

Microláseres a base de impresión láser directa

Microlasers based on direct laser writing

Abril Ariana Estrada Zavala¹, Sarai Urdiales Mena¹, Alan González Anaya¹, Uriel Hernández Mojica¹, Eduardo Nicolas López Ramírez, Oscar Manuel Mendoza Rosas, Dr. Rigoberto Castro-Beltrán^{1*}

¹División de Ciencias e Ingenierías, Universidad de Guanajuato, Loma del Bosque 103, Lomas del Campestre CP 37150

* cbrigoberto@fisica.ugto.mx, r.castro@ugto.mx

Resumen

En este trabajo se presenta un ejemplo de fabricación y caracterización de microláseres a base de polímero. Las cavidades son fabricadas utilizando la técnica de impresión láser directa y como ejemplo, se presenta una matriz de 2x4 cavidades con razón de aspecto de diámetro/altura de 0.59; indicando que las cavidades tienen una altura mayor que su diámetro. Las microcavidades en forma de cilindro están fabricadas a base de un polímero fotosensible dopado con un elemento de ganancia óptica (Rodamina) con emisión alrededor de 600 nm. Al ser ópticamente excitadas con un láser de alta potencia de Nd:YAG con longitud de onda de trabajo centrada en @532 nm, las cavidades presentaron un umbral de operación promedio de $11.03 \mu\text{J cm}^{-2}$. El trabajo presenta la gran versatilidad en la fabricación y etapa de caracterización.

Palabras clave: microláseres, impresión láser directa.

Introducción

Un dispositivo fotónico integrado, es un chip capaz de procesar y transmitir información a partir de la manipulación de luz. Comúnmente, este tipo de sistemas están conformados por guías de onda por donde la luz es confinada. La geometría y organización de estas guías de onda dan la pauta para llevar a cabo diferentes procesamientos de la luz como: filtrado espacial, separación, mezcla de frecuencias, entre otros procesos ópticos. Este tipo de dispositivos se conforman de una etapa de procesamiento, una etapa de alimentación o bombeo óptico y una etapa de lectura o salida de la información (señales ópticas). Este trabajo se enfoca en la etapa de alimentación o bombeo óptico (microláseres). En esta etapa, el objetivo es contar con plataformas fotónicas en miniatura con umbrales de operación tan bajos [$\sim \mu\text{J cm}^{-2}$] como los reportados en el estado del arte. Los microláseres en este trabajo, son fabricados por procesos de impresión láser directa (DLW por sus siglas en inglés) [1]. Nuestras cavidades, a base del polímero fotosensible SU-8, son de forma cilíndrica, dopadas con un colorante (elemento de ganancia óptica) de nombre Rodamina, el cual, tiene una respuesta en absorción centrada en 532 nm y una de emisión alrededor de 600 nm [2, 3]. La fenomenología de emisión está caracterizada por dos procesos: Emisión espontánea amplificada (ASE por sus siglas en inglés) y lasing (laseo óptico). ASE es actualmente considerado por tener una respuesta espectral más ancha (en longitud de onda), mientras que lasing presenta picos de emisión múltiples con anchos muy finos, hasta x20 veces menor al ancho de ASE. El diseñar y fabricar cavidades ópticas con ASE y/o lasing depende principalmente de la concentración del elemento de ganancia óptica, de las propiedades fotofísicas de este y la matriz polimérica donde es huésped (SU-8) y, finalmente, de las propiedades geométricas de la cavidad [3].

Este trabajo se enfoca en la fabricación y caracterización de cavidades en forma de cilindro a base de polímero SU-8, fabricadas a partir de la técnica DLW.

Técnica de impresión láser directa (DLW)

La figura 1 muestra un bosquejo general de la técnica de impresión láser, la cual consiste en enfocar un haz láser de baja potencia, de longitud de onda continua, sobre un material fotosensible. El material fotosensible es una resina negativa (SU-8) la cual es dopada con el colorante Rodamina, el cual hará la función de elemento de ganancia una vez que se imprimen los cilindros a escala micrométrica por la técnica DLW.

