

Información Suplementaria S1

S1. La técnica de depósito bajo ángulo oblicuo (OAD)

Para obtener la microestructura deseada, en la técnica de OAD el plano del sustrato se inclina un ángulo (α) con respecto al flujo incidente de vapor. En la Figura 1S se ilustran los mecanismos de crecimiento de estructuras micro-columnares por OAD donde se pueden observar la nucleación, el sombreado y el crecimiento columnar. Cuando son depositadas sobre sustratos de baja rugosidad, las películas obtenidas por OAD consisten en columnas distribuidas aleatoriamente con una fuerte competencia entre las columnas en crecimiento, en donde unas crecen a expensas de las adyacentes. La aleatoriedad de las columnas resulta en propiedades no homogéneas de la película en el plano paralelo al sustrato, mientras que la competencia entre las columnas en crecimiento, hace a las películas no uniformes en la dirección a lo largo de la normal al sustrato. A medida que este efecto continúa, la película resultante está compuesta de columnas no interconectadas entre si y separadas por grandes vacíos intercolumnares. Puesto que el efecto de sombreado es el mecanismo principal, mayores valores de α conducen a una porosidad más pronunciada. A medida que este efecto continúa, la película resultante está compuesta de columnas no interconectadas entre si y separadas por grandes vacíos intercolumnares. Puesto que el efecto de sombreado es el mecanismo principal, mayores valores de (α) conducen a una porosidad más pronunciada (Robbie & Brett, 1997). Esto ocurre debido a que el efecto de sombreado genera áreas donde el flujo de vapor no puede alcanzar directamente a los núcleos de átomos sobre la superficie y por ende el efecto de sombra es ampliamente favorecido (van Kranenburg & Lodder, 1994) conduciendo a una

microestructura columnar porosa de granos aislados e inclinados hacia la fuente de vapor.

Figura 1S. Ilustración de los mecanismos de crecimiento de estructuras micro-columnares por OAD.

Para realizar el movimiento que permite modificar el ángulo α es necesario modificar la geometría de una configuración de pulverización catódica convencional, y para eso hay que diseñar un dispositivo que permita transmitir este movimiento pero sin que se modifique la ubicación de la superficie del sustrato con respecto al flujo de material evaporado, ya que de ocurrir esto, el sustrato quedaría en una zona que estaría por fuera del flujo de material afectando la tasa de deposición y el efecto de sombreado. Este dispositivo se encuentra patentado (Zambrano Romero, et al., 2016) y está basado en un cilindro con tres ejes y dos cojinetes que pueden soportar altas temperaturas. Para este estudio, el ángulo de deposición del sustrato se fijó a $\alpha = +45^\circ$ con respecto al flujo incidente. Además, se realizaron rotaciones en el plano de 180° para obtener una morfología similar a un "zigzag" y detener la deposición cuando se completó la rotación ($\alpha = -45^\circ$). Las Figuras 2S (a) y (b) muestra la configuración experimental utilizada en el presente estudio para rotaciones de 180° en el plano con el fin de obtener una morfología de crecimiento similar a un "zigzag" al igual que la imagen en sección transversal de microscopía electrónica de barrido (SEM- scattering electron microscopy) de la película delgada YSZ obtenida bajo esta configuración, lo que denominamos como un período (Λ) espacial de depósito

($n = 1$). A continuación, se puede variar el número de “zigzag” para $n=1, 2, 10, 30, 50$ y 70 , manteniendo constante el espesor total ($3,5 \mu\text{m}$) de la multicapa.

Figura 2S. (a) Configuración experimental utilizada para las rotaciones de 180° en el plano obteniéndose una morfología de crecimiento en “zigzag”. (b) Vista en sección transversal de SEM de película delgada de YSZ obtenida bajo esta configuración con un período ($n = 1$) (Amaya, et al., 2019).