

Diseño y caracterización de reflectores incoherentes de retrodispersión de fibra microperforada para láseres *random* de fibra óptica

Design and characterization of incoherent backscattering microdrilled fiber reflectors for random fiber optic lasers

Marko GALARZA ⁽¹⁾, Silvia SAÑUDO-LASAGABASTER ⁽¹⁾, Rosa Ana PEREZ-HERRERA ^(1,2), Pablo ROLDAN-VARONA ^(3,4,5), Luis RODRIGUEZ-COBO ⁽⁴⁾, José Miguel LOPEZ-HIGUERA ^(3,4,5), y Manuel LOPEZ-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: Marko Galarza (marko.galarza@unavarra.es).

RESUMEN:

Los láseres *random* de fibra óptica presentan una serie de características que los hacen idóneos para una gran variedad de aplicaciones industriales. La elevada longitud de fibra necesaria en la cavidad debido a sus bajos índices de dispersión Rayleigh, se reduce utilizando fibras de baja área efectiva (compensadoras de dispersión), o generando artificialmente elementos muy dispersivos. En este trabajo presentamos el diseño de reflectores aleatorios de tan solo varios milímetros, generados mediante microperforación del núcleo con un láser de femtosegundo y su utilización en la cavidad de una estructura láser.

Palabras clave: Láser de fibra, reflectores distribuidos, retrodispersión.

ABSTRACT:

Random fiber lasers show very interesting features for many industrial applications. The length of the fiber needed in the cavity reaches several tenths of kilometers due to the low Rayleigh dispersion coefficient. Using dispersion compensating fibers (fibers with small effective area) reduces this length, as well as using artificially generated dispersive elements. We present the design of random reflectors generated using a femtosecond laser to create the defects, which are only several millimeters long. The reflectors are used in a fiber laser structures and measured.

Key words: Random fiber laser, distributed reflectors, backscattering.

1.- Introducción

Una de las principales características de los láseres *random* de fibra óptica (LRF) es que no requieren de espejos definidos, sino que hacen uso de reflectores distribuidos, dependiendo su realimentación de la dispersión Rayleigh a

lo largo de toda la longitud de la fibra [1]. Ello les confiere propiedades muy interesantes como la supresión de los múltiples modos longitudinales dentro de una cavidad [2], una alta estabilidad en la potencia de salida [3], una alta eficiencia [4] y una relativa simplicidad

de fabricación [5]. Así, los LRF han demostrado su utilidad en numerosas aplicaciones en el campo de la ingeniería como la teledetección, las comunicaciones, la astronomía óptica o las imágenes biomédicas entre otras [1].

Aunque el comportamiento de un LRF depende de propiedades físicas y condiciones como la dispersión del medio [6], [7], el perfil de la distribución del bombeo utilizado para amplificar [8] y la geometría del núcleo de la fibra activa [9], la dispersión de Rayleigh es la que más influencia tiene. Es consecuencia de fluctuaciones de densidad aleatorias que provocan variaciones aleatorias del índice de refracción en el medio [10]. Esta dispersión ofrece un mecanismo de retroalimentación que genera un reflector distribuido en láseres random [11]. Debido a su bajo coeficiente de retrodispersión (alrededor de 10^{-7} m^{-1} [12]) la gran mayoría de las estructuras de LRF comprenden varias decenas de kilómetros de fibra estándar monomodo (SMF) como medio de ganancia [13]. Utilizando otro tipo de fibra, como las fibras compensadoras de la dispersión (DCF), con coeficientes de retrodispersión de Rayleigh hasta 7 veces superiores a los de las fibras monomodo estándar (SMF) y con una mayor ganancia Raman a igual bombeo, es posible reducir la longitud de fibra necesaria a unos pocos kilómetros [12].

Recientemente se ha demostrado que es posible aumentar la realimentación distribuida aleatoria de la fibra mediante microperforaciones en su núcleo [14]. Estas fibras perforadas, denominadas reflectores de fibra de retrodispersión controlada artificialmente (RFRCA), se fabrican mediante el uso de un láser de femtosegundos con un ancho de pulso ultracorto y una potencia instantánea muy alta. Además, es posible controlar la reflectividad, la posición longitudinal, y la distribución de estos puntos de dispersión.

