

Evaluación de FBGs como sensores de alta temperatura en aplicaciones de energía solar concentrada



Manuel JEREZ¹, Alejandro CARBALLAR¹, Joaquín GRANADO¹

¹ Dep. Ingeniería Electrónica – E.T.S. de Ingeniería – Universidad de Sevilla;
C/ Camino de los Descubrimientos, s/n, 41092, Sevilla (Spain);
mjerez@us.es (M.J.), carballar@us.es (A.C.), j_granado@us.es (J.G.)

*Contacto: Manuel JEREZ (mjerez@us.es)



INTRODUCCIÓN

Objetivo: Evaluar y comparar el uso de distintos tipos de sensores FBG en aplicaciones de Energía Solar de Concentración (CSP/CST)

Redes de Difracción de Bragg en Fibra (FBGs)

El desarrollo de sensores ópticos en los últimos años ha estado ligado a los avances en el uso de FBGs, que se han consolidado como una de las tecnologías más extendidas para la medición en entornos extremos [1]. Aunque las FBGs de zafiro están cobrando protagonismo [4], existen dos técnicas ampliamente adoptadas en la industria para la fabricación de FBGs en fibras ópticas de alta temperatura: las FBGs inscritas con láser de femtosegundo (fsFBGs) [5,6] y las FBGs regeneradas (rFBGs) [5,7].

¿Por qué usarlas en aplicaciones CSP?

El uso de FBGs como sensores de temperatura en los receptores CSP surge como una opción viable para afrontar las condiciones extremas, con temperaturas superiores a 1000°C y niveles de radiación muy altos, presentes en estos sistemas de generación de energía renovable [2]. En este entorno, el uso de termopares y otros sensores tradicionales se hace difícil debido a los altos niveles de radiación, los cuales adulteran la medida y favorecen la descalibración, impidiendo su uso durante largos períodos de tiempo [3].

SENSORES EMPLEADOS

3 sensores de cada tipo fueron utilizados, con longitudes de onda intercaladas de forma que los 6 pudieran funcionar simultáneamente usando un *splitter* óptico. Las fsFBGs fueron fabricados por Engionic (Berlín, Alemania) en un único capilar de acero, y calibradas hasta 700°C usando un polinomio de quinto grado. Los sensores regenerados fueron fabricados por la empresa Calsens (Valencia, España). De estos, uno estaba integrado en un capilar de acero, mientras que el otro se encontraba en un capilar de alúmina; estando calibrados hasta 1050°C utilizando un polinomio de cuarto grado.

Sensor	Solicitada [nm]	Recibida [nm]	Diff. [nm]
fsFBG1	1501	1503.9	2.9
rFBG1	1517.6	-	-
fsFBG2	1534.3	1537.3	3
rFBG2	1550.9	1539.3	11.6
fsFBG3	1567.6	1570.6	3
rFBG3	1584.2	1553.8	30.4

En la tabla superior se incluyen los diseños propuestos y los recibidos, donde se observa una gran imprecisión entre la longitud de onda central solicitada y la recibida en las rFBG, lo cual provocó un solape en el intervalo de funcionamiento entre estas y la fsFBG2.

METODOLOGÍA

Montaje

Cada sensor fsFBG se colocó junto a uno de los rFBG en un horno tubular THHR/60/250/1300, acompañado de un termopar tipo K (TC K 003) utilizado como referencia de temperatura; uniendo los tres sensores con un hilo de platino para garantizar la coherencia espacial. Los experimentos se llevaron a cabo en el Centro de Investigación, Tecnología e Innovación de la Universidad de Sevilla (CITIUS).



Montaje experimental en el horno tubular

Experimentos realizados

El procedimiento en el horno consistió en incrementar progresivamente la temperatura hasta 1000°C, realizando distintas paradas en temperaturas intermedias donde tomar medidas. Una vez alcanzados los 1000°C, la temperatura se redujo a 750°C, seguida de un nuevo incremento hasta 1000°C. Además, se realizó una caracterización de los sensores a temperatura ambiente para analizar sus propiedades ópticas.

CONCLUSIONES

El estudio realizado ha demostrado que es posible obtener mediciones de temperatura consistentes y precisas hasta 1000°C utilizando tanto FBGs inscritas con láser de femtosegundo como FBGs regeneradas.

