

Polimerización de dos fotones, una tecnología interdisciplinar: de la innovación en investigación biomédica a los dispositivos fotónicos integrados

Alberto Saldaña López, Christian Maibohm, Oscar F. Silvestre y Jana B. Nieder

Las necesidades de microfabricación actuales, cada vez más complejas y específicas, requieren de nuevas técnicas como la 2PP que, utilizando los principios físicos de la litografía láser no lineal, hacen posible la creación de estructuras en 3D tanto en materiales biocompatibles como de aplicación electrónica.

La generación de pulsos láser ultracortos, el evento artificial más efímero creado por el hombre, ha permitido el descubrimiento de nuevos fenómenos en el campo de la interacción radiación-materia. Entre ellos destaca la absorción de dos o más fotones en la llamada **polimerización de dos fotones** (*two-photon polymerization*, 2PP, en sus siglas en inglés). Usando esta técnica de escritura láser directa se pueden crear estructuras 3D de libre diseño a una escala microscópica y en diferentes materiales, con una resolución por debajo del límite impuesto por la difracción de la luz. La aplicación de las estructuras escritas vía 2PP van desde andamios en ingeniería tisular hasta estructuras y dispositivos fotónicos como microlentes, guías de onda en 3D y cristales fotónicos.

Introducción

Hoy en día, el estudio de líneas celulares en un entorno tridimensional (3D) es esencial para una mejor comprensión del desarrollo de algunas enfermedades infecciosas y el cáncer. Estos estudios se centran en parámetros como la movilidad, capacidad de invasión y crecimiento de células perjudiciales frente a sanas en diferentes ambientes artificiales. El cambio desde una situación estándar 2D a un andamiaje 3D influye de manera relevante en el comportamiento celular. Los cultivos celulares tridimensionales están jugando un papel importante en la diferenciación de células madre, con aplicación directa en el campo de la regeneración de tejidos.

En un área muy diferente y relacionada con el sector de la información y la comunicación, también se necesitan técnicas de microfabricación 3D. Para reducir la cantidad de materiales y mejorar la velocidad de respuesta, existe una necesidad constante de miniaturización, así como de integración y reemplazo de los componentes electrónicos por sus análogos ópticos. La capacidad de controlar la interfaz luz-electrónica

es la base de la rama conocida como Optoelectrónica, un sector de la tecnología que ha crecido exponencialmente durante la última década.

Ambos campos requieren de técnicas de manufacturación 3D con la capacidad de, para el primero, crear estructuras microscópicas imitando los detalles del tejido natural y, para el segundo, alcanzar la precisión suficiente en el rango micro- y submicrométrico para fabricar estructuras fotónicas capaces de interactuar con los dispositivos optoelectrónicos.

A través de este artículo, comentaremos cómo el desarrollo de una versátil tecnología, la polimerización de dos fotones, está proporcionando soluciones a estos nuevos problemas y a muchos otros.

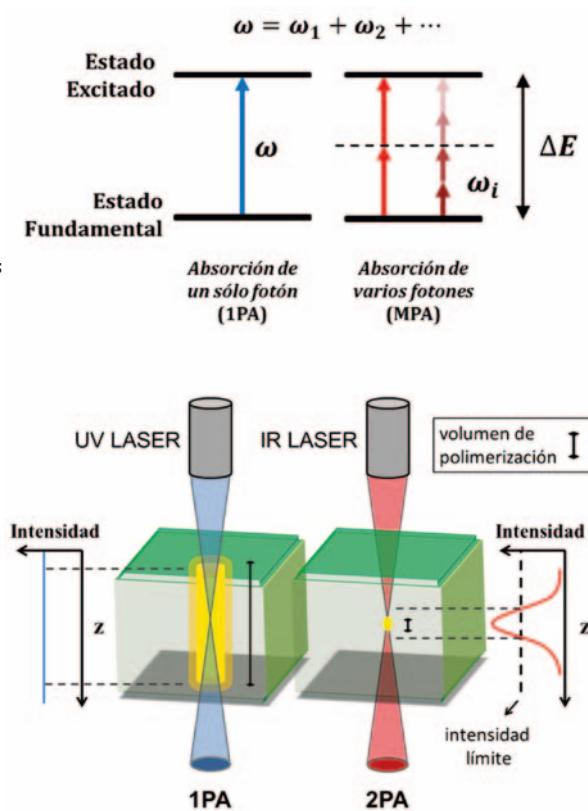
¿Qué es la 2PP?