En este trabajo, se presenta el diseño teórico de reflectores distribuidos RFRCA optimizados para su utilización en el desarrollo de LRFs. Se muestran asimismo resultados preliminares de su operación en láseres random.

2.- Sistema de microperforación

La fabricación de las microperforaciones se ha llevado a cabo mediante un láser de fibra comercial pulsado de femtosegundos; con una longitud de onda operativa de 1030 nm y una duración de pulso de 370 fs [15]. Los pulsos se enfocan con una lente de objetivo de Mitutoyo con una apertura numérica de 0.42 sobre el núcleo de la fibra para inducir variaciones del índice de unos 10^{-3} con unas dimensiones aproximadas de unos 3 μm de ancho y 1 μm de largo. La fibra se posiciona sobre un nanoposicionador XYZ de Aerotech para un desplazamiento longitudinal preciso.

El perforado de cada defecto se realiza con 4.5 μJ de energía y 100 Hz de relación de repetición (PRR). La evolución del periodo entre pulsos consecutivos del reflector gradual varía de $\Lambda_{min} = 2.1423 \mu\text{m}$ a $\Lambda_{max} = 2.1533 \mu\text{m}$ para generar el cuarto armónico en la banda C. Mediante la técnica de modelado del haz de hendidura, ha sido posible modificar el volumen focal para obtener mayor control sobre las dimensiones de cada defecto en el índice de refracción. La Fig. 1 muestra la imagen al microscopio de los defectos definidos a lo largo del núcleo de la fibra monomodo [16].

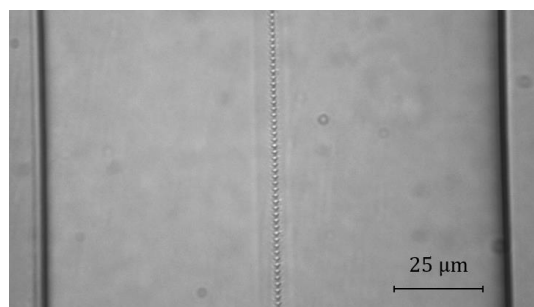


Fig. 1: Imagen microscópica del reflector de fibra con retrodispersión controlada artificialmente (RFRCA). Es posible diferenciar los defectos, el núcleo y la cubierta completa de la fibra.

3.- Diseño del reflector

Para el diseño del patrón aleatorio de los defectos en el núcleo se ha utilizado el software comercial Fimmwave de PhotonDesign [17], una calculadora vectorial de modos para estructuras tanto en 2D como 3D y que permite su propagación para el modelado de guías 2D+Z [16].

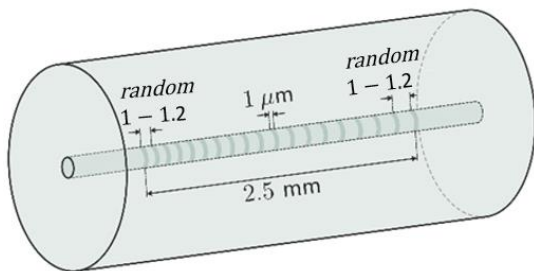


Fig. 2: Esquema de los defectos aleatorios definidos en el núcleo de la fibra para generar RFRCA aleatorios.

Los reflectores deben cumplir las siguientes especificaciones: 1) su anchura espectral debe ser lo suficientemente elevada como para proporcionar un comportamiento sin modos destacados, y 2) deben estar centrados alrededor de 1550 nm para solaparse con la zona de ganancia DCF. La secuencia de defectos que mejor ha cumplido estos objetivos ha sido la proporcionada por distancias aleatorias entre defectos en el rango de 1 a 1,2 μm, tal y como se muestra en el esquema de la Fig. 2. Debido a limitaciones técnicas las dimensiones de los defectos se han mantenido fijas y la longitud completa máxima del reflector es de 2,5 mm.

