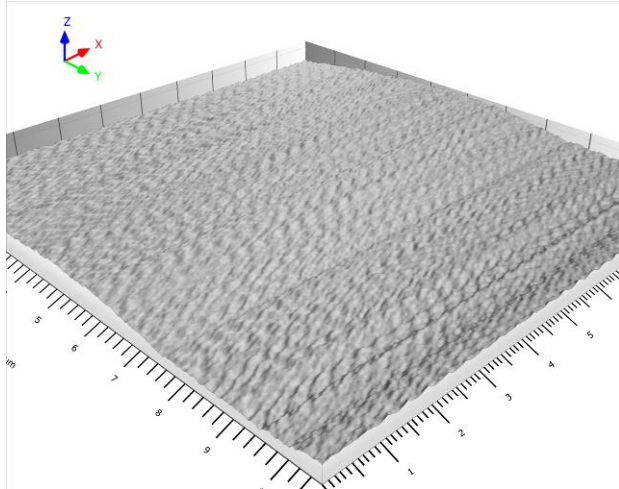


Fig. 12. Imagen obtenida por perfilometría del ensayo Al+SiO₂.

Los parámetros de altura obtenidos por perfilometría para este ensayo se resumen en la Tabla I.

TABLA I
RESULTADOS DE RUGOSIDAD OBTENIDOS POR PERFILOMETRÍA PARA EL ENSAYO I

Parámetros de Altura	Medida (μm)
Sq	1,073
Ssk	-0,297
Sku	1,634
Sp	1,560
Sv	1,878
Sz	3,438
Sa	0,955

- Sq = Altura de Raíz Cuadrada Media
- Ssk = Sesgo
- Sku = Curtosis
- Sp = Altura Máxima de Pico
- Sv = Profundidad Máxima de Valle
- Sz = Altura Máxima
- Sa = Altura Media Aritmética

2) Microscopía de Fuerza Atómica

En la figura 13 se puede observar una de las imágenes obtenidas mediante microscopía de fuerza atómica para este ensayo.

En la Tabla II están los resultados de rugosidad obtenidos por microscopía de fuerza atómica para este experimento.

3) Espectrofotometría

La figura 14 muestra el comportamiento del porcentaje de radiación reflejada por el ensayo en el rango desde 200nm hasta 2500nm.

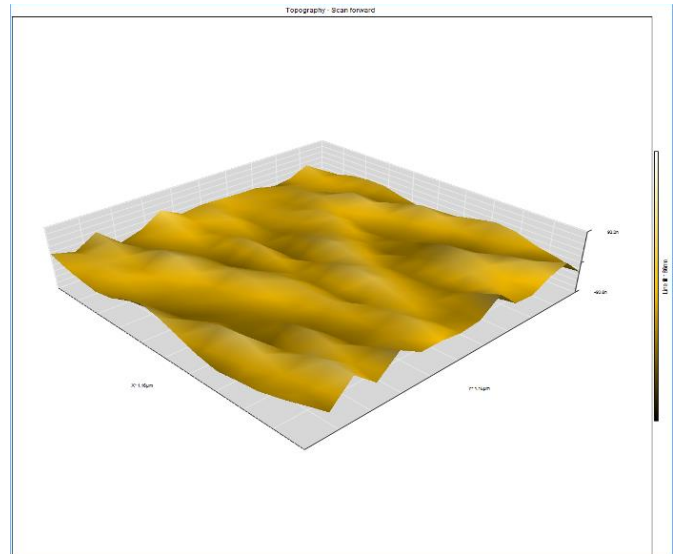


Fig. 13. Imagen obtenida por AFM del ensayo Al+SiO₂.

