

# Láser *random* de fibra óptica asistido por reflectores de fibra con retrodispersión controlada artificialmente

## Optical fiber random laser assisted by artificially controlled backscattering fiber reflectors

Rosa Ana PEREZ-HERRERA<sup>(1,2)</sup>, Pablo ROLDAN-VARONA<sup>(3,4,5)</sup>, Marko GALARZA<sup>(1)</sup>,  
Silvia SAÑUDO-LASAGABASTER<sup>(1)</sup>, Luis RODRIGUEZ-COBO<sup>(4)</sup>, José Miguel  
LOPEZ-HIGUERA<sup>(3,4,5)</sup>, y Manuel LOPEZ-AMO<sup>(1,2)</sup>

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: Rosa Ana Pérez-Herrera ([rosa.perez@unavarra.es](mailto:rosa.perez@unavarra.es)).

### RESUMEN:

Este trabajo presenta un láser de fibra tipo random (LFR) en cavidad semi-abierta, mediante amplificación híbrida Raman-Erbio y asistida por reflectores de fibra con retrodispersión controlada artificialmente (RFRCA). Como medio activo se ha empleado una combinación de 2,4 km de fibra compensadora de dispersión con dos tramos de fibra altamente dopada con erbio de 5 m cada uno. Se ha obtenido una única línea de emisión láser centrada a en 1553.8 nm y con una relación señal a ruido óptica de 47 dB cuando en la estructura se inyectaba una potencia de bombeo de 37.5 dBm. Además, se ha medido la estabilidad en términos de potencia de salida de este láser durante 3 horas, obteniendo una inestabilidad tan baja como 0,08 dB con un nivel de confianza del 100%.

**Palabras clave:** Láser de fibra random, estabilidad de potencia de salida, amplificación Raman, fibra dopada con erbio, reflectores distribuidos, retrodispersión.

### ABSTRACT:

This work shows a semi-open cavity random type fiber laser (RFL), using hybrid Raman-Erbium amplification and assisted by artificially controlled backscattering fiber reflectors (RFRCA). As active medium, a combination of 2.4 km of dispersion compensating fiber with two sections of highly erbium doped fiber of 5 m each has been used. A single random laser emission line centered at 1553.8 nm and with a signal-to-optical noise ratio of 47 dB was obtained when a pump power of 37.5 dBm was injected into the structure. In addition, the stability in terms of output power of this laser has been measured along 3 hours, obtaining an instability as low as 0.08 dB with a 100% confidence level.

**Key words:** Random fiber laser, output power stability, Raman amplification, erbium doped fiber, distributed reflectors, backscattering.

## 1.- Introducción

En los últimos años, los láseres de fibra random (LFR) 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]. Una de sus principales características es que no tienen espejos bien definidos, sino reflectores distribuidos por lo que su retroalimentación depende de la dispersión a lo largo de la fibra [2]. Estos reflectores distribuidos de fibra óptica que utilizan retrodispersión de Rayleigh ofrecen propiedades de gran interés para el campo de los láseres como la supresión de los múltiples modos longitudinales dentro de una cavidad [3]. Este tipo de láseres random presenta también una alta estabilidad en la potencia de salida [1], una alta eficiencia [4] y una relativa simplicidad de fabricación [5].

Dependen también en gran medida de las propiedades de dispersión del medio [6], [7], el perfil de bombeo [8] y la geometría de la zona activa [9]. La dispersión de Rayleigh (DR) de la luz es una 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]. La mayoría de las configuraciones presentadas inicialmente para láseres de fibra random necesitaban varias decenas de kilómetros de fibra estándar monomodo (SMF) como medio de ganancia [12] debido a su bajo coeficiente de retrodispersión Rayleigh, alrededor de  $10^{-7} \text{ m}^{-1}$  [13]. Sin embargo, al utilizar otro tipo de fibras, 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 que generan además una mayor ganancia Raman a igual bombeo; la longitud de la cavidad se puede reducir a pocos kilómetros [13].

La ganancia híbrida Erblio-Raman también se ha utilizado anteriormente para aumentar y mejorar la débil retroalimentación de la DR y, por lo tanto, generar LFR de longitud de onda única o múltiple [10], [14], [15]. La retroalimentación aleatoria de la DR también se

puede mejorar micro perforando la fibra óptica, generando así reflectores distribuidos o cuasi distribuidos. Estas fibras perforadas, denominadas reflectores de fibra de retrodispersión controlados 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 un láser híbrido Raman-Erblio de fibra aleatoria con una cavidad semi-abierta, basado en RFRCA. Se ha estudiado la relación entre la potencia de bombeo y la inestabilidad en potencia de salida del láser generado, comparando estos valores con los obtenidos mediante el uso de redes de difracción de Bragg (FBGs).