Para el diseño del patrón de aleatoriedad de las distancias se han utilizado distribuciones constantes (ruido blanco) y gaussianas. La Fig. 3(a) muestra el espectro de reflexión calculado para un reflector. No se han observado diferencias en función de la elección de la distribución de aleatoriedad. Con el objeto de utilizar como reflector de control, tanto para comparar con su nivel de reflexión, como para con su desempeño en la estructura de LRFs, se han diseñado y fabricado reflectores graduales (chirped) cuyo espectro también se muestra en la Fig. 3(b). Con respecto al nivel de reflexión, los valores alcanzados no son elevados, del orden de 10^{-5} , debido a la limitación en la fabricación, de la variación del índice y la longitud máxima del reflector. Sin embargo, el reflector aleatorio mantiene los niveles que proporciona el gradual.

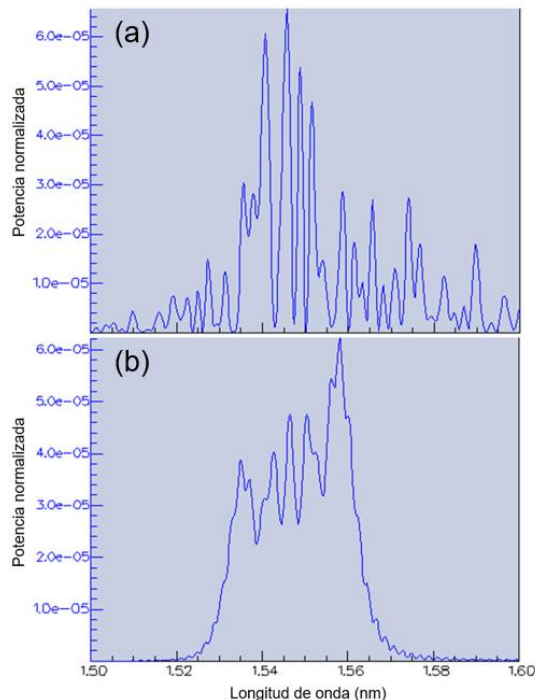


Fig. 3: Espectro en reflexión de (a) la estructura aleatoria y (b) el reflector gradual (chirp) de control.

4.- Resultados

Ambos reflectores, el aleatorio y el gradual de control, se configuraron en la estructura mostrada en la Fig. 4 con el objetivo de obtener emisión random. El multiplexor en longitud de onda (WDM) inyecta la potencia de bombeo en el LRF y proporciona el acceso al reflector de la luz propagada en la dirección opuesta. El acoplador 90:10 proporciona los puntos de salida y medida de la potencia óptica. La cavidad incluye varios metros de fibra altamente dopada con erbio para conseguir la ganancia necesaria.

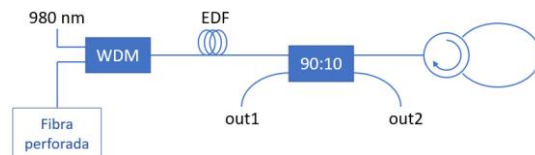


Fig. 4: Estructura del láser con la fibra microperforada en un extremo de su cavidad.

La Fig. 5 muestra los espectros de emisión proporcionados para los dos reflectores RFRCA. En el caso del reflector aleatorio, se consigue emisión láser alcanzando 50 dB de OSNR, pero el espectro no es lo suficientemente ancho (menor de 1 nm) ni estable para

considerarlo random, principal objetivo. El reflector de control gradual, sin embargo, sí alcanza emisión random. El espectro mostrado en este caso corresponde a la estructura desarrollada y presentada por los autores en [16]. Ello hace suponer que aumentando la reflectividad del RFRCA aleatorio, ya sea incrementando su longitud total (utilizando varios en serie, por ejemplo), o incluso incluyendo tapers [14], sería posible llegar al objetivo. Actualmente, los autores continúan ambas líneas de trabajo.

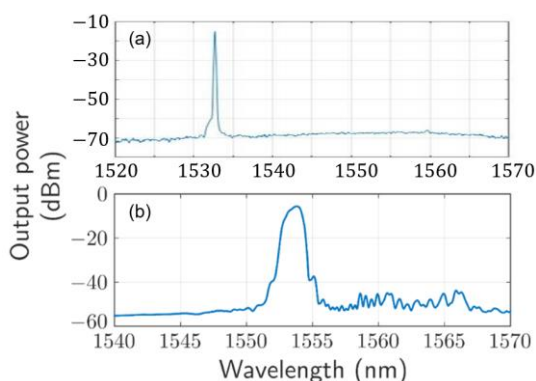


Fig. 5: Espectros de emisión obtenidos para (a) el reflector aleatorio y (b) el reflector gradual o chirped.

