

APLICACIÓN DE LÁSERES DE PULSOS ULTRACORTOS

LAURA MONROY¹, ÓSCAR ESTEBAN¹, EVA MONROY², MIGUEL GONZÁLEZ-HERRÁEZ¹,
FERNANDO B. NARANJO¹
laura.monroy@uah.es



Laura Monroy es investigadora predoctoral del Dpto. de Electrónica de la Universidad de Alcalá. Es miembro del grupo de investigación GRIFO, centrado en el estudio de la fotónica y de sus aplicaciones. Sus principales líneas de investigación son los láseres ultrarrápidos y los absorbentes saturables.

Resumen: En este trabajo se presenta un láser pasivo anclado en modos (*mode-locked*) basado en Nitruro de Indio (InN) como absorbente saturable (SA) a una longitud de onda de 1.55 μm . Utilizando una lente GRIN como acoplamiento en fibra, se obtiene un sistema compacto sin necesidad de alineamiento externo, así como la obtención de pulsos láser altamente estables en el rango de los femtosegundos.

Palabras clave: Láseres ultracortos, absorbentes saturables.

Abstract: We present an ultra-simple all-fiber passively mode-locked laser system based on indium-nitride saturable absorbers operating at telecom wavelengths. Our results demonstrate that a coupling element based on a GRIN-rod lens together with a SESAM-based single-mode fiber oscillator not only ensures a compact, turn-key and alignment-free design, but also a highly-stable femtosecond optical pulse train.

Keywords: Ultrashort lasers, saturable absorbers.

¹ GRIFO, Dpto. de Electrónica. Universidad de Alcalá.

² IRIG-PHELIQS (INAC). Universidad Grenoble-Alpes.

1. INTRODUCCIÓN

La demanda de fuentes láser generadoras de pulsos ultrarrápidos ha experimentado un auge debido a su utilización en la industria, la medicina o en el ámbito militar, con aplicaciones como el procesamiento de materiales, la cirugía o las telecomunicaciones, entre otros (Sugioka & Cheng, 2014; Taccheo, 2017; Knox, 2000). En la última década, la tecnología de los láseres ultrarrápidos en fibra óptica ha sido estudiada extensivamente debido a sus propiedades intrínsecas, i.e. sistemas sencillos y robustos de fácil manejo sin necesidad de alineamiento externo. La flexibilidad y estabilidad de dichas fuentes láser permite obtener pulsos de alta potencia en el rango de los picosegundos y femtosegundos (Zervas & Codemard, 2014). Este desarrollo industrial se ha acelerado por el uso de las técnicas de *mode-locked*, tales como los láseres activos (basados en el empleo de moduladores electro-ópticos) (Phillips et al., 1990; Hudson et al., 2005), o los pasivos (basados en el uso de absorbentes saturables) (Garmire & Yariv, 1967; Keller, 2003). En comparación, los sistemas de láseres pasivos en fibra tienen la ventaja de ser sencillos y compactos, pudiendo obtenerse pulsos con una menor duración temporal. El método pasivo se basa en el uso de elementos ópticos no lineales que transforman la onda continua (CW) en un tren de pulsos ultracortos. Para poder obtener este esquema en un sistema láser, se pueden emplear distintas técnicas, como son la rotación no lineal de la polarización, espejos no lineales o absorbentes saturables (SA) (Liua et al., 2008; Avdokhin, Popov & Taylor, 2003). Entre ellos destacan los absorbentes saturables ya que constituyen el componente óptico fundamental para la generación de pulsos ultrarrápidos debido a sus propiedades únicas como la eficiencia, la estabilidad y *self-starting*. Por tanto, la energía y estabilidad de estos pulsos estrechos en los láseres en fibra están limitados no solo por la dispersión neta del sistema (el exceso de las no linealidades puede generar la ruptura del pulso) sino también por los parámetros del absorbente saturable, tales como la profundidad de modulación, el tiempo de recuperación, etc.