TABLA II
RESULTADOS DE RUGOSIDAD OBTENIDOS POR MICROSCOPÍA DE FUERZA ATÓMICA PARA EL ENSAYO I

Parámetros de Altura	Medida
Área	1,352 pm ²
Sa	15,55nm
Sq	18,651nm
Sy	88,207nm
Sp	42,452nm
Sv	-45,455nm
Sm	6,6098pm

- Sa = Rugosidad promedio
- Sq = Rugosidad por raíz media cuadrática
- Sy = Altura máxima
- Sp = Máxima altura promedio de pico
- Sv = Máxima profundidad de valle
- Sm = Espacio medio entre picos

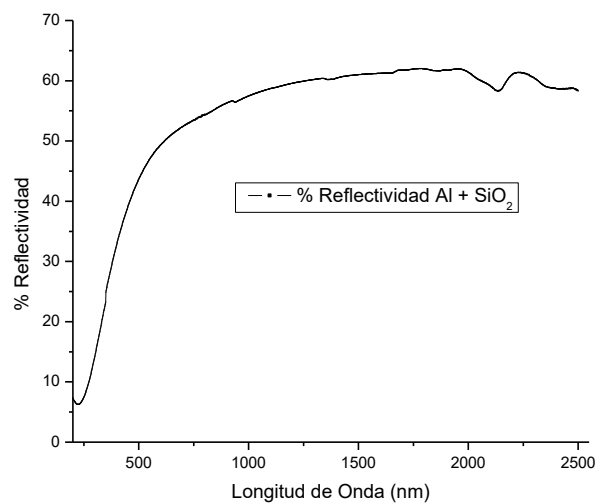


Fig. 14. Grafica de porcentaje de reflectividad para el ensayo Al+SiO₂

B. Ensayo 2, Al + MgF₂ + SiO₂

Los resultados obtenidos por medio de la caracterización realizada para este ensayo fueron los siguientes:

1) Perfilometría

En la figura 15 se muestra una de las imágenes obtenidas por perfilometría para el segundo ensayo realizado.

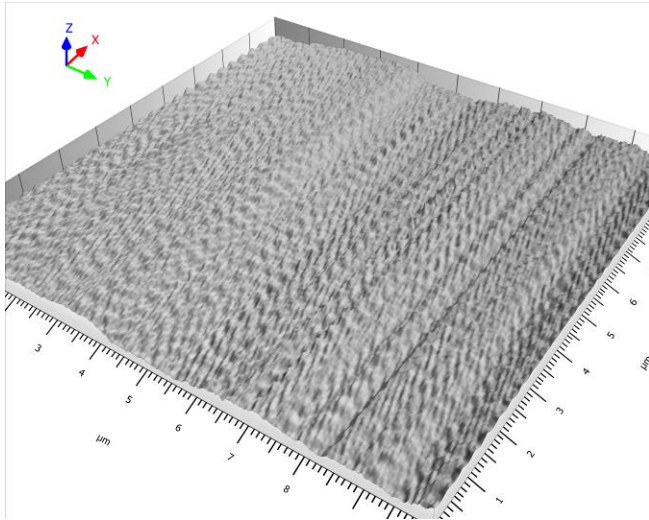


Fig. 15. Imagen obtenida por perfilometría del ensayo Al+MgF₂+SiO₂.

Los parámetros de altura obtenidos por perfilometría para este ensayo se presentan en la Tabla III.

TABLA III
RESULTADOS DE RUGOSIDAD OBTENIDOS POR PERFILOMETRÍA PARA EL ENSAYO 2

Parámetros de Altura	Medida (μm)
Sq	0,396
Ssk	-0,053
Sku	1,587
Sp	0,678
Sv	0,924
Sz	1,601
Sa	0,355

- Sq = Altura de Raíz Cuadrada Media
- Ssk = Sesgo
- Sku = Curtosis
- Sp = Altura Máxima de Pico
- Sv = Profundidad Máxima de Valle
- Sz = Altura Máxima
- Sa = Altura Media Aritmética

2) Microscopía de Fuerza Atómica

En la figura 16 se puede observar una de las imágenes obtenidas mediante microscopía de fuerza atómica para este ensayo.