4.- Conclusión

La alteración artificial de la dispersión responsable de la emisión aleatoria en láseres random ofrece la posibilidad de reducir las distancias necesarias de las cavidades de estos dispositivos. El patrón aleatorio de defectos generados mediante microperforaciones con un láser de femtosegundo muestra resultados preliminares prometedores. Se ha obtenido una buena calidad de emisión láser, con un OSNR que supera los 50 dB, y llegando a obtener emisión random con el reflector de control. Ampliar la eficiencia de reflexión situando en serie más componentes como el propuesto o incluso utilizando fibras estrechadas (tapers) para redirigir mejor la reflexión de los defectos permitirían alcanzar la respuesta con componente de control.

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] H. CHEN, et al. "Advances in Random Fiber Lasers and Their Sensing Application", *Sensors*, vol. 20, no. 21, pp. 1–20, 2020.
- [2] Z.N. WANG, et al. "Long-distance fiber-optic point-sensing systems based on random fiber lasers", *Optics Express*, vol. 20, no. 16, pp. 17695–17700, 2012.
- [3] S. TURITSYN, et al. "Random distributed feedback fibre laser", *Nature Photonics*, vol. 4, no. 4, pp. 231–235, 2010.
- [4] H. WU, et al. "1.5 μm Low Threshold, High Efficiency Random Fiber Laser with Hybrid Erbium–Raman Gain", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 36, no. 4, pp. 844–849, 2018.
- [5] D.V. CHURKIN, et al. "Recent advances in fundamentals and applications of random fiber lasers", *Advances in Optics and Photonics*, vol. 7, no. 3, pp. 516–569, 2015.
- [6] R. UPPU, et al. "Identification of statistical regimes and crossovers in coherent random laser emission" *Optics Letters*, vol. 37, no. 4, pp. 662–664, 2012.
- [7] R. EL-DARDIRY, et al. "Experimental phase diagram for random laser spectra", *New Journal of Physics*, vol. 14, 113031, 2012.
- [8] M. LEONETTI, et al. "Active subnanometer spectral control of a random laser", *Applied Physics Letters*, vol. 102, no. 7, 071105, 2013.
- [9] F. TOMMASI, et al. "Controlling directionality and the statistical regime of the random laser emission", *Physical Review A - Atomic, Molecular, and Optical Physics*, vol. 91, no. 3, 033820, 2015.
- [10] A. SALEH, et al. "Stable Multiwavelength Erbium-Doped Random Fiber Laser. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 24, no. 3, 0902106, 2018.
- [11] E. IGNESTI, et al. "A new class of optical sensors: a random laser-based device", *Scientific Reports*, vol. 6, 35225, 2016.
- [12] L. GRÜNER-NIELSEN, et al. "Dispersion-Compensating Fibers", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 23, no. 11, pp. 3566–3579, 2005.
- [13] I. APORTA, et al. "Tunable dual-wavelength Random Distributed Feedback Fiber

- Laser with bidirectional pumping source”,
Journal of Lightwave Technology, vol. 34,
no. 17, pp. 4147–4152, 2016.
- [14] R. A. Perez-Herrera, et al. “Optical fiber lasers assisted by microdrilled optical fiber tapers,” Opt. Lett. 44, 2669-2672, 2019.
- [15] P. Roldán-Varona, et al. “Slit Beam Shaping Technique for Femtosecond Laser Inscription of Enhanced Plane-by-Plane FBGs,” Journal of Lightwave Technology 38, 16, 4526-4532, 2020.
- [16] Perez-Herrera, et al. “Hybrid Raman-erbium random fiber laser with a half open cavity assisted by artificially controlled backscattering fiber reflectors,” Sci Rep 11, 9169, (2021).
- [17] Fimmwave de Photon Design, <https://www.photond.com/products/fimmwave.htm>.