

Láseres de fibra óptica basados en reflectores clásicos, estrechados y microperforados

Optical fiber lasers based on classic, tapered and micro-drilled mirrors

Arturo SÁNCHEZ-GONZÁLEZ^(1,2), Rosa Ana PÉREZ-HERRERA^(1,2), Pablo ROLDÁN-VARONA^(3,4,5), Luis RODRIGUEZ-COBO⁽⁴⁾, Jose Miguel LÓPEZ-HIGUERA^(3,4,5), y Manuel LÓPEZ-AMO^(1,2)

1. Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Comunicación, Universidad Pública de Navarra, 31006 Pamplona, España
2. Institute of Smart Cities (ISC), Universidad Pública de Navarra, 31006 Pamplona, España
3. Grupo de Ingeniería Fotónica, Universidad de Cantabria, 39005 Santander, España
4. CIBER-bbn, Instituto de Salud Carlos III, 28029 Madrid, Spain
5. Instituto de Investigación Sanitaria Valdecilla (IDIVAL), 39005 Cantabria, España

Persona de contacto: Arturo Sánchez (arturo.sanchez@unavarra.es).

RESUMEN:

En este trabajo se presenta un estudio comparativo entre distintos láseres de fibra óptica altamente dopada con erbio, con cavidades lineales conformadas tanto por reflectores puntuales clásicos como reflectores distribuidos. El estudio analiza experimentalmente las principales prestaciones de cada configuración, destacando las mejoras en estabilidad de emisión y estrechamiento de línea alcanzadas con fibras estrechadas microperforadas.

Palabras clave: láser de fibra, red de Bragg en fibra, fibra óptica microperforada, fibra óptica estrechada, espejo aleatorio distribuido, dispersión Rayleigh.

ABSTRACT:

This work presents a comparative study between different linear cavity highly erbium-doped fiber lasers, both by means of classic point reflectors and newly developed distributed reflectors. The study analyzes the main parameters of each configuration, highlighting the enhancement in emission stability and line narrowing achieved with micro-drilled tapered fibers.

Key words: fiber laser, fiber Bragg grating, micro-drilled optical fiber, tapered optical fiber, distributed random mirror, Rayleigh backscattering.

1.- Introducción

Las tecnologías basadas en el estrechamiento y microperforación de la fibra óptica han sufrido un gran desarrollo en la última década como consecuencia de su creciente uso tanto en el diseño de sistemas sensores de gran sensibilidad [1], [2], como en cavidades láser de altas prestaciones [3], [4]. En este último caso, las inhomogeneidades en el índice de refracción provocadas durante los procesos de estre-

chamiento o microperforación generan un incremento en la retrodispersión aleatoria a lo largo del medio de transmisión, de modo que pueden obtenerse reflectores distribuidos ultracortos. Además de la reducción de la longitud de la cavidad, los láseres resultantes se caracterizan por mostrar reducciones sustanciales de la anchura de línea a la par que mayores estabildades de emisión [5], [6].

Las mejores prestaciones logradas empleando unas y otras alteraciones de la fibra ha llevado

a combinar, en estructuras híbridas, fibras estrechadas y microperforadas. Sin embargo, debido a su novedad, hasta la fecha apenas existen estudios al respecto [7].

Por ello, el presente trabajo propone un primer análisis comparativo de las prestaciones alcanzadas por un resonador láser en el cual se empleen unas y otras tipologías de reflectores, centrando su atención en el estudio de estabildades de oscilación.

2.- Montaje experimental

2.1.- Esquema principal

El esquema experimental del láser de fibra óptica dopada con erbio (EDFL) empleado en el estudio es el mostrado en la Figura 1. Se trata de un resonador en línea convencional, conformado por:

- 2.5m de fibra altamente dopada con erbio (EDF) modelo I25(980/125) (Fibercore Inc.) como medio amplificador.
- una sección de fibra estándar monomodo (SMF) microperforada actuando como reflector distribuido que permanecerá fijo en el extremo derecho
- un segundo reflector en el extremo izquierdo, que se irá alternando de entre los descritos en la sección 2.2.

