

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

Manuel JEREZ ⁽¹⁾, Alejandro CARBALLAR ⁽²⁾, Joaquín GRANADO

1. Departamento de Ingeniería Electrónica, Universidad de Sevilla (E.T.S. de Ingeniería),
C/Camino de los Descubrimientos s/n, 41092 – Sevilla, Spain

Contact: Manuel JEREZ (mjerez@us.es).

ABSTRACT:

The utilization of femtosecond-laser inscribed and regenerated Fiber Bragg Gratings (FBGs) is proposed, and an experimental comparison of both technologies is conducted to assess their potential as temperature sensors in Concentrated Solar Power (CSP) applications, where temperatures exceeding 1000°C are prevalent. Such environments demand not only high precision but also long-term measurement stability. The results indicate that femtosecond-laser inscribed FBGs exhibit superior accuracy and demonstrate enhanced reliability under extreme conditions. However, recalibration is required to optimize their performance and robustness at the higher temperature ranges encountered in these applications.

Key words: Fiber Bragg Gratings, FBG, Temperature Sensors, Concentrating Solar Power, CSP

1.- Introduction

El desarrollo de sensores ópticos en los últimos años ha estado intrínsecamente ligado a los avances en las redes de Bragg en fibra (FBGs), las cuales se han consolidado como una de las tecnologías más extendidas para la medición de temperatura en entornos extremos [1]. En este contexto, su posible aplicación como sensores de temperatura en los receptores de plantas de energía solar de concentración (CSP) surge como una opción viable para afrontar las condiciones extremas, con temperaturas superiores a 1000°C y niveles de radiación extremadamente altos, presentes en estos sistemas de generación de energía renovable [2]. En este contexto, el uso de termopares, el instrumento tradicional para realizar medidas de temperatura se hace difícil, debido a que los altos niveles de radiación adulteran las medidas, además de favorecer la pérdida progresiva de la calibración, que impide el funcionamiento del sensor durante períodos largos de tiempo [3].

Aunque las FBGs de zafiro están cobrando protagonismo en aplicaciones de altas temperaturas [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 (fs-FBGs) [5,6] y las FBGs regeneradas (rFBGs) [5,7]. Este trabajo presenta una comparación entre estas dos tecnologías y evalúa su rendimiento en un horno tubular alcanzando temperaturas de hasta 1000°C, analizando su idoneidad para aplicaciones en CSP.

2.- Metodología

El diseño realizado y solicitado a los fabricantes de los dos tipos de FBGs se hizo teniendo en cuenta las características de funcionamiento de estas y los supuestos desplazamientos espectrales, observados anteriormente en [2] y contemplados en la literatura [5-7]. De esta forma, se encargaron 3 FBGs de cada tecnología de fabricación, de forma que las longitudes de onda base (a

temperatura ambiente) de los sensores estuvieran intercaladas y repartidas de manera equiespacial, permitiendo el funcionamiento de estas por separado o las 6 a la vez, utilizando un *splitter* óptico. Con el diseño propuesto, que se adjunta en la Tabla 1, los sensores podían alcanzar más de 950°C funcionando a la vez.

Tabla 1: Longitudes de onda solicitadas y recibidas para cada uno de los sensores FBG.

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

A pesar de este diseño, los sensores recibidos no cumplieron con las especificaciones propuestas, produciéndose un solape entre las 2 FBGs regeneradas y la fs-FBG2. Observando la Tabla 1, resulta fácil de identificar que las rFBGs tienen mucha menor precisión en la fabricación que las fs-FBG, que, aunque también tienen una distancia respecto de la longitud de onda solicitada, es menor, además de mantener el espaciado entre las 3 longitudes de onda base.

