

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS  
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



**Trabajo Fin de Máster**

# Post-procesado de fibras ópticas mediante láseres de femtosegundo

(Post-processing of optical fibers  
using femtosecond lasers)

Para acceder al Título de

**Máster Universitario en Ingeniería de Telecomunicación**

Autor: **Pablo Roldán Varona**

Julio 2019



E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

## MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN

### CALIFICACIÓN DEL TRABAJO FIN DE MÁSTER

*Realizado por:* **Pablo Roldán Varona**  
*Director del TFM:* **Luis Rodríguez Cobo**  
*Título:* "Post-procesado de fibras ópticas mediante láseres de femtosegundo"  
*Title:* "Post-processing of optical fibers using femtosecond lasers"

Presentado a examen el día: **24 de Julio de 2019**

para acceder al Título de

## Máster Universitario en Ingeniería de Telecomunicación

#### Composición del tribunal:

Presidente: Adolfo Cobo García  
Secretario: Jesús Ramón Pérez López  
Vocal: Juan Pablo Pascual Gutiérrez

Este Tribunal ha resuelto otorgar la calificación de: .....

Fdo.: El Presidente

Fdo.: El Secretario

Fdo.: El Vocal

Fdo.: El Director del TFM  
(sólo si es distinto del secretario)

Vº Bº del Subdirector

Trabajo Fin de Máster N°  
(a asignar por Secretaría)

Trabajo realizado gracias a los medios aportados por los proyectos "Generación de conocimiento en Dispositivos, Instrumentaciones y Sensores basados en Luz, DISLUZ" (50.P075.64004), y "Sensores fotónicos para seguridad y protección, SENSE" (TEC2016-76021-C2-2-R) (AEI/FEDER, UE) del gobierno español y los fondos FEDER.

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

# Post-procesado de fibras ópticas mediante láseres de femtosegundo

Máster Universitario en Ingeniería de Telecomunicación

ETS de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación  
Grupo de Ingeniería Fotónica (GIF)

por *Pablo Roldán Varona*

## Resumen

**R**esulta incontestable que la fotónica empieza a tener una importancia significativa en la sociedad, como indica su presencia en los diseños tecnológicos más avanzados de la actualidad. La fotónica, o ciencia y tecnología de la luz, es una de las seis tecnologías clave de futuro que la Comisión de la Unión Europea considera claves para su relanzamiento y crecimiento económico sostenido. Es considerada “esencial” in EE.UU., tecnología “facilitadora” en los planes Horizonte 2020 y en el de I+D+i vigentes en la UE y en el Estado español.

Dentro de la fotónica, el post-procesado de materiales ópticos mediante láseres de alta intensidad se presenta como uno de los campos con mayor aplicabilidad práctica. El presente trabajo se enmarca en dicha cuestión, en tanto en cuanto el procesado láser sirve como base para generar nuevos sensores, dispositivos, y subsistemas fotónicos. En muchos casos, estos dispositivos se conciben y realizan para detectar, monitorizar y medir parámetros relevantes en la salud humana por un lado y, por otro, para combatir el cáncer mediante terapias activadas por luz.

Las temáticas mencionadas anteriormente se consideran vitales tanto en varios grupos de trabajo de la Plataforma Europea *Photonics21* y en los retos científico-técnicos (*societal challenges*) que se deben afrontar y, además, las perspectivas de organismos públicos y privados les identifican grandes oportunidades de mercado.

Este Trabajo de Fin de Máster recoge las contribuciones aportadas en el campo de los sensores de fibra óptica. Realizando un estudio previo de los conocimientos teóricos necesarios, se acomete el diseño y la fabricación de dos sensores *in-fiber* de dimensiones milimétricas. Asimismo, con el tratamiento adecuado de las medidas realizadas con ambos, se establecen las novedades generadas con respecto al estado del arte, fundamentalmente en relación a la mejora que supone emplear óptica adaptativa desde el punto de vista de fluencia en el volumen focal, así como la correlación que presentan las variaciones del índice de refracción con la temperatura para guías de onda basadas en propagación por volumen focal o por filamentación.

**Palabras clave** – Láser de femtosegundo, Fabricación de microestructuras, Fibra óptica, Sensores, Diseño óptico, Red de Bragg en fibra, Mach-Zehnder, Guía de onda.