Por su parte, un multiplexor en división de longitud de onda (WDM) permite inyectar el bombeo láser centrado a 976nm en la cavidad previa, y un acoplador 95:5 extrae un 5% de la señal para su caracterización en un analizador de espectros ópticos (OSA) con resolución máxima de 30pm (MS9740A, Anritsu). Finalmente, un controlador de polarización (PC) sirve como elemento de ajuste, dada la alta sensibilidad de los reflectores distribuidos estudiados a la polarización del campo incidente.

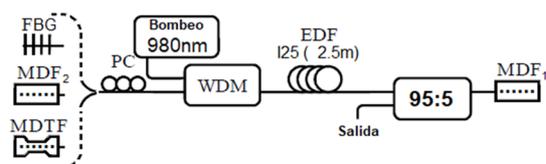


Fig. 1: Esquemático del EDFL empleado.

2.2.- Reflectores considerados

Como ya se ha mencionado, el reflector situado en el extremo izquierdo del montaje y que cierra la cavidad láser se irá alternando. El objetivo es poder establecer una comparativa, lo más representativa posible, de las prestaciones logradas en función de la naturaleza de los espejos que la conformen. Así, las tipologías consideradas son las siguientes:

2.2.1.- Red de difracción de Bragg (FBG)

Como reflector puntual clásico se emplea una red de difracción de Bragg inscrita mediante técnicas holográficas sobre SMF y con una longitud de onda de Bragg de 1535.2nm.

2.2.2.- Fibra microperforada (MDF)

La primera tipología de reflector distribuido pseudoaleatorio la constituye una sección de SMF microperforada mediante un láser de fibra óptica comercial de femtosegundos (CALMAR Laser Inc.). Sin entrar en detalle, la pseudoaleatoriedad en la inscripción se logra mediante la correcta modulación de la tasa de repetición de pulsos del láser, que no de un gravado en sí mismo aleatorio, quedando la técnica empleada ampliamente detallada en [2]. Tanto MDF_1 como MDF_2 son el resultado de este proceso, aunque en fechas y bajo parámetros de inscripción distintos, presentando reflectancias características en el intervalo espectral de interés como la mostrada en la Figura 2.

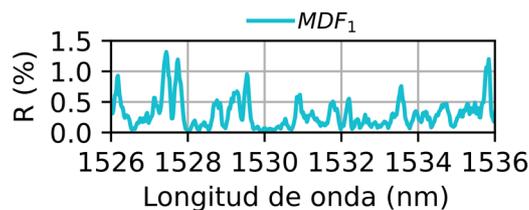


Fig. 2: Reflectancia de MDF_1 en el intervalo espectral estudiado.

2.2.3.- Fibra estrechada y microperforada (MDTF)

La segunda tipología de reflector distribuido pseudoaleatorio la constituye una sección de SMF estrechada y, tras ello, microperforada como en el caso previo. El proceso de estrechamiento se llevó a cabo mediante una estación de manufacturación comercial (TMS, 3SAE Technologies Inc.), siendo la geometría escogida en el caso que nos ocupa un estrechamiento bicónico simétrico de 125 a

100 μ m, con una longitud de transición y de cintura de 5 y 20mm respectivamente. Las dimensiones escogidas aseguran obtener estructuras no adiabáticas [8]. Con ello se busca lograr una transferencia de potencia óptica del modo fundamental HE₁₁ al HE₁₂ que sea significativa para generar patrones interferométricos intermodales apreciables [9]. En caso contrario, la influencia del estrechamiento de fibra en la estructura global sería prácticamente despreciable e indistinguible de la MDF.

Antes de proseguir, queremos mencionar la sección de SMF estrechada sin microperforar como última tipología de reflector. En dicha muestra [7], la reflectancia conseguida por sí sola no es suficiente como para lograr oscilación en cavidades en línea convencionales.