La Tabla IV muestra los resultados de rugosidad obtenidos por microscopía de fuerza atómica para esta muestra

3) Espectrofotometría

En la figura 17 se observa el comportamiento del porcentaje de radiación reflejada por la muestra en el rango desde 200nm hasta 2500nm.

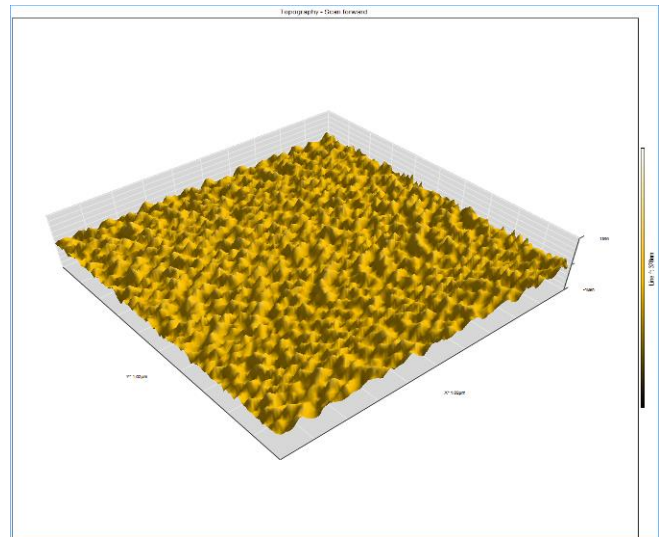


Fig. 16. Imagen obtenida por AFM del ensayo Al+MgF₂+SiO₂.

TABLA IV
RESULTADOS DE RUGOSIDAD OBTENIDOS POR MICROSCOPÍA DE FUERZA ATÓMICA PARA EL ENSAYO 2

Parámetros de Altura	Medida
Área	1,035 pm ²
Sa	16,133nm
Sq	19,655nm
Sy	130,49nm
Sp	62,273nm
Sv	-68,22nm
Sm	330,65pm

- Sa = Rugosidad promedio
- Sq = Rugosidad por raíz media cuadrática
- Sy = Altura máxima
- Sp = Máxima altura promedio de pico
- Sv = Máxima profundidad de valle
- Sm = Espacio medio entre picos

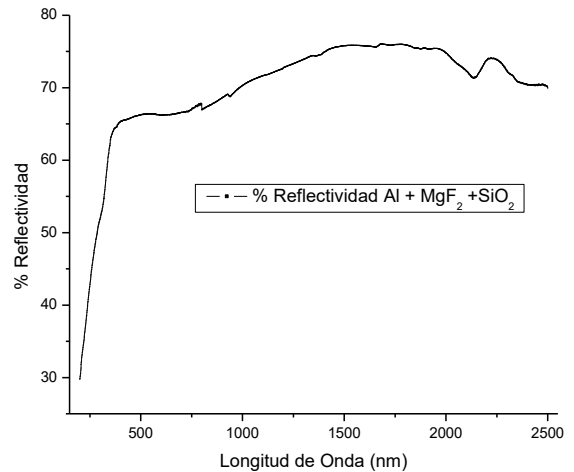


Fig. 17. Grafica de porcentaje de reflectividad para el ensayo Al+MgF₂+SiO₂.

C. Ensayo 3, Cr + Al + MgF₂ + SiO₂

Los resultados obtenidos por medio de la caracterización realizada para este ensayo fueron los siguientes:

1) Perfilometría

En la figura 18 se observa una imagen obtenida por perfilometría para el tercer ensayo realizado.