## 2.- Simulación y proceso de inscripción

Los reflectores basados en RFRCA se han fabricado utilizando un láser de fibra comercial pulsado femtosegundos (FLCPA) con una longitud de onda operativa de 1030 nm y una duración de pulso de 370 fs. El patrón de los defectos necesarios a lo largo de la fibra se diseñó utilizando el software Fimmwave de Photon Design [16], un software capaz de modelar la propagación en estructuras 2D y 3D.

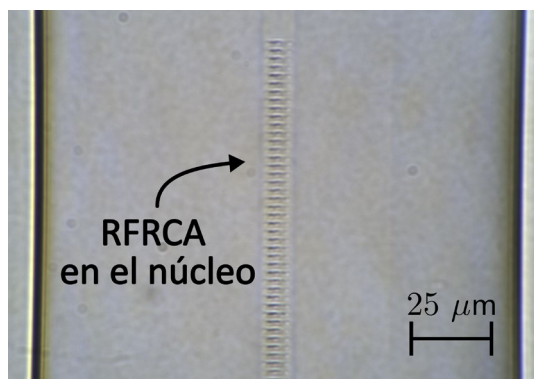


Fig. 1: Imagen microscópica del reflector de fibra con retrodispersión controlada artificialmente (RFRCA).

Los reflectores debían cumplir dos especificaciones: 1) favorecer la supresión de los modos longitudinales del láser, y 2) estar centrados alrededor de 1550 nm coincidiendo con la zona de ganancia. Una secuencia de defectos en la fibra de 3  $\mu\text{m}$  de ancho y 1  $\mu\text{m}$  de largo separados por una distancia creciente de 1,08

$\mu\text{m}$  a  $1,13 \mu\text{m}$  fue la que mejor se ajustó a estos requisitos. Debido a limitaciones técnicas, los RFRCA se fabricaron con una longitud de  $2,5\text{mm}$ .

La Figura 1 presenta una imagen de microscopio de uno de los RFRCA fabricadas. Las Figuras 2 y 3 muestran el espectro óptico simulado y fabricado del RFRCA, respectivamente. La Figura 3 se obtuvo con un analizador de espectro óptico (OSA), con el que se midió un valor de reflexión de potencia máxima de  $-1,37 \text{ dB}$ , centrado alrededor de los  $1548,4 \text{ nm}$  y con una anchura a mitad del máximo (FWHM) de  $7,45 \text{ nm}$ .

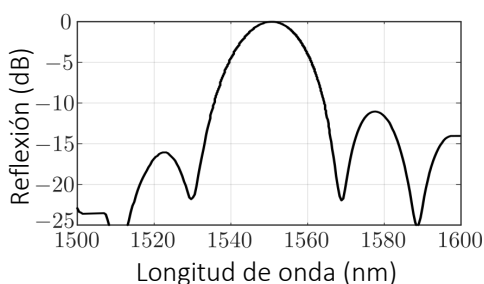


Fig. 2: Espectro óptico del RFRCA simulado.

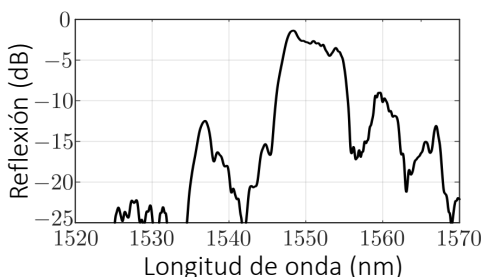


Fig. 3: Espectro óptico del RFRCA fabricado.

### 3.- Montaje experimental

La figura 4 muestra el diagrama esquemático de la configuración experimental del LFR de cavidad lineal semi-abierta asistido por dos RFRCA.

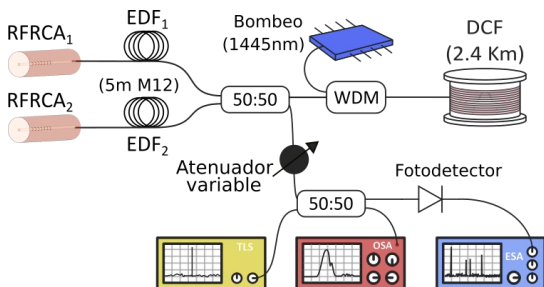


Fig. 4: Configuración experimental del LFR de cavidad semi-abierta basado en dos RFRCA.