2.3.- Esquema auxiliar

Finalmente, y como quedará reflejado en la sección 3.1, poder comparar las estabildades de emisión para los distintos reflectores considerados requirió sustituir MDF₁ en la Figura 1 por un espejo de lazo en fibra (FLM) clásico que ya hubiera demostrado su utilidad en configuraciones análogas [2]. Para ello, se dispuso un circulador óptico de 3 puertos en el cual un atenuador óptico variable (VOA) fue puesto entre los puertos 1 y 3, acorde a la Figura 3.

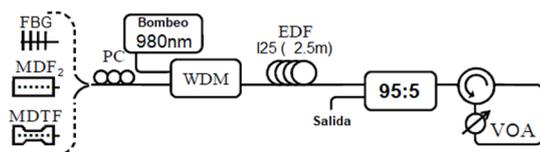


Fig. 3: Esquemático del EDFL empleado en el estudio de estabildades.

3.- Resultados

3.1.- Esquema principal

Introducido un bombeo óptico de 150mW se realizó el ajuste pertinente mediante el controlador de polarización (PC) para que el láser oscilara en una única línea. Los espectros de emisión láser obtenidos para los distintos reflectores y sus correspondientes potencias de pico sobre un periodo de monitorización de 20 minutos son los mostrados en las Figuras 4 y 5, respectivamente.

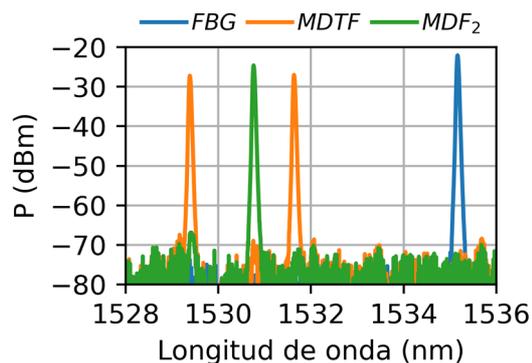


Fig. 4: Espectros de emisión de los EDFL con MDF₁.

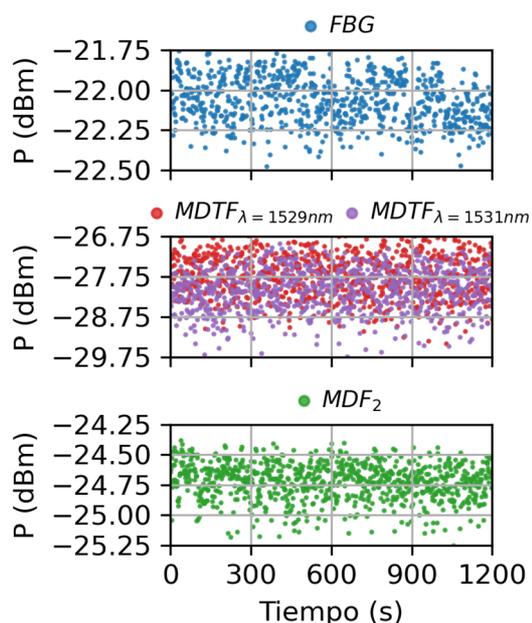


Fig. 5: Potencias de pico de los EDFL con MDF₁.

Por su parte, los principales parámetros característicos del rendimiento del láser obtenidos para cada configuración se incluyen en la Tabla comparativa 1, entre los que se encuentra la longitud de onda de emisión (λ), anchura de línea (FWHM), potencia media de pico (P_{out}), relación señal-ruido (OSNR), e inestabilidad de emisión con un nivel de confianza del 95% para potencia de pico ($\delta P_{95\%}$) y del 100% para longitud de onda ($\delta \lambda_{100\%}$).

Reflector	λ (nm)	FWHM (pm)	P_{out} (dBm)	$\delta P_{95\%}$ (dB)	$\delta\lambda_{100\%}$ (pm)	OSNR (dB)
FBG	1535.155	40	-22.17	0.97	15	53.04
MDF ₂	1530.765	42	-24.87	1.14	20	50.10
MDTF	1529.390	42	-27.85	2.15	20	47.52
	1531.635	42	-28.23	2.92	15	47.14

Tabla 1: Parámetros característicos de los EDFL con MDF₁ como reflector derecho.