La absorción de la luz por átomos y moléculas es un fenómeno ampliamente conocido en Física Cuántica. Sin embargo, la transición entre un estado fundamental y otro excitado puede llevarse a cabo absorbiendo uno, dos o más fotones (Figura 1). La expresión teórica para la absorción de dos fotones fue publicada por Maria Göppert-Mayer en 1930 [1] (premio Nobel de Física en 1964) y experimentalmente confirmada 30 años después tras la invención del láser (del inglés LASER, amplificación de la luz por emisión estimulada de radiación).

La absorción de dos fotones por parte de un sistema atómico o molecular es un fenómeno muy improbable. Tras la absorción del primer fotón, el segundo fotón debe llegar antes de que el sistema se desexcite desde este nuevo estado virtual en que se encuentra. Así, no fue hasta la segunda mitad del siglo xx cuando se hizo posible la observación de esta doble absorción, gracias al desarrollo de la Óptica Ultra-rápida y, en especial, a la invención de los pulsos láser ultra-cortos con energía pico suficiente para alcanzar densidades fotónicas muy elevadas.

Fig. 1. Principio y metodología en la absorción de dos fotones. **Arriba:** esquema de absorción mono- y multifotónica por un sistema físico. La diferencia de energía entre el estado fundamental y el excitado es $\Delta E = \hbar\omega_1 + \hbar\omega_2 + \dots$

Abajo: comparativa entre el volumen de polimerización para los procesos de absorción de uno (1PA) y múltiples fotones (MPA). En el primer caso, la excitación por medio de un fotón UV provoca la polimerización a lo largo de la región de la muestra que es atravesada por la luz. En el otro, la absorción simultánea de dos fotones IR hace que este volumen de polimerización se limite a la región focal del sistema.



La polimerización de dos fotones (2PP) es la técnica por la que un foto-polímero (matriz de monómeros sensibles a la luz) es irradiada y llevada a un estado excitado mediante la absorción de dos fotones infrarrojos (IR) de la misma longitud de onda [2]. En la región de exposición a la luz, los monómeros en la matriz se juntan para formar las cadenas de polímero con propiedades físicas diferentes respecto a la matriz original. Añadiendo foto-iniciadores, y mezclándolos con la matriz de monómero, se puede potenciar la reacción de polimerización por medio de la liberación de compuestos radicales que promueven el ensamblaje de monómeros en la cadena de polímero.

Más específicamente, por medio de la 2PP un láser de pulso ultracorto de unas decenas de femtosegundos (fs) de duración y de longitud de onda infrarroja, con un rango típico entre 750 y 800 nm, es focalizado sobre una muestra de foto-polímero. La pequeña probabilidad de absorción de dos fotones IR causará el fenómeno de 2PP (Figura 1). En la Sección 3 discutiremos por qué esto conduce a una alta localización espacial del proceso de 2PP, permitiendo la fabricación en tres dimensiones.

La polimerización de dos fotones comienza sólo cuando dos fotones IR pueden excitar simultáneamente la transición UV del polímero fotosensible

La polimerización tendrá lugar únicamente en un volumen en el que la densidad de fotones en el medio exceda un valor crítico, en otras palabras, hay un umbral de intensidad.

Desplazando este volumen de polimerización en las tres direcciones espaciales XYZ a través de la matriz de monómero, se consigue la creación de una estructura polimérica tridimensional, cuyas propiedades (índice de refracción, resistencia, elasticidad, etc.) son diferentes a aquellas del monómero original.

En el caso de estar usando un polímero de tipo negativo (ejemplos son SZ2080, Sartomer®, Ormocer®), se retira la matriz de polímero no irradiado alrededor para obtener las microestructuras diseñadas, ya que la región polimerizada se endurece. Para polímeros tipo positivo (como AZ P4620, AZ 9260, etc.) ocurre lo contrario, la zona de polímero irradiada se vuelve más fluida y será retirada. En la Figura 2 quedan esquematisados tanto el arreglo experimental como el proceso de 2PP (para un polímero tipo negativo).