El procedimiento general para preparar la muestra para someterse a DLW es el siguiente:

1. Se deposita materia SU-8/Rodamina en un sustrato (cubreobjetos) el cual se somete a un procedimiento de spin coating para generar una película homogénea sobre el sustrato.
2. Se le aplica un tratamiento térmico inicial al sustrato para homologar la película delgada y para evaporar residuos de algún solvente.

3. La película se somete a un proceso por DLW el cual consiste en posicionar la muestra sobre en la técnica de DLW y ópticamente excitar secciones por periodos de 5 min a potencias láser de 5 mW. Este procedimiento se repite para las 8 microcavidades fabricadas.
4. Una vez que la película es ópticamente excitada, imprimiendo en cada región una cavidad con la forma del haz enfocado (cilindro), la muestra se somete a un proceso de revelado químico el cual, por ser una resina negativa, eliminara todas las regiones que no fueron excitadas y mantendrá aquellas que sí, matriz 2x4 cavidades.
5. Después del revelado, la muestra se somete a un tratamiento térmico para solidificar las cavidades y detener el proceso del revelador.

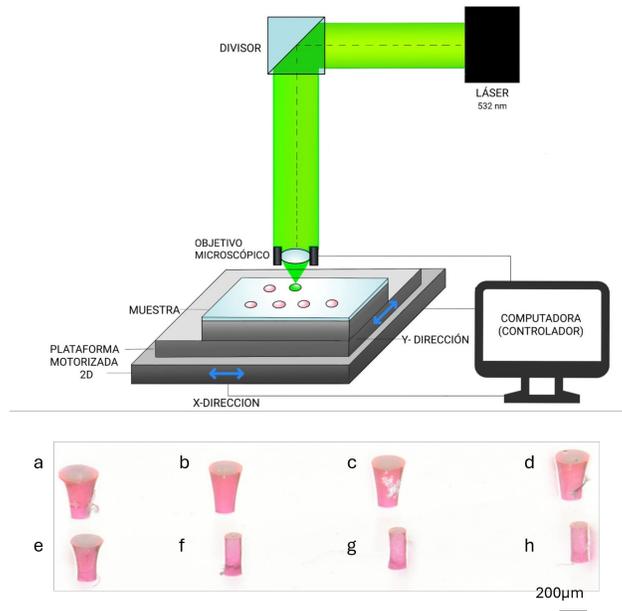


Figura 1.(arriba) Bosquejo de la técnica de impresión láser directa. (abajo) Detalles de las microcavidades fabricadas.

Una vez que las microcavidades son fabricadas, se utiliza un procedimiento de visualización para tomar las fotografías que nos permitirán ver los detalles de las mismas. La figura 1 (parte inferior), muestra un *close up* de las microcavidades en forma de cilindro fabricadas con la técnica DLW. Al manipular la posición relativa en z, la potencia láser y el tiempo de exposición láser, es posible fabricar diferentes razones de aspecto de las microcavidades (D/H), como se observa en la figura 1 (parte inferior). Una que vez que se han fabricado y registrado los parámetros geométricos de las microcavidades, estas se caracterizaran ópticamente para conocer el funcionamiento y fenomenología de operación de las mismas.

Caracterización Óptica

El funcionamiento y operación de las cavidades se registra al caracterizarlas ópticamente con una plataforma mostrada en la Figura 2. La Fig. 2 muestra una fotografía de la técnica experimental para caracterizar ópticamente las cavidades miniatura. La técnica está conformada por un sistema de bombeo óptico (excitación) a partir de un láser de alta potencia con elemento de ganancia un cristal no lineal de Nd:YAG, con un módulo de operación en longitud de onda centrado en @532 nm (2do armónico), pulsado con una frecuencia de repetición a 10 Hz, y con un ancho de pulso de 8 ns. La figura muestra, además, parte del camino óptico que recorre el haz, el cual es dirigido por un sistema de espejos de alta potencia, hasta pasar por un sistema de enfoque óptico para excitar las cavidades. La colección de la luz que resulta de excitar las cavidades, se registra a partir de una sección de colección óptica que consiste en un lente de colección, un filtro notch y una fibra óptica que colecta y transmite esta luz hacia un analizador de espectros (Ocean Insight).