Como puede observarse, el mero ajuste de PC no es suficiente para alcanzar emisión en una única línea para el caso de MDTF, por lo que, en su defecto, trató de lograrse oscilación a doble longitud de onda tan estable como fuera posible y con potencias de pico muy próximas entre sí. Esto se debe a que la estructura MDTF presenta una reflectancia en término medio considerablemente mayor a MDF, consecuencia de la superposición de los fenómenos de dispersión asociados a microperforación y estrechamiento, de modo que se logra ahora acción láser para múltiples líneas incluso con niveles relativamente bajos de potencia óptica de bombeo.

Comparado con otros resonadores clásicos multilínea asistidos por fibras exclusivamente estrechadas [10], la nueva estructura mejora la práctica totalidad de parámetros característicos, destacando una mayor estabilidad de oscilación y mejor ecualización de la potencia de pico de las diferentes líneas. Esto resulta especialmente reseñable si consideramos la simplicidad del EDFL propuesto y la inestabilidad de emisión en múltiple línea para EDF como consecuencia de la fuerte competición de modos propia de medios homogéneos [11].

De entre las dos configuraciones restantes, si bien similares, la cavidad clásica con FBG destaca en OSNR respecto de aquella con MDF.

3.2.- Esquema auxiliar

Vista la mejora lograda con MDTF para emisión a doble longitud de onda, se decidió repetir el estudio con el esquema auxiliar de la Figura 3. En este caso, la curva de reflectancia uniforme del FLM junto con el ajuste adicional proporcionado por el VOA son suficientes para obtener una única línea de emisión con todas las estructuras (Figura 6).

De este modo, las prestaciones alcanzadas por las tres configuraciones serán ahora totalmente comparables entre sí, las cuales vienen recogidas en la Tabla 2.

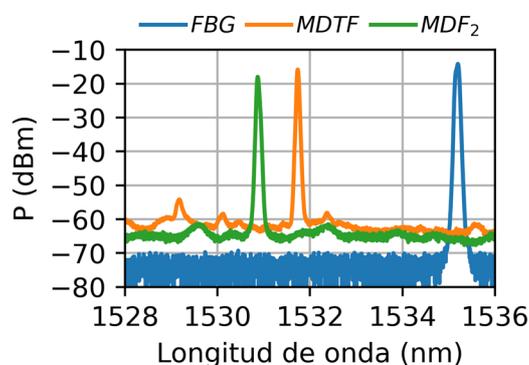


Fig. 6: Espectros de emisión de los EDFL con FLM.

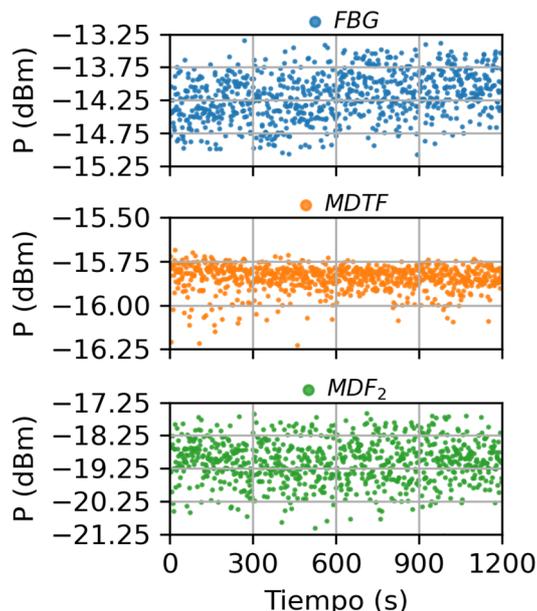


Fig. 7: Potencias de pico de los EDFL con FLM.

<i>Reflector</i>	λ (nm)	<i>FWHM</i> (pm)	<i>P</i> (dBm)	$\delta P_{95\%}$ (dB)	$\Delta\lambda_{100\%}$ (pm)	<i>OSNR</i> (dB)
FBG	1535.197	77	-14.25	1.52	50	57.06
MDF ₂	1530.866	65	-19.31	3.2	67	46.54
MDTF	1531.734	43	-15.87	0.37	14	44.17

Tabla 2: Parámetros característicos de los EDFL con FLM como reflector derecho.