Física debajo del fenómeno de 2PP

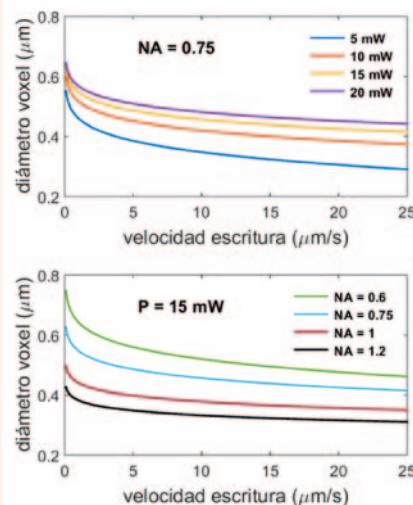
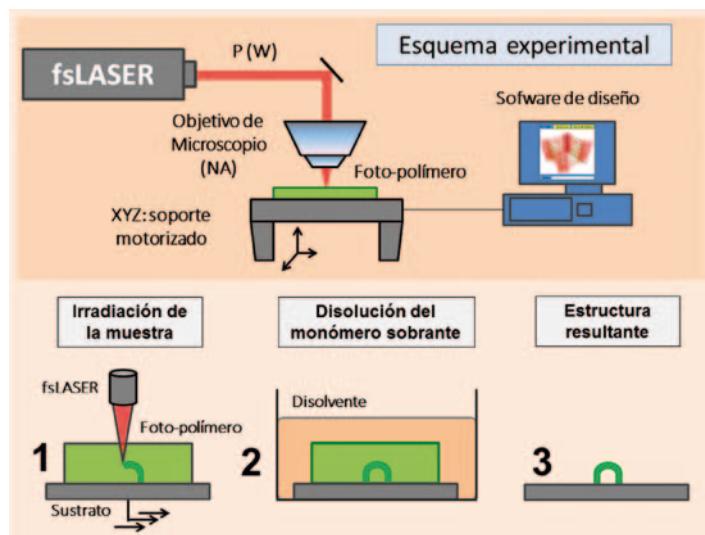
Si uno realiza algunos cálculos, concluirá que la probabilidad de absorción de un sólo fotón (1PA, de sus siglas en inglés) depende linealmente de la intensidad de la luz incidente.

La probabilidad de absorción de dos fotones simultáneos (2PA) es proporcional a la raíz cuadrada de esta intensidad (fenómeno no lineal). Combinando esta dependencia en la potencia con el perfil de intensidad gaussiano que produce una fuente láser de cierta longitud de onda central, el haz puede ser focalizado sobre una muestra de índice de refracción conocido (en general, similar al del cristal, $n \sim 1.6$) dando lugar a un fenómeno curioso. En esta situación y a lo largo del eje óptico de incidencia la probabilidad de absorción se distribuye constante para 1PA y por el contrario, presenta un máximo en el foco del haz para 2PA.

Esto es por lo que para 1PA la polimerización ocurrirá por igual en toda la sección de polímero que atravesie el haz láser, mientras que para 2PA esta sección queda limitada a la región focal del láser (Figura 1). En términos de probabilidades, podríamos decir que la sección eficaz del polímero es mayor para 1PA que para 2PA.

Llamamos voxel a este volumen de polimerización de forma elíptica y de tamaño micrométrico, derivado del inglés *volume pixel*. La resolución en las estructuras 2PP depende en última instancia del tamaño de este voxel, típicamente de entre 0.5 y 2 μm de grosor (semieje menor del elipsoide).

En 2PP, el volumen de polimerización o voxel se localiza en torno al foco del láser



¿Cómo depende el tamaño del voxel de los parámetros experimentales?

Las principales variables experimentales en 2PP son la potencia suministrada por el láser (P), la apertura numérica del objetivo (NA) y la velocidad de escritura (v). El tamaño del voxel puede ser reducido:

- Aumentando la NA del objetivo. Cuanto más alta la NA, más pequeña la región en la que se alcanza la densidad crítica de fotones. NA comunes varían entre 0.5 y 1.5 dependiendo de la magnificación del objetivo empleado.
- Disminuyendo la potencia aplicada $P(W)$, asegurando que se supera el límite para la polimerización. La potencia suministrada comprende entre 1 y 50 mW.
- Incrementando la velocidad de escritura (v); en otras palabras, reduciendo el tiempo de exposición/irradiación. Velocidades típicas son de decenas de $\mu\text{m}/\text{s}$ para una frecuencia de repetición del láser de unos 80-120 MHz.