UNIVERSITY OF CANTABRIA

# Post-processing of optical fibers using femtosecond lasers

M.Sc, Telecommunications Engineering

Superior Technical School of Industrial and Telecommunication Engineers  
Photonics Engineering Group

by *Pablo Roldán Varona*

## Abstract

It is unquestionable that photonics begins to have a significant importance in society, as indicated by its presence in the most advanced technological designs of today. Photonics, or light science and technology, is one of the six Key Enabling Technologies (KETs) for the future that the European Commission (EC) considers key to its re-launch and sustained economic growth. It is considered “essential” in the USA, “facilitator” technology in the Horizon 2020 plans and in the R+D+i in force in the European Union (EU) and in the Spanish State.

Within photonics, the post-processing of optical materials using high intensity lasers is presented as one of the fields with greater practical applicability. The present work is framed in this question, insofar as the laser processing serves as a basis to generate new sensors, devices, and photonic subsystems. In many cases, these devices are conceived and performed to detect, monitor and measure relevant parameters in human health on the one hand and, on the other hand, to combat cancer through light-activated therapies.

The above-mentioned topics are considered vital both in several working groups of the European Platform *Photonics21* and in the scientific-technical challenges (societal challenges) that must be faced and, furthermore, the prospects of public and private organizations identify them great opportunities of the market.

This M.Sc Thesis reflects the contributions made in the field of optical fiber sensors. By carrying out a preliminary study of the theoretical knowledge required, the design and manufacture of two in-fiber sensors of millimetric dimensions is undertaken. Likewise, with the adequate treatment of the measurements made with both, the novelties generated with respect to the state of the art are established, fundamentally in relation to the improvement that supposes using adaptive optics from the point of view of fluence in the focal volume, as well as the correlation of the refractive index variations with the temperature for waveguides based on propagation by focal volume or by filamentation..

**Key words** – Femtosecond laser, Microstructure fabrication, Optical fiber, Sensors, Optical design, Fiber Bragg grating (FBG), Mach-Zehnder, Waveguide.

# Agradecimientos

**E**l primer reconocimiento de este trabajo es para Luis, ya no por este TFM, ni por haber empezado todo esto hace tres años con el TFG, sino por ser como eres. Has depositado en mí toda la confianza desde el principio, y eso es algo que valoro bastante. Esos cafés y esas charlas hablando de todo menos de “femto” han sido, sin duda, lo mejor de este trabajo. Eres un genio en todos los sentidos.

También tengo que agradecer a David la ayuda que me ha prestado desde el primer momento con el láser. Siempre ha estado disponible para responder cualquier pregunta, y para intentar explicar lo inexplicable en el mundo del femto.

Este agradecimiento es también extensible a los miembros del Grupo de Ingeniería Fotónica. El ambiente humano y de trabajo que existe hace que ir a trabajar no sea un suplicio, sino todo lo contrario. Es un placer estar rodeado de personas tan agradables en el trato. También he de agradecer a Rosana la colaboración establecida con la UPNA. Creo que se pueden conseguir grandes resultados en el futuro.

Finalmente, pero no por ello menos importante, gracias a mis compañeros (especialmente al grupo del café), amigos y familia; especialmente a mis padres y hermana, y como no, a ti Nuria, porque las cosas son un poquito más fáciles a tu lado.

# Índice general

<b>Índice general</b>	<b>I</b>
<b>Índice de figuras</b>	<b>III</b>
<b>Índice de tablas</b>	<b>VI</b>
<b>Acrónimos</b>	<b>VII</b>
<b>Lista de símbolos</b>	<b>VIII</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 Objetivos . . . . .	2
1.2 Contribuciones . . . . .	3
1.3 Estructura del documento . . . . .	4
<b>2 Fundamentos de procesamiento de materiales transparentes</b>	<b>6</b>
2.1 Interacción láser-material . . . . .	7
2.1.1 Formación del plasma de electrones libres . . . . .	7
2.1.2 Relajación y modificación . . . . .	11
2.1.3 Interacción multipulso . . . . .	15
2.1.4 Síntesis temporal de fenómenos físicos . . . . .	16
2.2 Parámetros de exposición en el procesamiento láser . . . . .	17
2.2.1 Enfoque . . . . .	17
2.2.2 Consideraciones prácticas para el grabado láser . . . . .	21
<b>3 Setup y técnicas de caracterización</b>	<b>24</b>
3.1 Setup experimental . . . . .	25
3.1.1 Propiedades de la fuente láser y elementos auxiliares . . . . .	25
3.1.2 Integración del sistema láser . . . . .	27
3.2 Configuraciones de grabado láser . . . . .	28
3.2.1 Aplicado a fibra óptica . . . . .	30
3.3 Técnicas de caracterización . . . . .	32
3.3.1 Refracted Near Field (RNF) . . . . .	32
3.3.2 Quantitative Phase Microscopy (QPM) . . . . .	33
3.4 Compensación astigmática con óptica adaptativa . . . . .	35
3.4.1 Resultados de fase . . . . .	38