En esta estructura se inyecta una potencia de bombeo Raman, centrada en  $1445 \text{ nm}$ , en el LFR mediante un multiplexor por división de longitud de onda (WDM) de  $1445/1550 \text{ nm}$ . En uno de sus extremos se ubica un carrete de fibra DCF de  $2,4 \text{ km}$  de longitud, que actúa como un reflector distribuido y además amplifica la luz retrodispersada aleatoriamente. Como se mencionó anteriormente, la fibra DCF proporciona amplificación y retroalimentación de la dispersión Rayleigh adicional para el LFR [2], induciendo una reducción significativa de la longitud típica del medio de ganancia [17]. En el extremo opuesto del LFR, la señal óptica reflejada por la DCF se divide en dos ramas mediante un acoplador óptico de  $3 \text{ dB}$ , utilizando un único medio de ganancia por cada una [18]. Cada una de estas ramas incluye  $5 \text{ metros}$  de fibra altamente dopada con erbio (EDF) seguida de una RFRCA que se utiliza como espejo. El tipo de fibra altamente dopada con erbio utilizada fue el M12 (980/125) de Fibercore Inc.

Las señales reflejadas de estas dos ramas pasan a través de un atenuador óptico variable (VOA) para minimizar el riesgo de daño de los dispositivos de medida, debido a los altos niveles de potencia. Se realizaron medidas simultáneas en el dominio óptico y eléctrico dividiendo esta señal con otro acoplador óptico de  $3 \text{ dB}$ . Una rama de salida se conectó a un OSA con una resolución de  $0,1 \text{ nm}$  y una sensibilidad de  $-75 \text{ dB}$ . Además, y para verificar experimentalmente el comportamiento sin modos longitudinales del LFR, la otra rama de salida se conectó a un fotodetector en combinación con un analizador de espectros eléctricos (ESA) para realizar medidas en el dominio de la frecuencia eléctrica.

La salida del LFR, reflejada por los RFRCA, se mezcló con la señal de una fuente láser sintonizable (TLS, Agilent 8164B), a través de un acoplador de  $3 \text{ dB}$  para realizar una detección heterodina.

Los extremos libres tanto de las RFRCA como de la fibra DCF se sumergieron en gel adaptador de índice de refracción para evitar reflexiones no deseadas. Todas las medidas experimentales se realizaron a temperatura

ambiente y no se emplearon técnicas de aislamiento de vibraciones o de compensación de temperatura.

#### 4.- Resultados

Para evaluar los espectros de salida de este láser se utilizó una potencia de bombeo entre 32,5 dBm y 37,5 dBm. Las figuras 5 (a) y (b) muestran los espectros óptico y eléctrico medidos, respectivamente, cuando la potencia de bombeo es de 32,5 dBm. Ambos espectros ilustran cómo no se obtuvo un comportamiento sin modos longitudinales para este nivel bajo de potencia de bombeo. Por otro lado, cuando esta potencia de bombeo aumenta hasta 37,5 dBm, el comportamiento sin modos típico de un láser random se ratifica experimentalmente como ilustran las Figuras 6 (a) y (b).

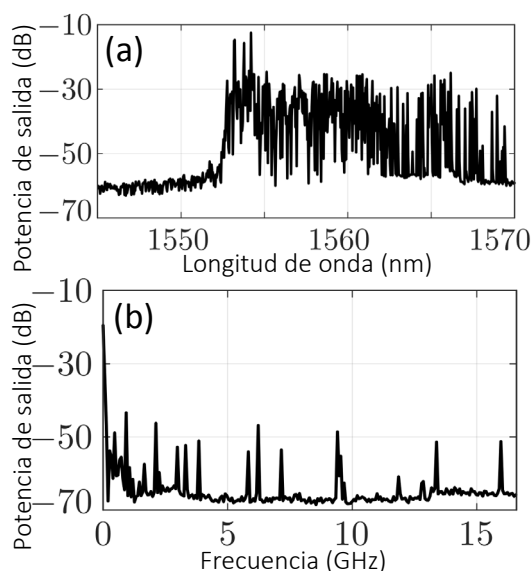


Fig. 5: (a) Espectro de salida del LFR medido en el dominio óptico (a) y eléctrico (b) ambos con una potencia de bombeo de 32,5 dBm.