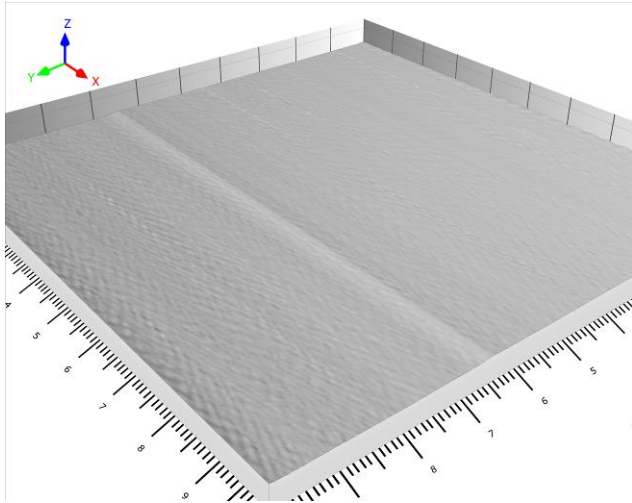


Fig. 18. Imagen obtenida por perfilometría del ensayo Cr+Al+MgF₂+SiO₂.

Los parámetros de rugosidad obtenidos por perfilometría para este ensayo se presentan en la Tabla V.

TABLA V
RESULTADOS DE RUGOSIDAD OBTENIDOS POR PERFILOMETRÍA PARA EL ENSAYO 3

Parámetros de Altura	Medida (µm)
Sq	0,203
Ssk	0,537
Sku	39,441
Sp	7,199
Sv	5,358
Sz	12,558
Sa	0,167

- Sq = Altura de Raíz Cuadrada Media
- Ssk = Sesgo
- Sku = Curtosis
- Sp = Altura Máxima de Pico
- Sv = Profundidad Máxima de Valle
- Sz = Altura Máxima
- Sa = Altura Media Aritmética

2) Microscopía de Fuerza Atómica

Por microscopía de fuerza atómica, la figura 19 muestra una de las imágenes obtenidas para este ensayo.

La TABLA VI resume los resultados de rugosidad obtenidos por microscopía de fuerza atómica, para este ensayo.

3) Espectrofotometría

En la figura 20 se observa el comportamiento del porcentaje de radiación reflejada por la muestra en el rango desde 200nm hasta 2500nm.

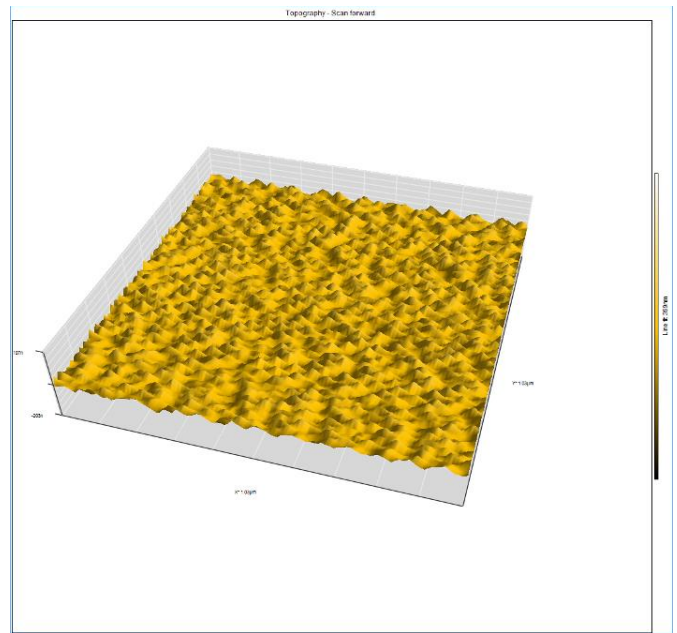


Fig. 19. Imagen obtenida por AFM del ensayo Cr+Al+MgF₂+SiO₂.