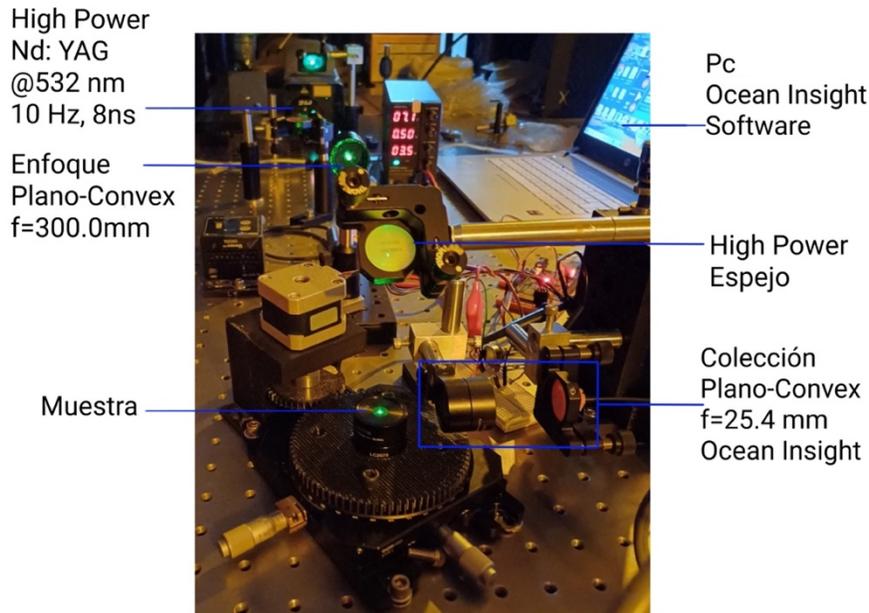


Figura 2. Fotografía del arreglo experimental para ópticamente caracterizar las cavidades láser en miniatura.

Resultados

El procedimiento para caracterizar las microcavidades ópticas consiste en posicionar cada microcavidad a lo largo de la trayectoria del haz de bombeo (excitación). Una vez que hemos posicionado la muestra, hay que optimizar la colección (fluorescencia inicialmente), para ello, nuestra muestra (cavidades) descansan sobre una montura de posicionador micrométrica con movilidad en el plano xy , la cual se ajusta para lograr el máximo de incidencia sobre el eje de la cavidad (cilindro). La colección se puede eficientar a través de la fibra óptica, la cual está posicionada en una plataforma que micrométrica con plano de movilidad en xz . El sistema de colección trabaja a con un arreglo óptico tipo $4f$. el registro de la señal óptica proveniente de la muestra (microláser) se registra en un analizar de espectros de la marca Ocean Insight 4000, con una configuración de 1000 segundos y 3 escaneos. La figura 3 muestra los resultados más sobresalientes de la caracterización óptica de una de las cavidades. En lectura de loop en el sentido horario de arriba hacia abajo, la Fig. 3 muestra los resultados del conjunto de espectros al ser la microcavidad ópticamente excitada con diferentes densidades de energía óptica. Cada espectro puede 1) se analizado como un dato de área bajo la curva o 2) seguir el pico de emisión máxima (en amplitud), de este se registran los máximos en un plot para identificar el umbral de operación. El umbral de operación es uno de los parámetros más significativos en este tipo de plataformas micrométricas, ya que representa la energía mínima en la que la cavidad pasa de emitir una señal fluorescente a un proceso de amplificación óptica, que para el caso particular de la Fig. 3, se registra como laseo óptico por los múltiples picos de emisión mostrados. Los espectros se pueden graficas en gráficos de densidad para visualizar mejor la homogeneidad en los patrones de emisión a lo largo de todo el bombeo. Finalmente, este proyecto se centró en la caracterización de 3 cavidades miniatura, y el resumen de los umbrales de operación se registra también en la última gráfica de la Fig. 3, donde se muestra que el menor umbral registrado fue de aprox. $5 \mu J cm^{-2}$.