<b>4</b>	<b>Inscripciones estándar</b>	<b>40</b>
4.1	Redes de <i>Bragg</i> en fibra (FBGs) . . . . .	41
4.1.1	Tipos de estructuras . . . . .	42
4.1.2	Configuraciones de grabado láser . . . . .	43
4.2	Guías de onda . . . . .	46
4.2.1	Técnica <i>multiscan</i> . . . . .	47
4.2.2	Geometrías de acoplo en CWGs . . . . .	48
4.3	Interferómetro Mach-Zehnder . . . . .	50
4.3.1	Acoplo evanescente . . . . .	52
<b>5</b>	<b>Sensores <i>in-fiber</i></b>	<b>54</b>
5.1	FBGs en alta temperatura . . . . .	55
5.2	Sensor de curvatura 2D en fibra multinúcleo . . . . .	60
5.2.1	Diseño y fabricación del sensor . . . . .	60
5.2.2	Caracterización de la estructura . . . . .	61
5.2.3	Sensado de curvatura en 2D . . . . .	63
5.3	MZI híbrido para sensado multi-parámetro . . . . .	65
5.3.1	Diseño y fabricación del sensor . . . . .	66
5.3.2	Caracterización de la estructura . . . . .	67
5.3.3	Sensado multi-parámetro . . . . .	71
<b>6</b>	<b>Conclusiones y líneas futuras</b>	<b>77</b>
6.1	Líneas de trabajo futuras . . . . .	78
6.2	Mejoras del setup experimental . . . . .	80
	<b>Bibliografía</b>	<b>81</b>

# Índice de figuras

## 1 Introducción

1.1 Comparación de efectos causados por un pulso láser ultra-corto con un pulso largo . . . . .	2
1.2 Estructura general, detallando para cada tema su localización dentro del documento y las publicaciones asociadas . . . . .	4

## 2 Fundamentos de procesado de materiales transparentes

2.1 Efectos no lineales derivados de la fotoionización . . . . .	8
2.2 Fotoionización por avalancha . . . . .	10
2.3 Cambios morfológicos en SiO <sub>2</sub> derivados del empleo de láseres de femtosegundo	11
2.4 Curva de transición volumen-temperatura del sílice en estado vítreo . . . . .	13
2.5 Rayos con polarización perpendicular atravesando un material birrefringente .	14
2.6 Esquema de <i>nanogratings</i> generados (Tipo II) en función de la polarización del campo eléctrico . . . . .	14
2.7 Inscripciones realizadas con el láser de fs sobre una placa de silicio con PRR = 120 kHz (influencia térmica entre pulsos) y diferentes energías de pulso. Se observa un ablación evidente (Tipo III) en la línea derecha. . . . .	15
2.8 Sección transversal del haz gaussiano en el punto focal . . . . .	16
2.9 Escala temporal de fenómenos físicos asociados a pulsos de láser de femto .	16
2.10 Evolución de la intensidad asociada al haz gaussiano y la curvatura del frente de onda . . . . .	19
2.11 Variación del ROC y la curvatura del frente de onda según la propagación del haz (se toma $z_0 = 1.1$ u.a.) . . . . .	19
2.12 Corrección en el enfoque en profundidad, y error cometido con aprox. paraxial	20

## 3 Setup y técnicas de caracterización

3.1 Imagen FLCPA <i>Cazadero</i> . . . . .	26
3.2 Setup experimental para el grabado con láser de femtosegundo . . . . .	27
3.3 Configuraciones de grabado de materiales transparentes con láser de fs . . . .	29
3.4 Grabado <i>end-face</i> en una fibra óptica . . . . .	30
3.5 Grabado <i>in-fiber</i> en una fibra óptica . . . . .	31
3.6 Diagrama proceso de medida RNF . . . . .	32
3.7 Perfil del índice de refracción del <i>end-face</i> de una fibra SMF medido con RNF	33