Una reproducción cuantitativa del comportamiento del tamaño del voxel con los parámetros experimentales puede verse en la Figura 2, y un ejemplo de sus resultados queda reflejado en la Figura 3, que discutiremos en la siguiente sección.

2PP en investigación biomédica

En la Figura 3 se muestran pruebas de concepto de estudios que involucran interacción entre estructuras 2PP y células, llevadas a cabo en el Ultrafast Bio- and Nanophotonics Group del International Iberian Nanotechnology Laboratory (INL), en el marco de unas estancias de verano para estudiantes.

Las imágenes adjuntas al microscopio electrónico de barrido (SEM), muestran estructuras 3D con forma de caja grabadas mediante 2PP en el polímero SZ2080. Para ello, se usó un láser de femtosegundo de 795 nm a una velocidad de repetición de pulsos de 80 MHz (Tsunami, Spectra Physics), con una duración de pulso de unos 120 fs y una potencia láser promedio de 10 mW.

La velocidad de escritura fue de 10 $\mu\text{m}/\text{s}$ (uFab Workstation, Newport) bajo un objetivo de microscopio de 40 \times con un NA de 0.75 (PlanApo, Nikon).

En la Figura 3 (izquierda) se puede ver una caja a escala micrométrica de anchura 100 μm y altura 75 μm , con una estructura en forma de malla en su interior. Un zoom hacia el interior de la malla revela que la resolución puede ser tan buena como 990 nm (abajo, izquierdo), cuando el voxel da una sola pasada a través del polímero fotosensible. En la misma Figura 3 (derecha) se presenta una imagen SEM de una caja similar, con un volumen de 50 $\mu\text{m} \times 50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$, en la que se omitió la malla interior. Los muros de esa jaula fueron construidos moviendo el voxel en líneas horizontales y verticales con 5 μm de separación en ambas direcciones. Curiosamente no se observa separación entre líneas horizontales. Un solapamiento parcial de voxel a lo largo del eje vertical conecta un nivel de altura con el siguiente, lo que produce un muro aparentemente homogéneo y muy delgado (<1 μm), con áreas o celdas ligeramente separadas por micropilares que se extienden desde la base a la parte superior. Estos micropilares —con un diámetro algo superior a 1 μm y una separación de 5 μm — se crearon mediante una trayectoria vertical del voxel y muestran un diámetro ligeramente mayor en comparación con el grosor del resto de la pared. Este engrosamiento, de entre 5 y 6 μm , lo provoca la duración prolongada de la excitación por unidad de volumen cuando el voxel alargado se mueve en la dirección axial, en comparación con el movimiento lateral donde el diámetro es del orden de <1 μm . Para sostener estos muros de anchura <1 μm , se colocaron cuatro torres adicionales en las esquinas de la estructura, de doble grosor y 10 μm de lado.

De nuevo en la Figura 3 (abajo, derecha), se muestra una imagen al microscopio óptico de células de microglia vivas unas 24 horas después de haber sido agregadas a las estructuras. La dimen-

Fig. 2. Dispositivo experimental y parámetros láser para la fabricación basada en 2PP. **Izquierda:** arreglo experimental para microfabricación vía 2PP. Una fuente láser pulsada de femtosegundo (fs) con una potencia suministrada $P(W)$ se focaliza mediante un objetivo de gran apertura numérica (NA) sobre una superficie de foto-polímero (arriba). Protocolo en la creación de microestructuras: irradiación y procedido de una muestra de foto-polímero positivo (abajo). **Derecha:** resultados de una simulación para la dependencia del tamaño del voxel con la potencia suministrada P y la NA del objetivo. Los gráficos han sido reproducidos para una longitud de onda central de $\lambda = 795 \text{ nm}$, 50 fs de duración del pulso láser, y un índice de refracción para el polímero de $n = 1.69$.