Como puede apreciarse, el uso de estructuras tipo MDTF mejora todos los parámetros del resonador, destacando potencias de pico hasta un orden de magnitud más estables y fluctuaciones en longitud de onda hasta un 80% menores. Únicamente la OSNR sufre una reducción significativa, pero incluso entonces esta sigue siendo superior a 40dB. Finalmente, y tal como se desprendía también de la Tabla 1, la configuración clásica con FBG sigue presentando los mejores valores de OSNR y destaca sistemáticamente respecto de fibras exclusivamente microperforadas sin estrechar.

4.- Conclusión

En el presente trabajo queda recogido un estudio experimental preliminar acerca de las prestaciones alcanzadas por una misma configuración clásica de láser de fibra óptica en función de la naturaleza de los reflectores empleados, entre puntuales y distribuidos. El objetivo último del estudio ha sido comprobar la viabilidad de todas las estructuras propuestas para lograr oscilación estable, así como comparar el rendimiento obtenido en cada caso. De entre las distintas configuraciones estudiadas, aquellas conformadas por fibras estrechadas microperforadas han demostrado presentar los mejores resultados, si bien estas requieren de un ajuste mucho más delicado y preciso que las restantes.

Agradecimientos: Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación y la Agencia Estatal de Investigación (PID2019-107270RB), fondos FEDER, el Ministerio de Educación, Cultura y Deporte de España (Beca FPU2018/02797), y los Proyectos de Jóvenes Investigadores de la UPNA 2019 (PJUPNA1928).

Referencias

- [1] Rui YANG et al., "S-tapered fiber sensors for highly sensitive measurement of refractive index and axial strain", *Journal of Lightwave Technology*, 20, 19, 3126-3132, 2012.
- [2] Rosa Ana PÉREZ-HERRERA et al., "Micro-drilled optical fiber for enhanced laser strain sensors", en *Actas de Seventh European Workshop on Optical Fibre Sensors*, 111992R, 2019.
- [3] Jian GU et al., "A switchable and stable single-longitudinal-mode, dual-wavelength erbium-doped fiber laser assisted by Rayleigh backscattering in tapered fiber", *Journal of Applied Physics*, 118, 10, 103107, 2015.
- [4] Xiaoliang WANG et al., "Random fiber laser based on artificially controlled backscattering fibers", *Applied Optics*, 57, 2, 258-262, 2018.
- [5] Tao ZHU et al., "Tunable dual-wavelength fiber laser with ultra-narrow linewidth based on Rayleigh backscattering", *Optics express*, 24, 2, 1324-1330, 2016.
- [6] Antonio CONSOLI et al., "Random lasing emission tailored by femtosecond and picosecond pulsed polymer ablation", *Optics Letters*, 44, 3, 518-521, 2019.
- [7] Rosa Ana PÉREZ-HERRERA et al., "Optical fiber lasers assisted by microdrilled optical fiber tapers", *Optics Letters*, 44, 11, 2669-2672, 2019.
- [8] Jaime Rafael EK-EK et al., "Fundamental mode intensity evolution in tapered optical fibres", *Laser Physics*, 30, 12, 126204, 2020.
- [9] Marko GALARZA et al., "Spatial-frequency multiplexing of high-sensitivity liquid level sensors based on multimode interference micro-fibers", *Sensors and Actuators A: Physical*, 307, 111985, 2020.
- [10] Abdulmoghni Ali Wazae AL-ALIMI et al., "Dual-wavelength thulium-doped fiber laser assisted by non-adiabatic tapered fiber", *Optics & Laser Technology*, 112, 26-29, 2019.

- [11] Emmanuel DESURVIRE et al., "Spectral gain hole-burning at 1.53 μm in erbium doped fiber amplifiers", IEEE Photonics Technology Letters, 2, 246-248, 1990.