Las fs-FBGs fueron fabricadas por Engionic (<https://engionic.de/>), y en este artículo se ensayan dos de ellas, integradas en una fibra dentro de un capilar de acero con una tercera FBG. Estos sensores fueron calibrados hasta 700°C mediante un polinomio de quinto grado. Los dos sensores regenerados fueron fabricados por la empresa CalSens (<https://www.calsens.es/>). 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. En la Fig. 1 se muestran las curvas de calibración de los 4 sensores puestos a prueba en este trabajo, donde resulta evidente el

solape prácticamente total entre la fs-FBG2 y la rFBG de acero, así como entre la parte más alta del rango de funcionamiento de la rFBG de alúmina y la fsFBG3.

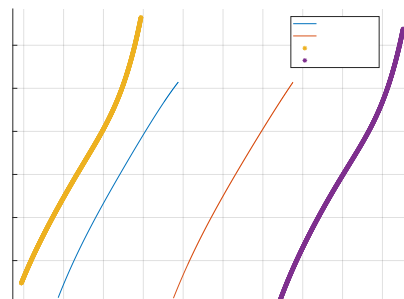


Figura 1. Desplazamiento espectral teórico, según las curvas de calibración, de los 4 sensores puestos a prueba.

Para los experimentos, cada sensor fs-FBG 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 entre las medidas en el interior del horno. En la Figura 2 se pueden observar los 3 dispositivos introducidos en el horno. Los experimentos se llevaron a cabo en el Centro de Investigación, Tecnología e Innovación de la Universidad de Sevilla (CITIUS).

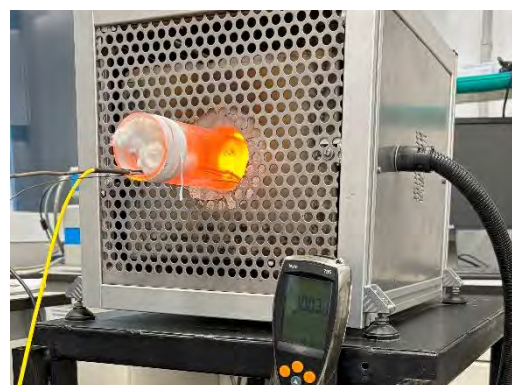


Figura 2. Montaje experimental en el horno tubular.

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.

3.- Resultados

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 Fig. 3, se presenta la traza de potencia resultante de combinar una fibra inscrita con tres fs-FBGs con la r-FBG 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, la Fig. 4 ofrece una vista detallada de la forma de la potencia reflejada para cada sensor, destacando que la fs-FBG 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.

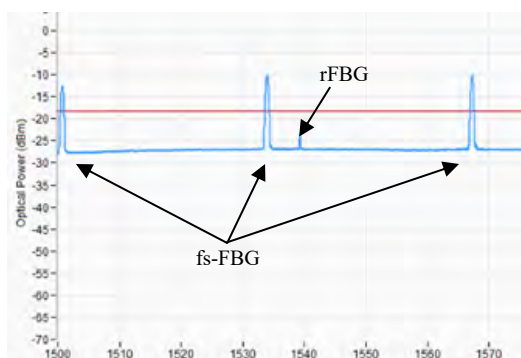


Figura 3. Trazo de potencia de 3 fs-FBGs y una rFBG combinados con un divisor óptico.

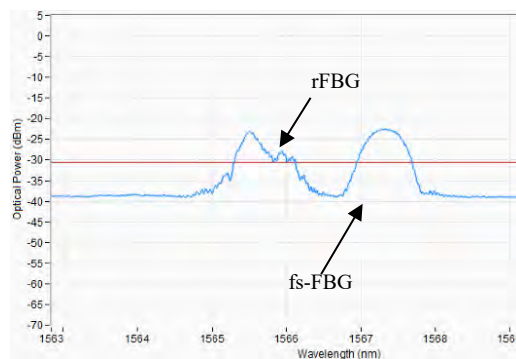


Figura 4. Detalle de la curva de potencia reflejada de una fs-FBG y una rFBG.

