

# ADECUACIÓN DE LOS PARÁMETROS TERMOCRÓMICOS DE RECUBRIMIENTOS DE VO<sub>2</sub> MEDIANTE LA MORFOLOGÍA A UNA MAYOR EFICIENCIA DE AHORRO ENERGÉTICO EN VENTANAS INTELIGENTES.

Ramírez del Solar M., J. Outon, Blanco E., Domínguez M., Bakkali H., Aguinaco A., Ortega D., Manuel J.M., Litrán, R.

Departamento de Física de la Materia Condensada, Facultad de Ciencias, Universidad de Cádiz

Uno de los focos de atención de las estrategias de ahorro de energía es la construcción de edificios más sostenibles ya que suponen el 40% del consumo total. Las múltiples tecnologías propuestas se orientan a la reducción del consumo, pero manteniendo el confort y la comodidad de los edificios, dado que en los países más industrializados pasamos casi el 80% de nuestro tiempo en su interior. Una de las fuentes y sumideros de energía son las ventanas que usamos para mantener el contacto visual con el exterior y permitir la iluminación natural de las estancias. A través de ellas a menudo la energía que se cuele de fuera o que se nos escapa del interior es excesiva, por lo que hacerlas eficientes equivale a inteligentes como para conmutar su transmitan-

cia de la energía solar. Entre los materiales cromogénicos que modifican de forma reversible su transmitancia como respuesta a un estímulo, los termocrómicos, que responden a la temperatura, son una alternativa sencilla y barata que aprovecha el efecto térmico asociado a la radiación infrarroja. El más estudiado es el VO<sub>2</sub>, cuyas propiedades termocrómicas están asociadas a una transición metal-aislante (MIT) (más bien metal-semiconductor, ligada a la transición estructural (SPT) desde una fase monoclinica (M) a una fase rutilo R). En la actualidad se admite que la fuerza conductora del proceso es un acoplamiento tanto de la transición metal aislante, inducida por las interacciones electrónicas (Modelo de Mott) como de la transforma-