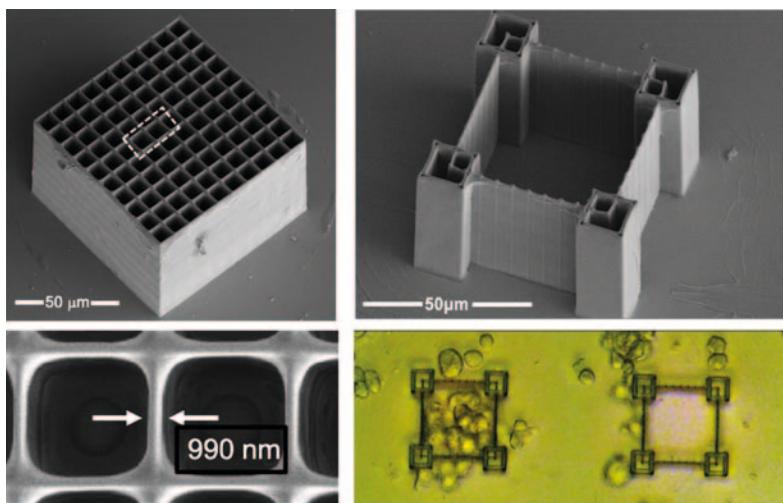


Fig. 3. Izquierdo: imágenes SEM de una estructura en forma de caja con un mallado 3D en su interior (arriba). Un zoom de su interior revela la resolución en la construcción de la malla (abajo). **Derecha:** imagen SEM de una estructura en forma de jaula abierta con cuatro sopor- tes en las esquinas (arriba). Imágenes al microscopio óptico de células de microglia tras 24 horas de interacción con las microestructuras (abajo).

sión de las microestructuras 3D es comparable a los elementos de la propia matriz extracelular, de alrededor de 1 μm , y se extiende varias decenas de micrómetros excediendo los tamaños celulares típicos. La imágenes al microscopio óptico muestran también que los cubreobjetos funcionalizados adquieren una buena transparencia para la microscopía de transmisión óptica y, por lo tanto, son muy adecuados para realizar estudios de interacción célula-microestructura. Las observaciones iniciales revelaron cierta unión de las células a las microestructuras y la formación de agregados celulares.

En este proyecto, se creó una matriz con estructuras en forma de caja usando la técnica de 2PP, y se agregaron y tomaron imágenes de células cerebrales humanas (microglia) usando un microscopio de campo amplio. El objetivo era averiguar la viabilidad de usar estas microplantillas 3D fabricadas mediante 2PP para estudios de movilidad celular.

El potencial de invasión y proliferación celular en un tejido está regulado por la interacción entre las células y la estructura 3D del medio que habitan. La habilidad para estudiar la migración y el crecimiento de las células en un medio lo más parecido posible al tejido original se ha convertido en una aplicación natural para la 2PP, ya que permite la creación de estructuras tridimensionales con una resolución superior al tamaño de las propias células (entendiéndose resolución como el tamaño de los detalles más pequeños).

El grupo de Dr. Boris N. Chickov, en Hannover (Alemania), dio la primera demostración de formación de tejidos aplicando esta técnica de impresión. El haz láser se dirigió directamente sobre las células vivas en proliferación, dando una forma predefinida a su matriz extracelular, y consiguiendo con ello la diferenciación sistemática de células madre en óseas o cardíacas de acuerdo [3]. En otro estudio, consiguieron crear una red vascular entre células depositadas en ca-

pas diferentes, que fueron colocadas y separadas mediante 2PP [4] y [5].

Barbara Spagnolo y colaboradores del Instituto Tecnológico Italiano usaron diseños 2PP en forma de jaula para separar células tumorales (células de cáncer de pulmón) de células sanas en base a su capacidad de invasión de las mismas estructuras [6]. Estudios recientes han demostrado además como esta técnica puede ser utilizada para medir la fuerza aplicada por las células durante los procesos de colonización [7].

2PP en Óptica y dispositivos fotónicos integrados

La fabricación de chips en Electrónica y su alto grado de miniaturización lleva a emplear métodos de fabricación como la litografía láser ultravioleta (UV). Sin embargo, y a pesar de su alta resolución, esta técnica únicamente permite la creación de dispositivos 2D y 2.5D (los microchips son planos).