Entre los absorbentes saturables, los absorbentes de semiconductor (SESAM) representan la tecnología predominante de los láseres pasivos *mode-locked* (Keller, Weingarten, & Kartner, 1996). Dependiendo de la composición química, los SESAM actualmente pueden cubrir la mayor parte del espectro electromagnético exhibiendo grandes efectos no lineales, por lo que pueden ser utilizados en una amplia variedad de aplicaciones que requieren medidas de alta precisión y resolución temporal. Sin embargo, los SESAMs también requieren fabricaciones complejas y sofisticadas, así como estrechas bandas de operación (limitado a unos pocos nanómetros), un nivel de saturación bajo y tiempos de recuperación largos (del orden de los picosegundos o nanosegundos). Por tanto, la búsqueda de un absorbente saturable ideal con propiedades únicas es la principal meta en este sector.

Una alternativa simple y barata se encuentra en los SESAM basados en nitruro de indio (InN), los cuales han demostrado una alta estabilidad térmica y química (altos niveles de tolerancia energética) e insensibilidad a la polarización, así como un alto

comportamiento no lineal (Jiménez-Rodríguez, Monroy, González-Herráez, & Naranjo, 2018; Monroy et al., 2019). La longitud de onda de operación puede ser extendida desde la región del infrarrojo al ultravioleta dependiendo de su estructura (substratos de GaN o AlN) (Wu et al., 2002). Estas características hacen del absorbente saturable de InN un candidato apropiado para su empleo en aplicaciones comerciales. Recientemente, se ha demostrado que el absorbente saturable de InN, operando a una longitud de onda de 1560 nm (banda de energía de 0.67 eV), pudiendo alcanzar altas profundidades de modulación. Posteriormente, se desarrolló un láser pasivo todo en fibra (*all-fiber*) utilizando para ello este SESAM de InN, el cual ha permitido obtener pulsos ultracortos (<200 fs) a una longitud de onda de 1560 nm (Monroy et al., 2020).

En este trabajo se presenta un nuevo sistema sencillo, sin necesidad de alineamientos externos y fabricado todo en fibra mediante el acoplo de una lente GRIN a un absorbente saturable de InN con el objetivo de generar pulsos con una menor duración temporal en el rango de las telecomunicaciones. Los pulsos resultantes demuestran una estabilidad mayor a la alcanzada en trabajos anteriores con potencias superiores y con duraciones temporales menores. Estos resultados sugieren que el InN es un candidato perfecto para su empleo en aplicaciones basadas en efectos ópticos no lineales, la electro-óptica o la nanofotónica.

2. METODOLOGÍA

Para el desarrollo de sistemas láser *all-fiber* se puede distinguir tres métodos diferentes, en donde los absorbentes saturables son transferidos o depositados en dichas fibras ópticas. En general, los absorbentes saturables utilizados en láseres de estado sólido se depositan mediante un baño giratorio (*spin-coating*) sobre láminas transparentes, o sobre espejos altamente reflectantes (Yamashita et al., 2004), y, por tanto, como parte de sistemas láser con una configuración en aire. Sin embargo, para este tipo de sistemas es necesario un acoplamiento más complejo, añadiendo componentes ópticos externos como lentes o filtros, los cuales pueden introducir pérdidas (aberraciones, suciedad, etc.). Una posible alternativa consiste en insertar el absorbente saturable entre las terminaciones de la fibra óptica. Para ello, el nanomaterial es integrado en la cara de la fibra óptica mediante el depósito de adhesivo, ya sea alcohol de polivinilo o metacrilato de polimetilo. Aunque este método pueda resultar simple y fácil de aplicar a sistemas comerciales, también demuestra algunas desventajas, como un bajo nivel de daño crítico y una baja estabilidad, lo cual restringe su uso en láseres ultrarrápidos de alta potencia. Por tanto, con el objetivo de resolver estos problemas, se propuso un acoplamiento basado en el campo evanescente. En este sentido, la luz láser sale del núcleo de la fibra óptica para interactuar con el absorbente saturable, el cual ha sido depositado previamente en las bandas laterales de la fibra. De esta manera, dependiendo de la estructura de la fibra óptica se puede distinguir entre las fibras estiradas, fibras pulidas por los lados, o fibras sin *cladding* (parte externa de la fibra óptica) (Martínez