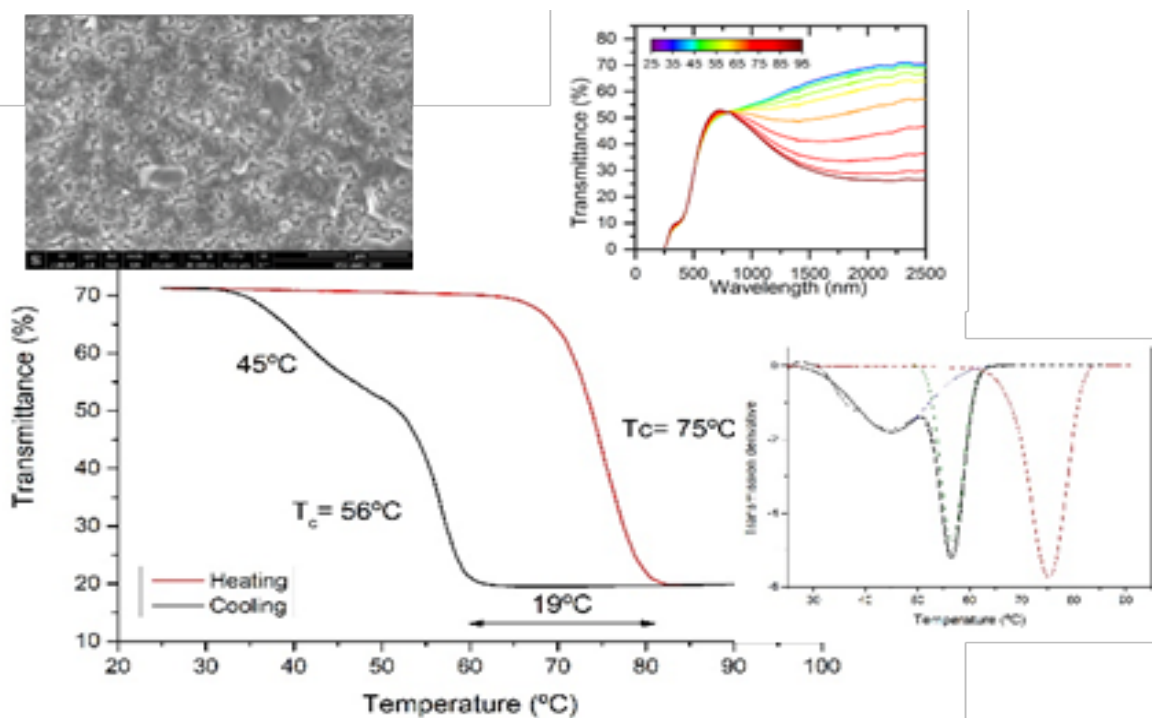


Figura 1. Variación de la transmitancia con la temperatura a 2000nm, vis-NIR (inset superior) y derivada (inset inferior).

## Las múltiples tecnologías propuestas se orientan a la reducción del consumo, pero manteniendo el confort y la comodidad de los edificios, dado que en los países más industrializados pasamos casi el 80% de nuestro tiempo en su interior.

ción de fase (SPT), inducida por distorsiones estructurales (Modelo de Peierls). El semiconductor, transparente a la radiación infrarroja, deja entrar la energía solar a baja temperatura, que es cuando se necesita, pero cuando se alcanza una temperatura crítica, 68°C para VO<sub>2</sub> masivo, el material sufre la transformación a la fase metálica que bloquea la radiación IR justo cuando el edificio demanda enfriarse, gracias al aumento de la absorción y la reflectancia de esta fase. Otro aspecto clave es que la %T en el visible no varía sensiblemente en esta transición, lo que permitiría mantener la luminosidad en el edificio. Para cuantificar ambos efectos se usan dos parámetros,  $\Delta T_{sol}$  y  $T_{lum}$ , que corresponden a la integral espectral de transmitancia solar y luminosa, respectivamente, evaluadas a partir de la transmitancia del material y de la sensibilidad espectral del ojo humano a la luz y del espectro de irradiancia solar para masa de aire 1.5.

Por tanto, los principales requisitos de recubrimientos termocrómicos en Smart Windows son: una modulación solar,  $\Delta T_{sol}$ , antes/después de la transición cercano al 20%, que nos asegure la conmutación a opaco al IR a alta temperatura, una transmitancia lumínica,  $T_{lum}$  siempre del 60% para que la iluminación no se vea comprometida y una  $T_c$

próxima a la temperatura de confort (25°C) para un ahorro eficaz en los sistemas AC/calefacción.

En este proyecto hemos preparado láminas de 30nm de espesor de nanocrisales de VO<sub>2</sub>(M) mediante dip-coating, a partir de un sono-sol estable de VO(acac)<sub>2</sub> y PVP que, tras secado y tratamiento térmico en atmósfera reductora, presentan un efecto termocrómico caracterizado por: la temperatura de transición,  $T_c$ , la disminución de la transmitancia en el NIR por encima de  $T_c$ , la histéresis calentamiento/enfriamiento (Figura 1).

Además de la medida de la transmitancia en el NIR en función de la temperatura o la evolución del espectro completo, la caracterización óptica de la lámina (constante dieléctrica, coeficiente de extinción, índice de refracción, etc) y el análisis de su evolución durante el calentamiento, nos permiten conocer aspectos relevantes de la transición que tiene lugar, pero observada a partir de parámetros tales como la energía del gap del semiconductor o la conductividad DC (figura 2). Estos parámetros presentan igualmente la histéresis característica cuyo perfil puede relacionarse