TABLA VI
RESULTADOS DE RUGOSIDAD OBTENIDOS POR MICROSCOPIA DE FUERZA ATÓMICA PARA EL ENSAYO 3

Parámetros de Altura	Medida
Área	1,075 pm ²
Sa	16,661nm
Sq	20,235nm
Sy	116,29nm
Sp	55,005nm
Sv	-61,282nm
Sm	328,59pm

- Sa = Rugosidad promedio
- Sq = Rugosidad por raíz media cuadrática
- Sy = Altura máxima
- Sp = Máxima altura promedio de pico
- Sv = Máxima profundidad de valle
- Sm = Espacio medio entre picos

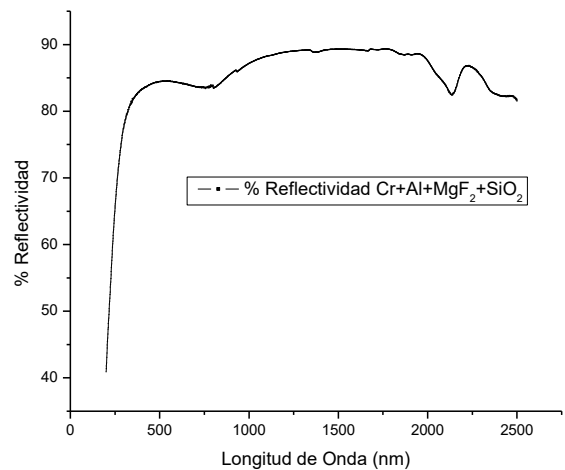


Fig. 20. Grafica de porcentaje de reflectividad para el ensayo Cr+Al+MgF₂+SiO₂.

D. *Ensayo 3, Cr + Al + MgF₂ + SiO₂ + ZnO*

Los resultados obtenidos por medio de la caracterización realizada para este ensayo fueron los siguientes:

1) *Perfilometría*

En la figura 21 se muestra una de las imágenes obtenidas por perfilometría para el primer ensayo realizado.

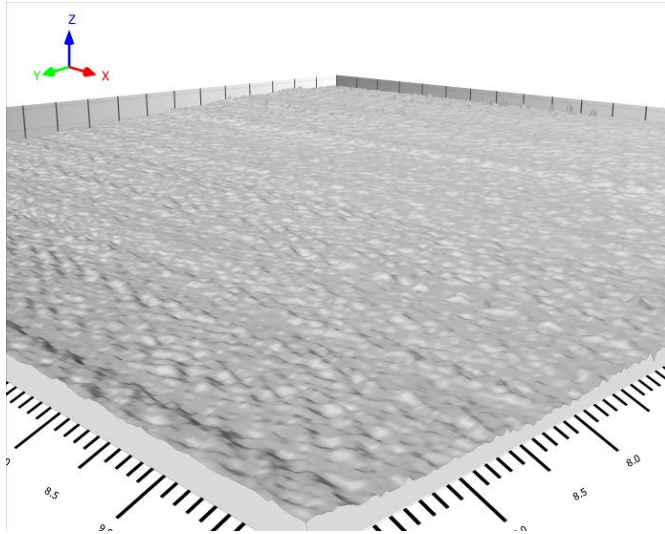


Fig. 21. Imagen obtenida por perfilometría del ensayo Cr+Al+MgF₂+SiO₂+ZnO.

Los parámetros de altura obtenidos por perfilometría para este ensayo se presentan en la Tabla VII.

TABLA VII
RESULTADOS DE RUGOSIDAD OBTENIDOS POR PERFILOMETRÍA PARA EL ENSAYO 4

Parámetros de Altura	Medida (µm)
Sq	0,218
Ssk	0,356
Sku	1,587
Sp	0,655
Sv	0,442
Sz	1,097
Sa	0,196

- Sq = Altura de Raíz Cuadrada Media
- Ssk = Sesgo
- Sku = Curtosis
- Sp = Altura Máxima de Pico
- Sv = Profundidad Máxima de Valle
- Sz = Altura Máxima
- Sa = Altura Media Aritmética

2) *Microscopía de Fuerza Atómica*

La figura 22 se puede observar una de las imágenes obtenidas mediante microscopía de fuerza atómica para este ensayo.