En cuanto a los resultados obtenidos en el horno, estos se presentan en la Fig. 5. En primer lugar, se analiza el desplazamiento espectral en la Fig. 5a, comparando el de una de las fs-FBGs con el de 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, dada su gama espectral fija. Sin embargo, esta diferencia no es lo suficientemente significativa como para considerarse una ventaja decisiva, en tanto que el ahorro que se produce al usar rFBGs no es suficiente a lo largo de todo el intervalo espectral del interrogador para incorporar un sensor más. Las Fig. 5b y 5c muestran la precisión en las mediciones proporcionadas por los sensores ópticos frente a la temperatura de referencia, definida como el error relativo entre la temperatura medida por los diferentes FBGs y el termopar.

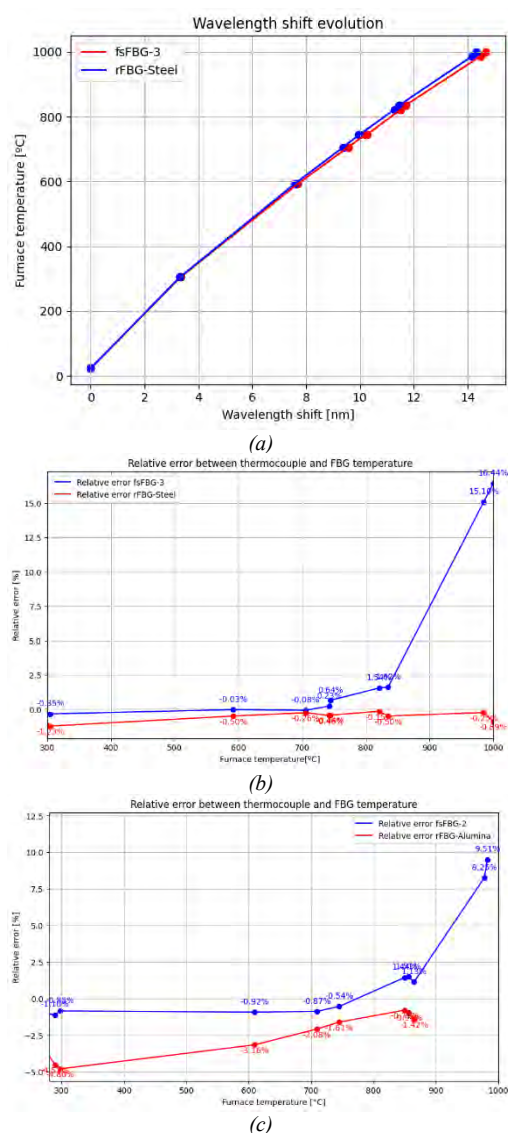


Figura. 5. (a) Desplazamiento espectral de las diferentes FBGs durante los experimentos, (b) error relativo entre fs-FBG y rFBG de acero frente al termopar y (c) error relativo entre fs-FBG y rFBG de alúmina frente al termopar.

La primera conclusión que se puede obtener observando las Figuras 5b y 5c es que todos los sensores muestran un desempeño adecuado en relación con la precisión de sus medidas, destacando las fs-FBGs y la rFBG embebida en el capilar de acero, mostrando errores relativos por debajo del 2% con respecto del termopar de referencia. Entre ellas, las FBGs inscritas con láser de femtosegundos presentan errores más bajos para temperaturas por debajo de 700°C, que es el rango de funcionamiento para el cual estaban calibrados, 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, probablemente debido a la fragilidad del material y los posibles daños físicos sufridos no sólo por la temperatura, sino también durante la propia mecanización y montaje del experimento. Finalmente, resulta evidente comentar que para que las fs-FBGs funcionen correctamente en el rango de temperaturas más alto, sería necesaria una recalibración, adaptando el polinomio de grado cinco que permite mayor fiabilidad hasta los 1000°C a los que ha sido sometido.

4.- 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. Sin embargo, las fs-FBGs 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 fs-FBGs 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, que se ajusta mejor al comportamiento físico del sensor.

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 de energía solar de concentración (CSP), las fs-FBGs parecen ser la opción más adecuada debido a la precisión en la fabricación y la capacidad de multiplexación que nos provee el fabricante, reduciendo los requisitos de equipamiento, disminuyendo los costos y ofreciendo mucho 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.

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.

References

- [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