La 2PP sobrepasa esta limitación 2D y en un futuro podría jugar un papel mucho más importante en dispositivos fotónicos integrados: la fabricación de microdispositivos para manipular la luz se vuelve posible. En la Universidad de Stuttgart (Alemania), el grupo de investigación del Prof. Dr. Herald Giessen ha abierto una nueva ventana al mundo de las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TICs). Han conseguido el empaquetamiento de multitud de microlentes (fabricadas mediante 2PP) sobre el extremo de fibras ópticas, corrigiéndolas de aberraciones [8]; la mejora en la eficiencia de LEDs nanométricos adaptándoles microobjetivos [9]; o, mediante la integración de microlentes en un chip CMOS (Complementary Metal-Oxide Semiconductor), la creación de un dispositivo que imita la visión del ojo de un águila, usando microlentes de diferentes distancias focales [10].

En la misma línea, destaca el ámbito de la microrrobótica, con aplicación natural en farmacología y tratamiento clínico. Se busca incorporar en el interior de tejidos dispositivos micrométricos y biodegradables con capacidad para ser orientados y transportados, de forma que puedan suministrar fármacos o realizar pequeñas intervenciones a esta escala y de forma específica.

En la Universidad Técnica de Dinamarca, el equipo del Dr. Jesper Glückstad ha diseñado mediante 2PP microrrobots maniobrables por medio de pinzas ópticas, que al calentarse por acción de un láser provocan la absorción o liberación de nanopartículas dentro o fuera de su núcleo hueco [11]. En la Figura 4 se muestra un microrobot similar, con cuatro elipsoides utilizados para controlar la dirección.

Este microrobot se usó como una guía de onda móvil, capaz de acoplar la luz a través de un embudo (arriba a la izquierda en la imagen) y de reorientarla un ángulo de 90° [12].

De forma similar, en una colaboración entre la Universidad de Koç (Turquía) y el Instituto Max Planck de Sistemas Inteligentes (Stuttgart, Alemania), se han producido microtúbulos móviles mediante la aplicación de un campo magnético externo, capaces de liberar fármacos tras su activación por luz [13].

Ninguno de estos logros hubiera sido posible sin la puesta en escena de la técnica que aquí nos ocupa, ya que es de las pocas con una resolución 3D tan adaptable.

Un vistazo general

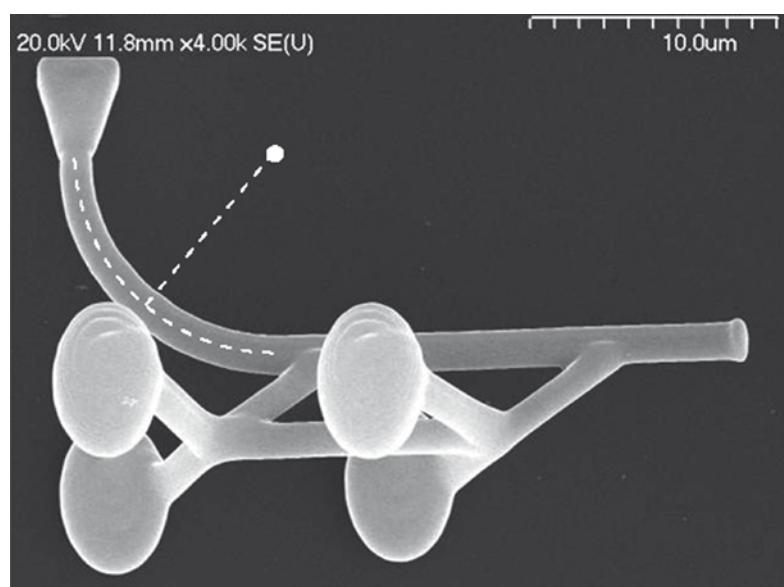
En resumen, se ha presentado la versatilidad del fenómeno no lineal de la 2PP como una técnica de escritura láser 3D directa. La extrema localización del fenómeno de absorción multifotónica se traduce en su capacidad para la microfabricación tridimensional. En este aspecto, la 2PP destaca por ofrecer soluciones a una gran variedad de campos, desde la aplicación para la investigación en biología celular hasta la fotónica y microóptica. Las estructuras tridimensionales de libre diseño alcanzables gracias al método de la polimerización de dos fotones entran en oposición a lo que se puede conseguir mediante las técnicas convencionales de litografía o microfabricación por absorción de un fotón, por lo que quedan limitadas a diseños 2D o 2.5D.