En todos los casos, la luz retrodispersada forma una multitud de modos resonantes con frecuencias aleatorias [12]. Sin embargo, la reflexión de los RFRCA es dominante en la cavidad semi-abierta y solo los modos resonantes de estos reflectores alcanzan su umbral (cuando la combinación de la ganancia de EDFA y Raman supera las pérdidas de la cavidad).

La forma del espectro que se presenta en la Figura 5 (a) muestra un gran número de líneas

de emisión a diferentes longitudes de onda desde 1552 nm hasta 1570 nm con niveles de potencia de salida de alrededor de los -30 dBm. Sin embargo, y como muestra la Figura 6 (a), cuando la potencia de bombeo aumenta hasta 37,5 dBm, aparece una única línea de emisión de láser, debido a plena generación de una cavidad de reflexión aleatoria, centrada en 1553,8 nm. El nivel de potencia de salida obtenido de este láser random es de -6,5 dBm, con un FWHM de 1 nm y una relación señal óptica a ruido (OSNR) de 47 dB.

Las Figuras 5 (b) y 6 (b) ilustran los espectros correspondientes al dominio de la frecuencia, al utilizar un fotodetector en combinación con un ESA para realizar dichas medidas. Como muestra la Figura 6 (b), cuando la estructura se bombea con 37.5 dB, no hay indicio de batidos de modos longitudinales. No obstante, la Figura 5 (b) mostraba, para 32,5 dBm, la aparición de numerosos batidos, que además varían en función del nivel de potencia de bombeo. Estos resultados apoyan la teoría de la ausencia de modos longitudinales en los láseres de fibra random presentados en [19].

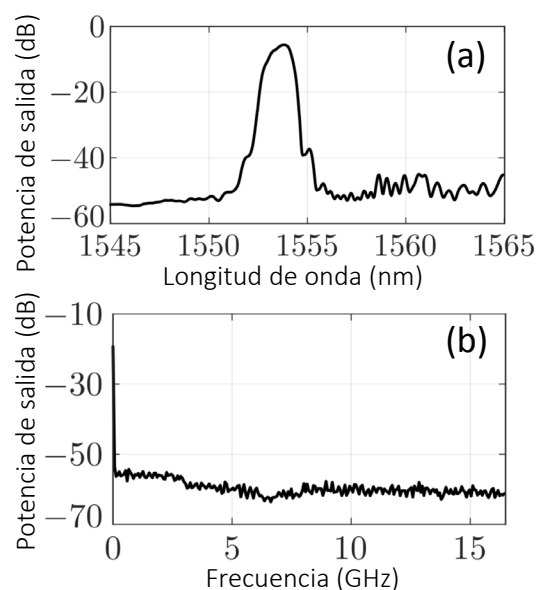


Fig. 6: (a) Espectro de salida del LFR medido en el dominio óptico (a) y eléctrico (b) ambos con una potencia de bombeo de 37,5 dBm.

El nivel de potencia de salida y la estabilidad de la longitud de onda de emisión de un láser de fibra son parámetros clave que deben evaluarse, ya que estas variaciones tienen una gran influencia, por ejemplo, en la precisión

de los sistemas de sensores láser. Una alta estabilidad en términos de potencia/intensidad garantiza una alta resolución en este tipo de sensores [20]. La Figura 7 muestra la inestabilidad de la potencia de salida del LFR semiabierto en función de la potencia de bombeo inyectada en el sistema. Para su realización, los datos medidos se almacenaron cada 10 segundos durante una hora considerando para todos los casos un nivel de confianza (CL) del 100%. Se observa que, para el mejor de los casos, el nivel de potencia máxima promediada y medida a temperatura ambiente; presenta una variación tan baja como 0,08 dB cuando se inyectaba un nivel de potencia de bombeo de 37,5 dBm. Estos resultados presentan una mejora notable en comparación con trabajos recientes [21]. Como muestra la Figura 7, los resultados experimentales presentan una relación exponencial entre la potencia de bombeo y la inestabilidad de la potencia de salida, con un error de  $R^2=0,9967$ . Por lo tanto, podemos afirmar que a medida que se aumenta la potencia de bombeo, la estabilidad de la potencia de salida aumenta considerablemente.