et al., 2017; Ko et al., 2016). Sin embargo, este tipo de acoplamientos son sensibles a la polarización, desarrollando efectos de rotación no lineal de la polarización, y generando pérdidas de potencia en el pulso láser. Por tanto, resulta necesario desarrollar nuevos sistemas de acoplamiento para su empleo en láseres ultrarrápidos en fibra de alta potencia. En este trabajo se propone un nuevo sistema de acoplamiento basado en la conexión directa de la fibra óptica con el absorbente saturable. Para ello el material de InN es depositado sobre la terminación de la fibra óptica mediante un adhesivo y curado en el UV. Además, para incrementar la respuesta no lineal del absorbente saturable, se ha incorporado una lente GRIN entre la fibra óptica y el material como puede observarse en la Figura 1. Por tanto, ambos elementos ópticos son pegados directamente sobre las caras de la lente mediante un adhesivo transparente. Como consecuencia, el montaje no contiene partes en aire, reduciendo no solo las pérdidas por reflexión en las intercaras, sino también las posibles aberraciones generadas por las lentes, las cuales producen un aumento de las pérdidas en el interior de la cavidad láser, obteniendo así pulsos más estrechos a la salida del sistema. Por tanto, se ha desarrollado un sistema láser *all-fiber* ultra sencillo y eficiente en el rango de las telecomunicaciones.

3. RESULTADOS

El montaje experimental del sistema láser consiste en una cavidad en anillo con el absorbente saturable en configuración de reflexión (Figura 2).

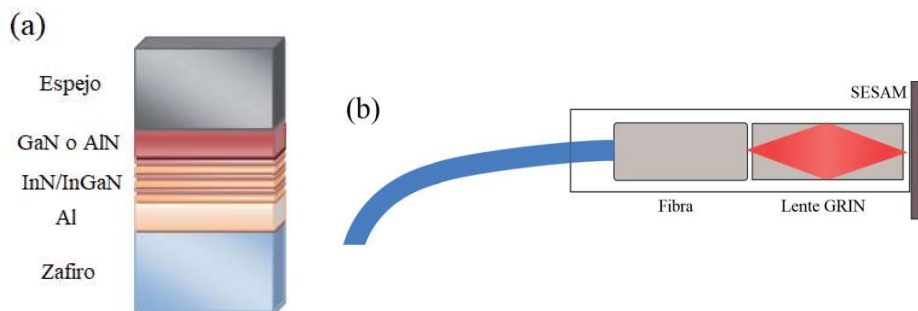


Figura 1. (a) Estructura del absorbente saturable (SESAM) de InN, (b) Sistema de acoplamiento láser basado en el depósito del absorbente saturable de InN sobre una terminación en fibra junto con la lente GRIN.

El SESAM consiste en una capa de InN depositada sobre un sustrato de GaN-sobre-zafiro mediante la técnica de epitaxia de haces moleculares. La temperatura de crecimiento es de 450°C con una tasa de crecimiento de 290 nm/h. El flujo de InN se ajusta a 1.2 en intervalos de crecimiento de 10 min, con el fin de evitar la acumulación

de gotas de InN en la superficie de la muestra. Más detalles sobre la caracterización óptica de estos materiales pueden encontrarse en la referencia (Monroy et al., 2020). Para fabricar el espejo del SESAM, se ha depositado una capa de aluminio de 300 nm de grosor sobre el InN mediante *sputtering* de radio-frecuencia a temperatura ambiente.