La Tabla VIII resume los resultados de rugosidad obtenidos por microscopía de fuerza atómica.

3) *Espectrofotometría*

En la figura 23, se observa el comportamiento del porcentaje de radiación reflejada por la muestra en el rango desde 200nm hasta 2500nm.

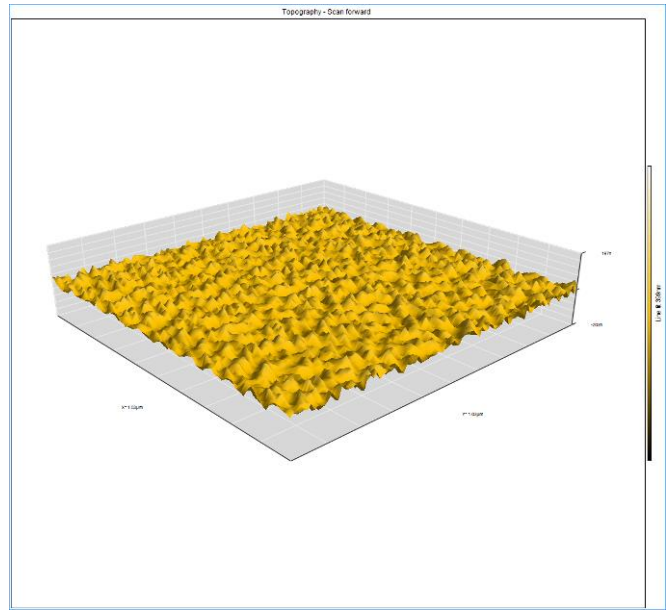


Fig. 22. Imagen obtenida por AFM del ensayo Cr+Al+MgF₂+SiO₂+ZnO.

TABLA VIII
RESULTADOS DE RUGOSIDAD OBTENIDOS POR MICROSCOPIA DE FUERZA ATÓMICA PARA EL ENSAYO 3

Parámetros de Altura	Medida
Área	1,075 pm ²
Sa	15,864nm
Sq	19,358nm
Sy	119,92nm
Sp	60,952nm
Sv	-58,97nm
Sm	1921,4fm

- Sa = Rugosidad promedio
- Sq = Rugosidad por raíz media cuadrática
- Sy = Altura máxima
- Sp = Máxima altura promedio de pico
- Sv = Máxima profundidad de valle
- Sm = Espacio medio entre picos

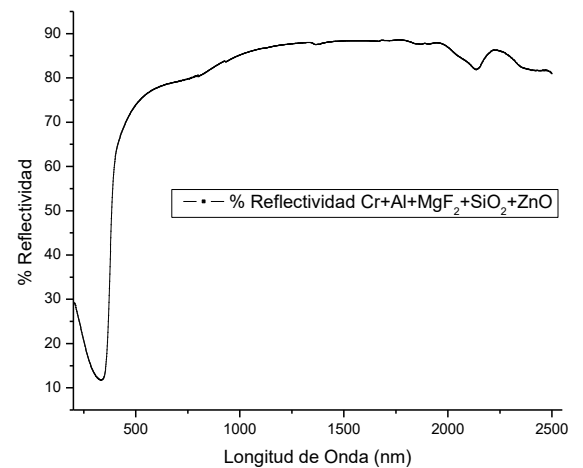


Fig. 23. Grafica de porcentaje de reflectividad para el ensayo Cr+Al+MgF₂+SiO₂+ZnO.

VII. ANÁLISIS

Los resultados obtenidos por perfilometría muestran que la altura máxima de los picos en la mayoría de los prototipos desarrollados estuvo por debajo de dos micrómetros, obteniéndose cierta desviación en el tercer ensayo realizado ($\text{Cr}+\text{Al}+\text{MgF}_2+\text{SiO}_2$), donde la altura máxima estuvo por encima de siete micrómetros.