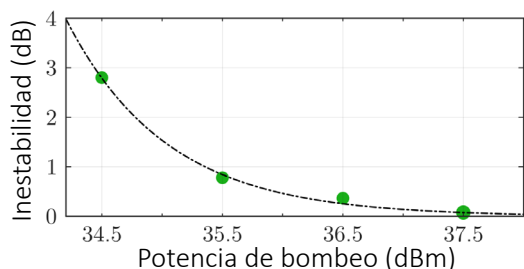


Fig. 7: Inestabilidad de la potencia de salida en función de la potencia de bombeo Raman. Medida realizada durante 1 hora para cada nivel de bombeo y con un nivel de confianza del 100%.

Para cuantificar la mejora introducida al usar RFRACAs en lugar de redes de difracción Bragg, estas medidas se repitieron utilizando dos FBGs centradas en 1551 nm como reflectores. En este nuevo caso de estudio, el nivel de potencia de salida presentó una variación de 0,53 dB a temperatura ambiente, frente a los solo 0,08 dB medidos cuando se utilizaron RFRACAs. Por lo tanto, el uso de RFRACAs implica un aumento notable de la estabilidad del nivel de potencia de salida obtenido bajo idénticas circunstancias con FBGs, concretamente la estabilidad presenta un valor 6 veces mayor.

## 5.- Conclusiones

En este trabajo se ha presentado un nuevo láser de fibra random en cavidad semi-abierta, mediante amplificación híbrida con Raman-Erbio y asistida por reflectores de fibra con retrodispersión controlada artificialmente. Como medio de ganancia se utilizó una combinación de fibra compensadora de dispersión de 2,4 km de longitud con dos segmentos de fibra altamente dopada con erbio de 5 metros cada uno. Mediante el uso de estos RFRACAs, se ha medido una única línea de emisión de láser random centrada en 1553,8 nm y una relación señal óptica a ruido de 47 dB cuando se inyectaba una potencia de bombeo de 37,5 dBm. Se ha medido una inestabilidad de potencia de salida tan baja como 0,08 dB, con un nivel de confianza del 100%, lo que presenta una gran mejora en comparación al uso de redes tradicionales como los FBGs.

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] S. TURITSYN, et al. "Random distributed feedback fibre laser", *Nature Photonics*, vol. 4, no. 4, pp. 231–235, 2010.
- [2] H. CHEN, et al. "Advances in Random Fiber Lasers and Their Sensing Application", *Sensors*, vol. 20, no. 21, pp. 1–20, 2020.
- [3] 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.
- [4] H. WU, et al. "1.5  $\mu\text{m}$  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] 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.
- [13] L. GRÜNER-NIELSEN, et al. “Dispersion-Compensating Fibers”, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 23, no. 11, pp. 3566–3579, 2005.
- [14] L. WANG, et al. “Erbium-doped fiber laser with distributed Rayleigh output mirror”, *Laser Physics*, vol. 24, no. 11, 115101, 2014.
- [15] V. DE MIGUEL-SOTO, et al. “Fully switchable multiwavelength fiber laser assisted by a random mirror”, *Optics Letters*, vol. 39, no. 7, pp. 2020–2023, 2014.
- [16] <https://www.photond.com/products/fimmwave.htm>
- [17] N.H. ZAINOL ABIDIN, et al. “Open Cavity Controllable Dual-Wavelength Hybrid Raman-Erbium Random Fiber Laser”, *IEEE Photonics Journal*, vol. 11, no.4, 1503208, 2019.
- [18] A. BELLEMARE, “Continuous-wave silica-based erbium-doped fibre lasers”, *Progress in Quantum Electronics*, vol. 27, no. 4, pp. 211–266, 2003.
- [19] S.K. TURITSYN, et al. “Random distributed feedback fibre lasers”, *Physics Reports*, vol. 542, no. 2, pp. 133–193, 2014.
- [20] R.A. PEREZ-HERRERA, et al. “High sensitive micro-displacement intensity fiber sensor by using a multiwavelength erbium doped fiber ring laser based on optical add-drop multiplexers”, en *Proceedings de SPIE - The International Society for Optical Engineering (23rd International Conference on Optical Fibre Sensors - OFS23)* 9157, 915762, 2014.
- [21] J. YANG, et al. “Tunable random fiber laser with half-open-cavity configuration”, *Optik*, vol. 194, 163098, 2019.