El sistema entero utiliza fibras monomodo (SMF), que aseguran la estabilidad del láser y su inmunidad a vibraciones externas. La cavidad láser está compuesta por un amplificador en fibra de erbio-dopado (EDFA, Accelink TV-series), como el medio de ganancia con 16 m de fibra monomodo de erbio-dopado (EDF). El EDF presenta una ganancia de 24 dBm con una dispersión (GVD) de $+16 \text{ ps}^2/\text{km}$ a 1550 nm. Además de la fibra EDF y del SESAM, el oscilador está constituido por fibra SMF y dos componentes ópticos, un atenuador variable (VOA) y un acoplador (OC) con una ratio de 70/30, donde la salida del láser corresponde con el 30% de la señal. La longitud de la fibra SMF es de 22m, con un GVD de $-21 \text{ ps}^2/\text{km}$ a 1550 nm. Por tanto, el valor neto de la dispersión la fibra EDF y SMF es de 0.256 ps^2 y -0.462 ps^2 respectivamente, dando lugar a una dispersión total de -0.21 ps^2 en la cavidad láser, operando por tanto en el régimen de dispersión anómala (Turitsyn, Bale & Fedoruk, 2012). Debido a la estructura wurtzita del InN y por tanto su independencia con la polarización al ser iluminado en la dirección paralela al eje z (Monroy et al., 2019), no se han introducido controladores de polarización externos en el oscilador. Por tanto, se ha desarrollado un sistema láser totalmente en fibra con un montaje estable y compacto sin espacios abiertos en aire.

Las características del láser a la salida de la cavidad han sido medidas mediante el siguiente equipamiento: un analizador óptico de espectros (OSA, Yokogawa AQ-6215B), un osciloscopio de 4GHz de ancho de banda (Keysight Technologies MS09404A), un autocorrelador comercial (APE Mini PulseCheck) y un fotodetector (Thorlabs, PM100USB).

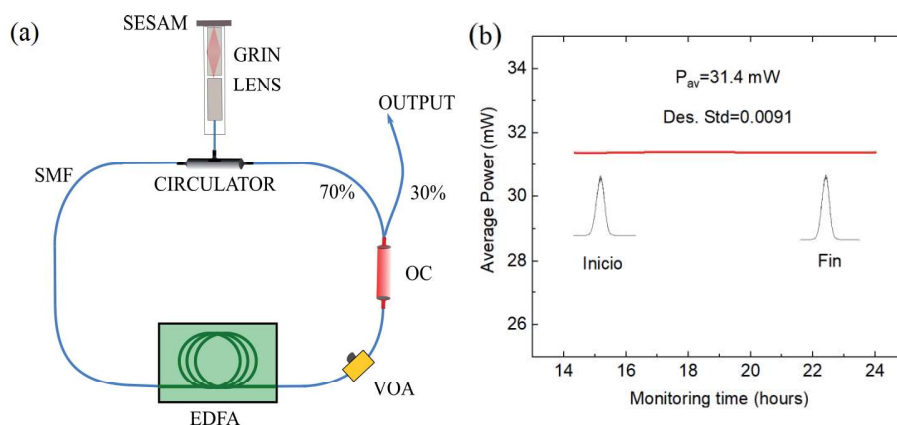


Figura 2. (a) Sistema láser y componentes ópticos, integración en fibra del absorbente saturable mediante el depósito del material sobre la terminación en fibra junto con la lente GRIN, (b) Medidas de estabilidad del tren de pulsos: Monitorización continua de la potencia media del láser a lo largo del tiempo.