Entre las dos, las fsFBGs requerirían una recalibración para ampliar su rango operativo y garantizar la precisión de las mediciones. Dentro del rango de temperatura en el que ambos tipos de sensores se superponen, las dos fsFBGs proporcionaron mejores resultados que las rFBGs en comparación con el termopar de referencia. Esta mejora podría atribuirse al uso de un polinomio de grado superior. Entre las dos FBGs regeneradas, la integrada en el capilar de acero presentó mediciones más cercanas a las del termopar.

En cuanto a su posible aplicación en sistemas CSP, las fsFBGs parecen ser la opción más adecuada debido a la precisión en la fabricación y la capacidad de multiplexación que nos provee el fabricante, disminuyendo los costos y ofreciendo mayor control sobre los sensores, siendo su fabricación más cercana al diseño original.

Además, su potencia reflejada significativamente mayor y su perfil de potencia en comparación con las FBGs regeneradas permitirían una operación prolongada en condiciones extremas, ya que requerirían una degradación más avanzada antes de alcanzar el fallo.

RESULTADOS

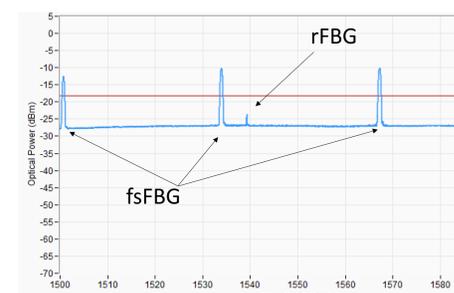
Propiedades ópticas

Antes de discutir los resultados relacionados con los experimentos realizados en el horno, es pertinente analizar los niveles y las formas de la potencia reflejada de los diferentes tipos de sensores. En la figura adyacente, en la parte superior, se presenta la traza de potencia resultante de combinar una fibra inscrita con tres fsFBGs con la rFBG inscrita en acero utilizando un divisor óptico. Resulta evidente observando la imagen comprobar que la potencia reflejada por los sensores inscritos con láser de femtosegundo es de aproximadamente 15dB mayor que la del sensor regenerado. Además, en la figura a la derecha, inferior; se ofrece una vista detallada de la forma de la potencia reflejada para cada sensor, destacando que la fsFBG presenta una respuesta significativamente más uniforme en comparación con la rFBG. Esta mayor regularidad permite que la robustez de la medición sea mayor, al proporcionar un punto de referencia bien definido para la detección del desplazamiento espectral, además de ser potencialmente más resistente a la potencia degradación producida por las altas temperaturas.

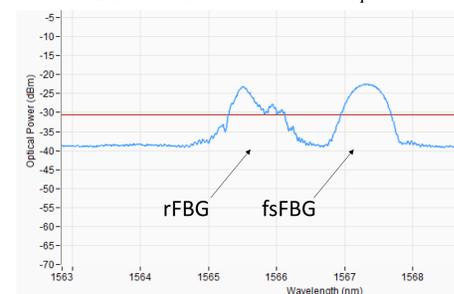
Pruebas de calentamiento

Los resultados obtenidos en los experimentos realizados en el horno se observan en las figuras inferiores. En la figura de la izquierda se analiza el desplazamiento espectral de ambos tipos de sensores, comparando el de una de las fsFBGs y la rFBG de acero. En este caso, la rFBG muestra un desplazamiento espectral ligeramente menor, específicamente 0.3nm menos en la temperatura más alta evaluada de 985°C. Un desplazamiento espectral más bajo permitiría conectar un mayor número de sensores al mismo interrogador. Sin embargo, esta diferencia no es lo suficientemente significativa como para considerarse una ventaja decisiva.