Los polímeros usados en 2PP pueden ser dopados con sondas químicas fluorescentes o nanopartículas, lo que abre la posibilidad de crear microestructuras 3D inteligentes, con capacidad de quimio-tracción, y con propiedades magnéticas y de sensado. Dado que en microscopía no lineal, la excitación y visualización provienen del mismo voxel, los equipos láser de femtosegundo que se utilizan en el proceso de fabricación se pueden emplear para la caracterización de las mismas microestructuras.

No obstante, existen algunos problemas todavía por resolver en el desarrollo de esta técnica emergente. La sensibilidad de los equipos a factores externos como la temperatura, la composición precisa de los fotopolímeros empleados y la complejidad de alineación y montaje óptimo de los instrumentos hacen que los resultados no sean del todo reproducibles entre diferentes grupos, ya que todas estas variables afectan de manera última a la resolución y tamaño del voxel.

Entre otras desventajas, existe además una limitación práctica en la complejidad y tamaño de las estructuras 2PP que se pueden fabricar: diseños demasiado grandes llevan un tiempo de manufacturación largo, y aquellos con detalles muy finos corren el peligro de dañarse al retirar las capas de polímero no irradiado en el posprocesado de la muestra.

Finalmente, cabe añadir que las compañías proveedoras de equipos láser para escritura



3D ofrecen un amplio abanico de opciones en técnicas de manufacturación. Ejemplos de ello son Nanoscribe [<https://www.nanoscribe.de/en/applications/>] Multiphoton Optics [<https://multiphoton.net/application-examples/>] y Newport [<https://www.newport.com/p/UFAB>]. Las aplicaciones, a menudo desarrolladas por sus clientes —que incluyen laboratorios de investigación destacados en todo el mundo—, abarcan desde ingeniería de tejidos, biomimética y dispositivos *lab-on-a-chip*, implantes de estimulación nerviosa, reproducción de la barrera hematoencefálica o dispositivos fotónicos integrados y microóptica.

En conclusión, la 2PP se está viendo involucrada en áreas como la ciencia de materiales y la ingeniería fotónica y tiene el potencial de ingresar en nuevos campos como la tecnología de información fotónica y cuántica, así como en otras ramas en las que su aplicación no ha sido aún explorada.

Agradecimientos

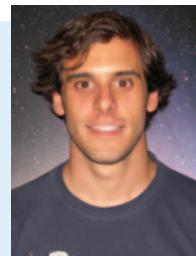
Los autores agradecen el apoyo del INL (International Iberian Nanotechnology Laboratory) a través de su programa de becas de verano. Este programa permitió al estudiante de grado A. S. L. participar para contribuir en un proyecto de investigación en curso en el grupo Ultrafast Bio- and Nanophotonics, que involucra técnicas 2PP aplicadas a estudios de movilidad celular. El proyecto fue llevado a cabo por C. M., O. F. S. y J. B. N. Los autores agradecen además a Inês Pinto, Andrea Cruz y Helena Sofia Domíngues (INL) por facilitar las muestras celulares y sus fructíferas discusiones, y a Jérôme Borme (INL) por la caracterización SEM de las estructuras. INL agradece la financiación proveniente de CCDR-N a través del proyecto "Nanotechnology-based functional solutions" (cuantía no.: NORTE-01-0145-FEDER-000019).

Fig. 4. Imagen SEM de un microrobot que funciona como un guía de onda móvil. Se ven los soportes elipsoidales para su captura óptica, así como la guía de onda en forma de curva. Imagen reproducida bajo permiso de ref.: [12], © The Optical Society.