El láser en fibra anclado en modos trabaja en configuración de *self-starting* debido al uso de fibra SMF y de un absorbente saturable. A la salida se obtienen pulsos gaussianos ultracortos, típicos de cavidades con *dispersión-managed*. La tasa de repetición del oscilador es de 5.6 MHz, el cual coincide con la configuración en modo fundamental de la cavidad láser, es decir, la distancia en tiempos entre pulsos consecutivos (178.5 ns) coincide con la longitud de la cavidad (38 m). Para demostrar la estabilidad del montaje láser todo en fibra se ha llevado a cabo una medida de monitorización de la potencia media de salida a lo largo del tiempo tal y como se muestra en la Figura 2b. Para esta figura, la potencia se midió en intervalos de un minuto durante 24 horas, donde se observa un pequeño aumento de la potencia de salida (potencia media de 31.4 mW), con una desviación estándar de 0.009. Este resultado demuestra no solo que el sistema es estable, sino que el absorbente saturable es capaz de soportar altas intensidades durante tiempos largos sin daños aparentes.

Por tanto, debido a un mayor control de la interacción láser en el interior de la cavidad, se obtienen pulsos con una mayor potencia de pico a la salida (70 kW), una menor duración temporal del pulso (128 fs) y espectros más anchos (42 nm) (Figura 3 (a) y (b)). Estos valores indican que el absorbente saturable de InN acoplado a una lente GRIN tiene ventajas únicas no solo en la generación de pulsos ultracortos, sino también como estabilizador en sistemas láser.

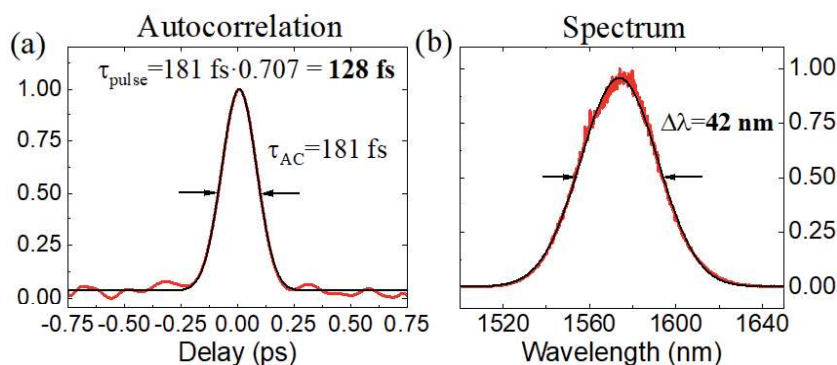


Figura 3. Medidas de caracterización óptica del pulso a la salida (a) Figura de autocorrelación con ajuste Gaussiano (línea negra), (b) Medida del espectro óptico con su correspondiente ajuste Gaussiano (línea negra).

4. CONCLUSIONES

En resumen, en este trabajo se ha demostrado el desarrollo de un sistema láser todo-fibra anclado en modos basado en el uso de un absorbente saturable de InN en el rango de las telecomunicaciones mediante la integración de una lente GRIN