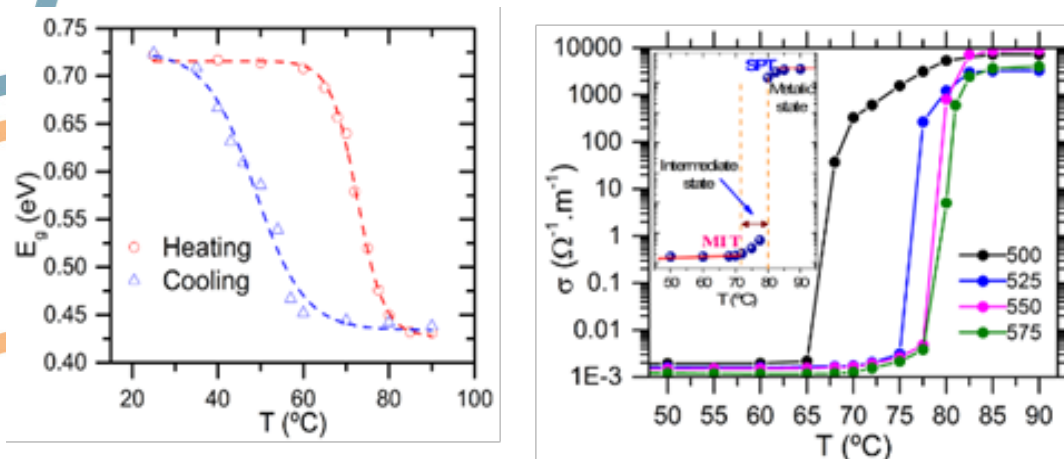


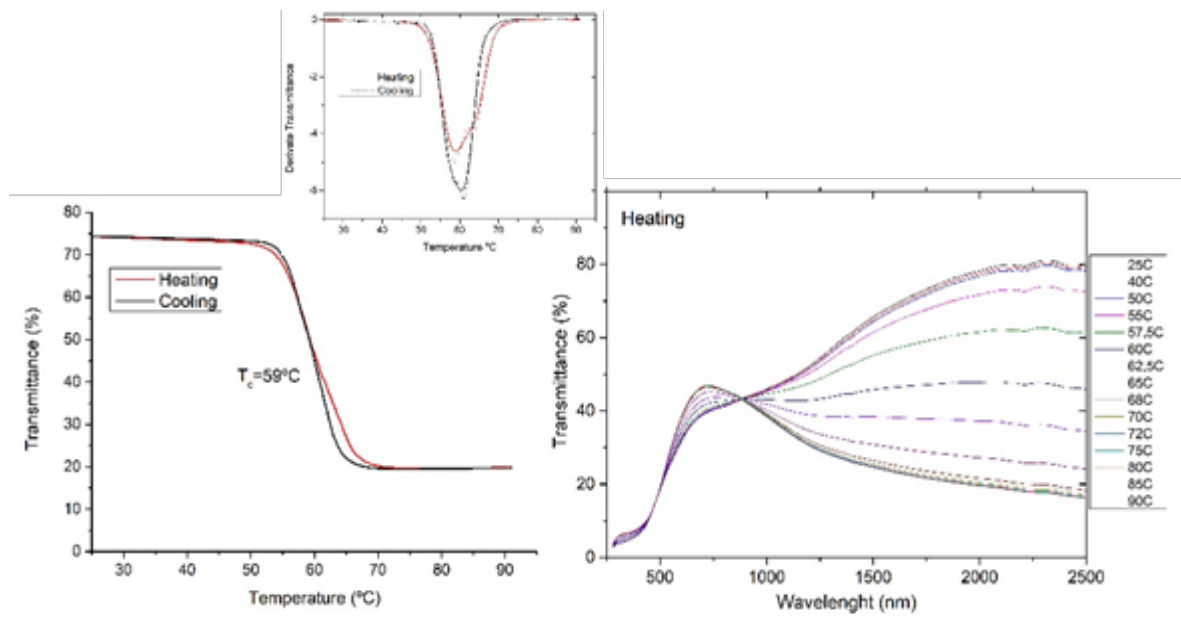
Figura 2. Evolución durante la transición de la Energía del gap y de la conductividad, evidenciando la MIT y SPT.

con la transición metal-aislante y con la transformación de fase estructural.