3.8	Perfil de fase del <i>in-fiber</i> de una fibra SMF medido mediante QPM . . . . .	34
3.9	Astigmatismo en fibra óptica ( <i>in-fiber</i> ) . . . . .	35
3.10	Empleo de óptica adaptativa (adaptador de índice) en el grabado láser . . . . .	35
3.11	Propagación del haz láser ante el empleo de óptica adaptativa y exposición directa . . . . .	37
3.12	Cambio de fase generado en el material en función de la energía de pulso . . . . .	38
<b>4</b>	<b>Inscripciones estándar</b>	
4.1	Demostración del empleo de diferentes ordenes de FBG . . . . .	41
4.2	Tipos de FBG en relación a la estructura del RIC inducido . . . . .	42
4.3	Empleo de la técnica <i>point-by-point</i> para el grabado de FBGs en fibra . . . . .	43
4.4	Empleo de la técnica <i>line-by-line</i> para el grabado de FBGs en fibra . . . . .	44
4.5	FBG situado en un CWG (WBG) . . . . .	46
4.6	CWGs ( <i>end-face</i> ) basadas en propagación por volumen focal (a) o filamentación (b) . . . . .	46
4.7	Aplicación de la técnica multiscan para el grabado de CWGs con una sección transversal que presente la forma geométrica requerida (típicamente circular para reducir pérdidas) . . . . .	47
4.8	Representación gráfica de la distribución espacial de potencia en una transición S-Bend . . . . .	48
4.9	Representación gráfica de la distribución espacial de potencia en una transición recta . . . . .	49
4.10	Transmisión ( $\frac{P_{out}}{P_{in}}$ ) de la guía de onda en función del ángulo de transición ( $\theta$ ) . . . . .	49
4.11	Esquema de un MZI basado en una CWG, con patrón de interferencia en transmisión . . . . .	50
4.12	Resultados correspondientes a las simulaciones para variaciones de $L_2$ , $d$ y $(\Delta n)_{cwg}$ . . . . .	51
4.13	Acoplo óptico mediante campo evanescente . . . . .	52
4.14	Simulación correspondiente a la variación de $L_{coup}$ (0, 100, 250, 500 y 1000 $\mu\text{m}$ ) . . . . .	53
4.15	CWG inscrita basada en acoplo evanescente (captura con microscopio de transmisión) . . . . .	53
<b>5</b>	<b>Sensores <i>in-fiber</i></b>	
5.1	Diagrama de la sección transversal de la fibra empleada . . . . .	55
5.2	Caracterización del FBG en el fibra MMF recubierta de cobre . . . . .	55
5.3	Ciclo de temperatura realizado sobre el FBG inscrito en la fibra de cobre . . . . .	56
5.4	Evaluación de la histéresis durante el ciclo de temperatura realizado . . . . .	57
5.5	Visión explícita de la degradación de la fibra en el ciclo de bajada (desaparición de $\lambda_B$ ) . . . . .	57

5.6	Estado del FBG antes y después del ciclo de temperatura de la Figura 5.3 . . .	58
5.7	Ciclo de temperatura realizado sobre el FBG inscrito en una fibra MMF (sin protección) . . . . .	59
5.8	<i>End-face</i> (iluminado) de la Fibercore SM-4C1500 (4 núcleos) . . . . .	60
5.9	Diagrama esquemático con dimensiones de la sección del sensor . . . . .	61
5.10	Fusión entre MCF y MMF (acoplo imperfecto de núcleos) . . . . .	61
5.11	Setup empleado durante la inscripción para caracterizar la estructura sensora	62
5.12	Espectros de reflexión con las $\lambda_B$ indicadas en la Tabla 5.1. Se muestra la respuesta del sensor para longitudes de los FBGs ( $L_g$ ) de 1, 2, 3 y 4 mm. . .	62
5.13	Resultado de la inscripción láser en la fibra MCF. Se muestra la posición de cada núcleo, estando enfocado el FBG del núcleo 1. . . . .	62
5.14	Representación conceptual de la idea en que se basa el sensor diseñado . . .	63
5.15	Esquema de la configuración experimental del proceso de medida de flexión .	63
5.16	Variación de la potencia reflejada (FBGs 1 y 2) en función de $\kappa$ (para $\theta = 0^\circ$ )	64
5.17	Evolución de la potencia reflejada por cada núcleo en función tanto de la curvatura $\kappa$ como de la rotación angular $\theta$ . . . . .	65
5.18	Estructura geométrica del componente <i>all-in-fiber</i> integrado en 6 mm . . . .	66
5.19	Caracterización del índice de refracción de la guía de onda mediante RNF . .	67
5.20	Estudio de las guías de onda fabricadas mediante la técnica multiscan . . . .	68
5.21	Caracterización espectral del MZI inscrito . . . . .	69
5.22	Espectro de transmisión del MZI completo sin y con el FBG en el núcleo . .	70
5.23	Vista longitudinal de dos tramos del componente <i>in-fiber</i> fabricado . . . . .	70
5.24	(Eje <i>Y</i> izdo.) Desplazamiento de $\lambda_{dip}$ del MZI fabricado en este trabajo para temperaturas entre 23°C y 800°C (línea continua), y desplazamiento de $\lambda_{dip}$ del MZI citado para temperaturas entre 23°C y 650°C, con el ajuste y la traslación, mediante un factor de escala $\delta$ , a las medidas del presente trabajo (líneas punteadas). (Eje <i>Y</i> dcho.) Desplazamiento de $\lambda_B$ para temperaturas entre 23°C y 800°C. Se indican también las sensibilidades ( $k_T$ ), así como el efecto del <i>annealing</i> . . . . .	71
5.25	Desplazamiento de $\lambda_{dip}$ del MZI al sumergir la fibra en líquidos con diferente RI	73
5.26	Desplazamiento de $\lambda_{dip}$ al realizar dos sets de curvatura . . . . .	74
5.27	Esquema de la configuración experimental del proceso de medida de strain .	74
5.28	Desplazamiento de $\lambda_B$ y $\lambda_{dip}$ al inducir strain sobre el tramo sensor de la fibra	75
5.29	Sensibilidad cruzada de curvatura y strain . . . . .	76