como elemento acoplador a fibras monomodo. Entre los beneficios de este sencillo sistema destaca el tamaño compacto, la independencia de polarización sin necesidad de alineamientos externos que conllevan la generación de pulsos altamente estables debido a la reducción de aberraciones, y, por tanto, de la reducción de las pérdidas por inserción en el interior de la cavidad láser. Para sistemas láser, la lente GRIN combinada con el absorbente saturable de InN es capaz de generar pulsos estables de alta potencia a 1560 nm durante largos periodos de tiempo sin perjudicar el material. Por tanto, estas características hacen que este sistema láser compacto y estable sea perfecto como posible candidato para su aplicación en múltiples sistemas comerciales, tales como el desarrollo de elementos electroópticos o en óptica no lineal.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Avdokhin, A. V., Popov, S. V. & Taylor, J. R. (2003). Totally fiber integrated, figure-of-eight, femtosecond source at 1065 nm. *Optics Express*, 11, pp.265–269.
- Garmire, E. & Yariv, A. (1967). Laser mode-locking with saturable absorbers. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 3, pp.222–226.
- Hudson, D. D., Holman, K. W., Jones, R. J., Cundiff, S. T., Ye, J. & Jones, D. J. (2005). Mode-locked fiber laser frequency-controlled with an intracavity electro-optic modulator. *Optics Letters*, 30, pp.2948–2950.
- Jiménez-Rodríguez, M., Monroy, E., González-Herráez, M., & Naranjo, F.B. (2018). Ultrafast fiber laser using InN as saturable absorber mirror. *Journal of Lightwave Technology*, 36, pp.2175–2182.
- Keller, U. (2003). Recent developments in compact ultrafast lasers. *Nature*, 424, pp.931–938.
- Keller, U., Weingarten, K. J., & Kartner, F. X. (1996). Semiconductor saturable absorber mirrors (SESAM's) for femtosecond to nanosecond pulse generation in solid-state lasers. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2, pp.435–453.
- Knox, W. H. (2000). Ultrafast technology in telecommunications. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron*, 6, pp.1273–1278.
- Ko, S., Lee, J., Koo, J., Joo, B. S., Gu, M. & Lee, J. H. (2016). Chemical wet etching of an optical fiber using a hydrogen fluoride-free solution for a saturable absorber based on the evanescent field interaction. *Journal of Lightwave Technology*, 34, pp.3776–3784.
- Liu, X. M., Wanga, T., Shub, C., Wanga, L. R., Lina, A., Lua, K. Q., Zhanga, T. Y. & Zhao, W. (2008). Passively harmonic mode-locked erbium-doped fiber soliton laser with a nonlinear polarization rotation. *Laser Physics*, 18, pp.1357–1361.
- Martinez, A., Al Araimi, M., Dmitriev, A., Lutsyk, P., Li, S., Mou, C., Rozhin, A., Sumetsky, M. & Turitsyn, S. (2017). Low-loss saturable absorbers based on tapered fibers embedded in carbon nanotube/polymer composites. *APL Photonics*, 2, 126103.

- Monroy, L., Jiménez-Rodríguez, M., Monroy, E., González-Herráez, M. & Naranjo, F. B. (2020). High-Quality, InN-Based, Saturable Absorbers for Ultrafast Laser Development. *Applied Sciences*, 10, pp.7832.
- Monroy, L., Jiménez-Rodríguez, M., Ruterana, P., Monroy, E., González-Herráez, M., & Naranjo, F.B. (2019). Effect of the residual doping on the performance of InN epilayers as saturable absorbers for ultrafast lasers at 1.55 μ m. *Optical Materials Express*, 9, pp.2785–2792.
- Phillips, M. W., Ferguson, A. I., Hanna, D. C., McCarthy, M. J. & Suni, P. J. (1990). Actively Mode-Locked Fiber Lasers. *Proc. SPIE* 1171.
- Sugioka, K. & Cheng, Y. (2014). Ultrafast lasers—reliable tools for advanced materials processing. *Light: Sciences and Applications*, 3, pp.149.
- Taccheo, S. (2017). Fiber lasers for medical diagnostics and treatments: state of the art, challenges and future perspectives. *Proc. SPIE* 10058, pp.1-6.
- Turitsyn, S. K., Bale, B. G. & Fedoruk, M. P. (2012). Dispersion-managed solitons in fibre systems and lasers. *Physics Reports*, 521, pp.135–203.
- Wu, J., Walukiewicz, W., Yu, K. M., Ager, J. W., Haller, E. E., Lu, H., Schaff, W. J., Saito, Y., & Nanishi, Y. (2002). Unusual properties of the fundamental band gap of InN. *Applied Physics Letters* 80, pp.3967.
- Yamashita, S., Inoue, Y., Maruyama, S., Murakami, Y., Yaguchi, H., Jablonski, M. & Set, S. Y. (2004). Saturable absorbers incorporating carbon nanotubes directly synthesized onto substrates and fibers and their application to mode-locked fiber lasers. *Optics Letters*, 29, pp.1581-1583.
- Zervas, M. N. & Codemard, C. A. (2014). High Power Fiber Lasers: A Review. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 20, pp.219-241.