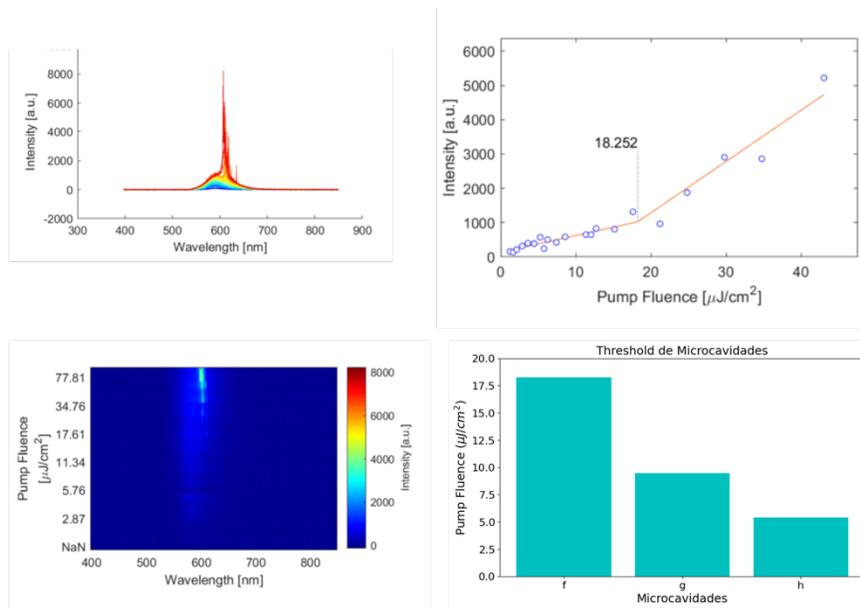


Figura 3. Detalles de emisión láser de una de las cavidades láser en miniatura.

Finalmente, la tabla 1 muestra los resultados más sobresalientes de la respuesta láser y parámetros geométricos de las cavidades bajo estudio.

Tabla 1. Parámetros geométricos y resultados más significativos de las 3 cavidades caracterizadas.

Cavidad	S1	S2	Threshold [μJ/cm ²]	S1/S2	H [μm]	D [μm]	FWHM [nm]	D/H	Fenómeno presentado
f	49	149	18.25	0.32889	225	114	0.19	0.506667	Lasing
g	83	604	9.447	0.137147	215	104	7.4	0.483721	ASE
h	100	1574	5.586	0.063532	208	113	0.19	0.543229	Lasing

Referencias

- [1] Camarena-Chávez, V. A., Castro-Beltrán, R., Medina-Cázares, O. M., Álvarez Martínez, J. U., Ramos-Ortiz, G., and Gutiérrez-Juárez, G. (2020). Implementation and assessment of a low-cost 3d laser platform controlled by open software for printing polymeric micro-structures. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 30(3):035010.
- [2] de la Cruz, H. M. R., Ortiz-Ricardo, E., Camarena-Chávez, V. A., Martínez-Borquez, A., Gutiérrez-Juárez, G., U'Ren, A. B., and Castro-Beltrán, R. (2021). Low-cost fabrication of microlasers based on polymeric micropedestals. *Appl. Opt.*, 60(3):720 -726.
- [3] de la Cruz, H. M. R., Rosas-Román, I., Ramos-Ortiz, G., Mendoza, B. S., Ortiz-Ricardo, E., Gutiérrez-Juárez, G., and Castro-Beltrán, R. (2023). Studies of the transition between amplified spontaneous emission and optical lasing in ultrahigh-q polymeric micro-pedestals. *Opt. Express*, 31(5):9018–9033.

Agradecimientos

Un agradecimiento especial al laboratorio de Biofotoacústica de la DCI, proyectos CIIC-DAIP 2020-2024, Proyectos Fronteras de la Ciencia-Conahcyt, al estudiante Uriel Alessandro Barajas.