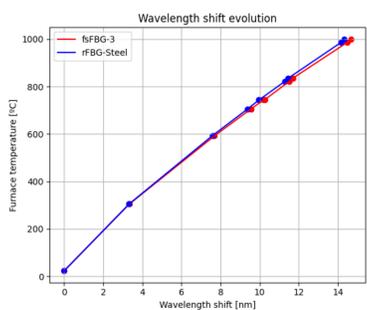
Las dos figuras restantes comparan la precisión en las medidas proporcionadas por los sensores ópticos frente a la temperatura de referencia; definida como el error relativo entre la temperatura de cada FBG y el termopar. La primera conclusión que se puede obtener es que todos los sensores muestran un desempeño adecuado en relación con la precisión de sus medidas, destacando las fsFBGs y la rFBG embebida en el capilar de acero, con errores inferiores al 2%. Entre ellas, las fsFBGs presentan errores más bajos para temperaturas por debajo de 700°C, probablemente gracias al tener un polinomio de calibración de un grado mayor, que hace que la curva de comportamiento se adapte mejor al funcionamiento del propio sensor. Los resultados correspondientes a la FBG regenerada del capilar de alúmina son llamativos en tanto que, a pesar de utilizar la misma tecnología de fabricación que la rFBG de acero, muestra errores significativamente más altos. Finalmente, resulta evidente comentar que para que las fsFBGs funcionen correctamente sería necesaria una recalibración, adaptando el polinomio de grado cinco que permite mayor fiabilidad hasta 1000°C.



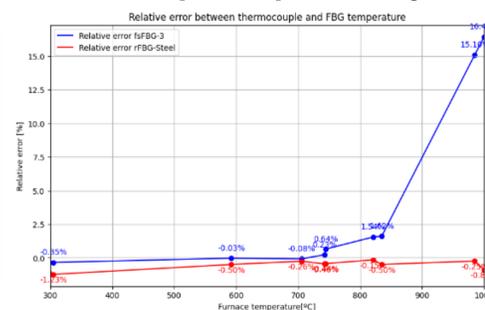
Traza de potencia de 3 fsFBGs y una rFBG combinados con un divisor óptico



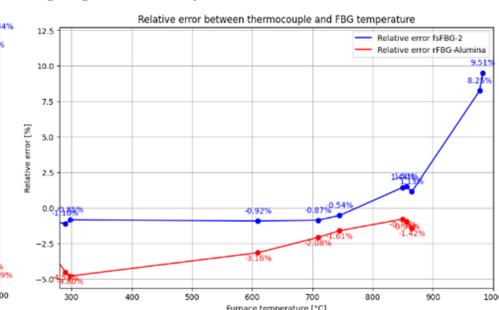
Detalle de la curva de potencia reflejada de una fsFBG y una rFBG



Desplazamiento espectral de las diferentes FBGs durante los experimentos



Error relativo entre fsFBG3 y rFBG de acero frente al termopar



Error relativo entre fsFBG2 y rFBG de alúmina frente al termopar

ACKNOWLEDGEMENTS

Este trabajo se ha desarrollado en el marco de los proyectos de investigación del Ministerio de Ciencia e Innovación, CHLOE con referencia PID2021-125786OB-C22, y CATION con referencia TED2021-132190B-C22; así como del proyecto ASTERIX-CAESAR, que ha recibido financiación del programa de investigación e innovación Horizon Europe de la Unión Europea bajo el acuerdo de subvención N° 101122231.

REFERENCIAS

- [1] Y. Deng et al., "Optical fiber sensors in extreme temperature and radiation environments: A review", IEEE Sensors Journal 22 (2022), pp. 13811-13834.
- [2] R. Rodríguez-Garrido et al., "High-Temperature Monitoring in Central Receiver Concentrating Solar Power Plants with Femtosecond-Laser Inscribed FBG", Sensors 21 (2021), 3762[3].
- [3] Z. Kou et al., "Heat transfer error analysis of high-temperature wall temperature measurement using thermocouple", Case Studies in Thermal Engineering 59 (2024), pp. 104518.
- [4] B. Wang et al., "Review of high temperature measurement technology based on sapphire optical fiber", Measurement 184 (2021), 109868.
- [5] S. J. Mihailov, "Fiber Bragg Grating Sensors for Harsh Environments," Sensors 12 (2012), pp. 1898-1918.
- [6] A. Lerner et al., "An intrinsic sensitivity calibration scheme for high temperature measurements using femtosecond point-by-point written fiber Bragg gratings", Optics & Laser Technology 170 (2024), 110278.
- [7] D. Barrera et al., "Packaged Optical Sensors Based on Regenerated Fiber Bragg Gratings for High Temperature Applications", IEEE Sensors Journal 12 (2012), pp. 107-112