En relación a las profundidades máximas de los valles, de nuevo para la mayoría de las muestras estuvo por debajo de dos micrómetros, con excepción de la muestra relacionada al tercer ensayo, en el cual la profundidad estuvo por encima de los cinco micrómetros.

En cuanto a los resultados obtenidos por microscopía de fuerza atómica la rugosidad promedio de todos los prototipos se encuentra entre 15,55nm y 16,661nm, lo que muestra cierta uniformidad en el proceso de deposición empleado en el desarrollo.

Considerando que los resultados obtenidos por microscopía de fuerza atómica pueden ofrecer mayor precisión, se puede establecer que todas las prototipos poseen una rugosidad similar, y basados en las patentes empleadas como punto de partida de esta investigación, siendo los intersticios de las superficies posibles lugares para la acumulación de residuos orgánicos, específicamente la patente US 6,290,180 [4], que sugiere colocar una capa de material oxidante (en nuestro caso se utilizó ZnO), puede ser de bastante utilidad y resulta recomendable mantener esta capa para posteriores investigaciones.

Por otro lado, para el uso de estos dispositivos en vehículos que estarán expuestos al ambiente espacial, es necesario que los mismos tengan una alta reflectividad en el rango de luz visible, para que resulte práctica su utilización.

Para todos los dispositivos se observa que en la mayor parte del espectro visible (desde 380nm hasta 780nm) y para el espectro infrarrojo cercano (por encima de 700nm) la cantidad de radiación reflejada se encuentra por encima del 60%, obteniéndose mejores resultados para el tercer y cuarto ensayo, en los que la cantidad de capas depositadas se incrementa, y en los cuales la cantidad de radiación reflejada para ciertos rangos de longitudes de onda sobrepasa el 80%.

Estos resultados cumplen con lo esperado para estos dispositivos, resultando ideales para su mejoramiento y utilización los prototipos obtenidos mediante el tercer y cuarto ensayo.

Los resultados obtenidos para transmisión y absorptividad no fueron concluyentes por lo que los mismos no se muestran en el artículo.

VIII. CONCLUSIONES

- Es posible obtener en Venezuela reflectores ópticos solares aplicables en vehículos espaciales.
- Es necesario mejorar el control de las técnicas de deposición utilizadas, para realizar nuevos ensayos que conlleven al mejoramiento de los prototipos realizados.
- Se recomienda realizar nuevos ensayos basados en los prototipos obtenidos por los ensayos 3 y 4, los cuales proporcionaron una reflectividad bastante alta, además de poseer la capa de óxido de zinc, que permitiría que los desechos orgánicos no se acumulasen en la superficie del

reflector, permitiendo a éste cumplir de manera más óptima su función de radiación.

- Al no tener resultados concluyentes para la absorptividad y transmitancia de los prototipos desarrollados, no es posible hacer un estudio comparativo con los dispositivos comerciales, por lo que se sugiere en próximos ensayos que el espesor de las capas a depositar se ajuste más a los especificados en las patentes consultadas, a fin de generar resultados similares a los obtenidos en el desarrollo de dichas patentes.