Las actuaciones que a menudo se proponen sobre el recubrimiento para mejorar alguno de los tres requisitos mencionados para esta aplicación (recubrimientos antireflectantes, dopado con otros elementos, uso de nanopartículas, etc.) a menudo perjudican los demás, por lo que debe alcanzarse un compromiso entre los tres. No obstante, la microestructura juega también un papel importante en estos parámetros dado que esta transformación, de tipo martensítica, se produce mediante procesos de nucleación y propagación que están condicionados por el tamaño de

partícula, los defectos microestructurales y las fronteras de grano o interfaces. En este sentido hemos conseguido a través de los parámetros de procesamiento sintetizar un recubrimiento con salto del 55% de transmitancia en el NIR al superar  $T_c$ , que se ha disminuido por debajo de  $60^\circ\text{C}$ , cuya transmitancia lumínica aumenta en el estado metálico y en el que se ha eliminado prácticamente la histéresis de la transición en la evolución de la transmitancia a  $2000\text{nm}$  (figura 3).

comprobar la eficacia de estos sistemas y su relación con los parámetros termocrómicos estándar mediante un sencillo experimento, en el que iluminamos con una lámpara

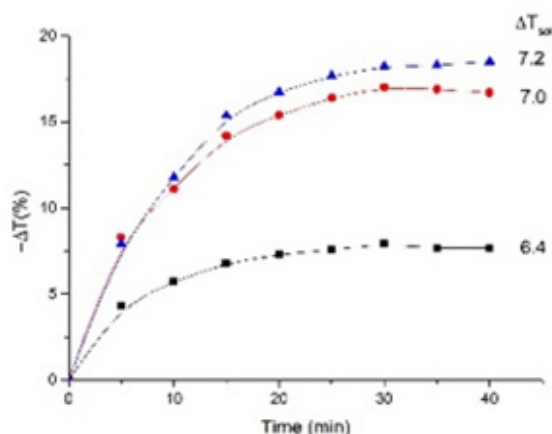


**Figura 3.** Transmitancia a  $2000\text{nm}$  y su derivada (inset) y evolución con la temperatura de los espectros de transmitancia vis-NIR de recubrimiento con histéresis casi nula.

**Estos parámetros presentan igualmente la histéresis característica cuyo perfil puede relacionarse con la transición metal-aislante y con la transformación de fase estructural.**

IR un depósito de agua, cuyas paredes se aíslan térmicamente, y medimos la elevación de la temperatura de ésta cuando la radiación incide a través de una ventana de unos 3cm<sup>2</sup>. En la figura 4 se presenta la reducción de la temperatura del agua, con respecto a la que alcanza cuando se ilumina a través del vidrio, cuando la ventana incluye los recubrimientos de VO<sub>2</sub> que bloquean parte de la radiación

infrarroja. La figura muestra que mediante este sistema la temperatura que alcanza agua se reduce hasta un 20%, existiendo cierta correlación de esta magnitud con el valor de  $\Delta T_{sol}$  calculado a partir de los espectros para cada una de las muestras.



**Figura 4.** Reducción de la temperatura del agua iluminada con radiación NIR a través de un vidrio con recubrimiento en función del tiempo de exposición.



Milagrosa Ramírez del Solar es CU de Física de la Materia Condensada desde 2011. Se licenció en Química en 1987 en la Universidad de Cádiz donde se doctoró en Física en 1991. Ha realizado estancias de investigación en las universidades de Montpellier, Paris-Sud y Técnica de Dinamarca y es investigadora del Grupo de Magnetismo y Óptica aplicada donde centra su actividad en la preparación de nanomateriales, principalmente por sol-gel, y el estudio de sus propiedades ópticas.