Referencias

- [1] M. GÖPPERT-MAYER, "Elementary Processes with Two Quantum Transitions", *Ann. Phys.* 18, No. 7-8, 466-479 (2009).
- [2] M. FARSAARI y B. CHICHKOV, "Two-photon Fabrication", *Nature photonics* 3(8): 450-452; Materials Processing (2009).
- [3] M. GRUENE, A. DEIWICK, L. KOCH, S. SCHLIE, C. UNGER, N. HOFMANN, I. BERNEMANN, B. GLASMACHER y B. CHICHKOV, "Laser Printing of Stem Cells for Biofabrication of Scaffold-Free Autologous Grafts", *Tissue Engineering Part C: Methods* 17(1): 79-87 (2011).
- [4] M. GRUENE, M. PFLAUN, C. HESS, S. DIAMANTOUROS, S. SCHLIE, A. DEIWICK, L. KOCH, M. WILHELM, S. JOCKENHOEVEL, A. HAVERICH y B. CHICHKOV, "Laser Printing of Three-Dimensional Multicellular Arrays for Studies of Cell–Cell and Cell–Environment Interactions", *Tissue Engineering Part C: Methods* 17(10): 973-982 (2011).
- [5] L. KOCH, A. DEIWICK, S. SCHLIE, S. MICHAEL, M. GRUENE, V. COGER, D. ZYCHLINSKI, A. SCHAMBACH, K. REIMERS, P. VOGT y B. CHICHKOV, "Skin Tissue Generation by Laser Cell Printing", *Biotechnology and bioengineering* 109(7): 1855-1863 (2012).
- [6] B. SPAGNOLO, V. BRUNETTI, GODEFROY LEMENAGER, E. DE LUCA *et al.*, "Three-Dimensional Cage-Like Microscaffolds for Cell Invasion Studies", *Nature Scientific Reports* 5: 10531 (2015).
- [7] A. ACCARDO, M. BLATCHÉ, R. COURSON, I. LOUBINOUX, C. THIBAUT, L. MALAQUIN y C. VIEU, "Multiphoton Direct Laser Writing and 3D Imaging of Polymeric Freestanding Architectures for Cell Colonization" *Small*, vol. 13:25, (2017).
- [8] T. GISSIBL, S. THIELE, A. HERKOMMER y H. GIESSEN, "Two-Photon Direct Laser Writing of Ultracompact Multi-Lens Objectives", *Nature Photonics* 10: 554 (2016)
- [9] S. FISCHBACH, A. SCHLEHAHN, A. THOMA, N. SROCKA, T. GISSIBL, S. RISTOK *et al.*, "Single Quantum Dot with Microlens and 3D-Printed Micro-Objective as Integrated Bright Single-Photon Source", *ACS Photonics* 4(6), 1327-1332 (2017).
- [10] S. THIELE, K. ARZENBACHER, T. GISSIBL, H. GIESSEN y A. M. HERKOMMER, "3D-Printed Eagle Eye: Compound Microlens System for Foveated Imaging", *Science advances* 3(2), e1602655 (2017).
- [11] M. J. VILLANGCA, D. PALIMA, A. R. BANAS y J. GLÜCKSTAD, "Light-driven Micro-tool Equipped with a Syringe Function", *Light: Science & Applications* 5, e16148 (2016).
- [12] D. PALIMA, A. R. BAÑAS, G. VIZSNYICZAI, L. KELEMEN, P. ORMOS y J. GLÜCKSTAD, "Wave-Guided Optical Waveguides", *Opt. Express* 20, 2004-2014 (2012).
- [13] U. BOZUYUK, O. YASA, I. C. YASA, H. CEYLAN, S. KIZILEL y M. SITI, "Light-Triggered Drug Release from 3D-Printed Magnetic Chitosan Microswimmers", *ACS Nano* 12(9), 9617-9625 (2018).

Alberto Saldaña López
Visiting Student at the Ultrafast Bio- and Nanophotonics group,
INL (International Iberian Nanotechnology Laboratory),
Universidad Complutense de Madrid
(UCM)



Christian Maibohm
Postdoctoral Research Fellow at the Ultrafast Bio- and Nanophotonics group, INL (International Iberian Nanotechnology Laboratory)



Oscar F. Silvestre
Postdoctoral Research Fellow at the Ultrafast Bio- and Nanophotonics group, INL (International Iberian Nanotechnology Laboratory)



Jana B. Nieder
Research Group Leader of the Ultrafast Bio- and Nanophotonics Group, Head of the Nanophotonics and Bioimaging Corporate Facilities, Deputy Coordinator of the Future Emerging Technologies Cluster, INL (International Iberian Nanotechnology Laboratory)



9TH EPS-QEOD EUROPHOTON VIRTUAL CONFERENCE, 30 AUGUST - 4 SEPTEMBER 2020