REFERENCIAS

- [1] Spacecraft Thermal Control Handbook, Volume I, Fundamental Technologies, El Segundo, CA, USA, 2002, pp. 139-143, 791-795.
- [2] Y. Hasuda, "Flexible optical solar reflector," U.S. Patent 4 666 760, May. 19, 1987.
- [3] R. A. Tanzilli and J. J. Gebhardt, "Optical solar reflector," U.S. Patent 5 541 010, Jul. 30, 1996.
- [4] K. W. Browall and C. Wey, "Photocatalytic coatings on optical solar reflector to decompose organic contaminants," U.S. Patent 6 290 180 B1, Sep. 18, 2001.
- [5] C. D. Iacovangelo, Y. Pan, C. Wey, and M. Chen, "Optical solar reflectors," U.S. Patent 6 587 263 B1, Jul. 1, 2003.
- [6] P. J. Brooks, "Thermal control films for spacecraft," U.S. Patent 8 665 175 B2, Mar. 4, 2014.
- [7] M. Ohring, "Physical Vapor Deposition," "Characterization of thin films," The materials science of thin films, San Diego, CA, USA: Academic Press, 1992, pp. 79-140, 249-300.
- [8] Handbook of thin-film deposition processes and techniques, 2nd ed., Noyes Publications, Norwich, NY, USA, 2002, pp. 14-25, 319-374.
- [9] J. Venables. "Surfaces in vacuum: ultra-high vacuum techniques and processes," Introduction to surface and thin film processes, Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2000, pp. 54-60.
- [10] Optical Profilometry [En línea] Disponible en: www.nanoscience.com/technology/optical-profiler-technology/
- [11] P. Eaton, P. West, "Introduction," "AFM Instrumentation," Atomic Force Microscopy. New York, NY, USA: Oxford University Press, 2010, pp. 1-48.
- [12] A. Renjini, D. Dileep. (2017, March). Spectrophotometry and Spectrometry – Concept and Applications. Presentado en NACTAE [Online]. Disponible: http://www.ijariie.com/AdminUploadPdf/SPECTROPHOTOMETRY_AND_SPECTROMETRY__CONCEPT_AND_APPLICATIONS_1528.pdf.



Ricardo J. Morales nació en Cabimas, Zulia, Venezuela en 1982. Recibió los grados de Lcdo. y MSc. en Física de la Universidad del Zulia en los años 2006 y 2011 respectivamente, en Maracaibo, Zulia.

Desde 2004 y hasta 2005 se desempeñó como pasante en el Laboratorio de Ciencia de Materiales, de la Facultad Experimental de Ciencias en la Universidad del Zulia. Desde 2007 y hasta 2011 se desempeñó como docente del Instituto Universitario Politécnico Santiago Mariño. Desde 2011 y hasta 2013 se desempeñó como co-investigador y encargado en el manejo del microscopio electrónico de barrido en la Unidad de Caracterización y Estructura de Materiales del Instituto Zuliano de Investigaciones Tecnológicas. Desde 2013 y hasta la actualidad se desempeña como Ingeniero de Diseño, Integración y Ensamblaje en la Agencia Bolivariana para Actividades Espaciales (ABAE). Posee 10 productos de investigación. Sus intereses de investigación son ciencia e ingeniería de materiales, nanotecnología, nuevos materiales caracterización de materiales, deposición de películas delgadas, control térmico, ingeniería espacial, energías alternativas, gerencia de proyectos entre otros.

El MSc. Ricardo Morales es miembro de la Asociación de Egresados en Ciencias desde el año 2011.



Keyffer J. Salas nació en el poblado de Zea, estado Mérida, Venezuela en 1980. Recibió el grado de Licenciado en Física de la Universidad de los Andes en el año 2004. Actualmente cursa estudios de Doctorado en física de la Materia Condensada en la Universidad de los Andes, en Mérida, estado Mérida.

Se desempeñó como Investigador en la Universidad técnica Checa-Praga en la República Checa, y como Preparador en la Universidad de los Andes, Venezuela. Actualmente se desempeña como Director del Centro Nacional de Tecnología Óptica, perteneciente a la Fundación Centro de Investigaciones de Astronomía “Francisco J. Duarte”, en el estado Mérida, Venezuela. Posee varios productos de investigación entre participaciones en congresos y publicaciones en revistas. Sus intereses de investigación son la física de la materia condensada, técnicas de caracterización de materiales, plasma, ciencia experimental, termodinámica, enseñanza de la física, innovación, entre otros