## 6 Conclusiones y líneas futuras

6.1	Esquema del sensor en MCF . . . . .	78
6.2	Biosensor basado en MZI . . . . .	79

# Índice de tablas

<b>2</b>	<b>Fundamentos de procesamiento de materiales transparentes</b>	
2.1	Tipos de modificación en el material . . . . .	12
<b>3</b>	<b>Setup y técnicas de caracterización</b>	
3.1	Especificaciones FLCPA <i>Cazadero</i> . . . . .	26
3.2	Especificaciones lente <i>Mitutoyo</i> . . . . .	26
3.3	Especificaciones motor <i>Aerotech</i> . . . . .	26
3.4	Especificaciones cámara CCD . . . . .	26
<b>4</b>	<b>Inscripciones estándar</b>	
4.1	Comparación métodos de grabado FBGs: máscara de fase y láser fs ( <i>PbP</i> , <i>LbL</i> , <i>PI-b-PI</i> ) . . . . .	45
4.2	Parámetros utilizados en las simulaciones, con valores realistas . . . . .	48
4.3	Parámetros establecidos en los cuatro tipos de simulación . . . . .	51
<b>5</b>	<b>Sensores <i>in-fiber</i></b>	
5.1	Periodo, velocidad de inscripción y longitud de onda de <i>Bragg</i> de cada FBG . . . . .	61

# Acrónimos

<b>BPM</b>	Beam Propagation Method	<b>OPD</b>	Optical Path Difference
<b>CCD</b>	Charge-Coupled Device	<b>OSA</b>	Optical Spectrum Analyzer
<b>CFBG</b>	Chirped Fiber Bragg Grating	<b>PCF</b>	Photonic-Crystal Fiber
<b>CWG</b>	Cladding Waveguide	<b>PDT</b>	Photodynamic Therapy
<b>FBG</b>	Fiber Bragg Grating	<b>PRR</b>	Pulse Repetition Rate
<b>FCA</b>	Free Carrier Absorption	<b>QPM</b>	Quantitative Phase Microscopy
<b>FEM</b>	Finite Element Method	<b>RFBG</b>	Regenerated Fiber Bragg Grating
<b>FLCPA</b>	Fiber Laser Chirped Pulse Amplifier	<b>RFG</b>	Random Fiber Grating
<b>FLICE</b>	Femtosecond Laser Irradiation followed by Chemical Etching	<b>RI</b>	Refractive Index
<b>FSR</b>	Free Spectral Range	<b>RIC</b>	Refractive Index Change
<b>FWHM</b>	Full Width at Half Maximum	<b>RIU</b>	Refractive Index Unit
<b>GUI</b>	Graphical User Interface	<b>RNF</b>	Refracted Near Field
<b>LOC</b>	Lab-On-Chip	<b>ROC</b>	Radius of Curvature
<b>LPG</b>	Long Period Grating	<b>SHG</b>	Second Harmonic Generation
<b>MCF</b>	Multicore Fiber	<b>SLM</b>	Spatial Light Modulator
<b>MIT</b>	Massachusetts Institute of Technology	<b>SMF</b>	Single-Mode Fiber
<b>MMF</b>	Multi-Mode Fiber	<b>SRI</b>	Surrounding Refractive Index
<b>MTBF</b>	Mean Time Between Failures	<b>TFBG</b>	Tilted Fiber Bragg Grating
<b>MZI</b>	Mach-Zehnder Interferometer	<b>TIE</b>	Transport-of-Intensity Equation
<b>NA</b>	Numerical Aperture	<b>TM</b>	Transformation Matrix
<b>OFS</b>	Optical Fiber Sensor	<b>UV</b>	Ultraviolet
		<b>WBG</b>	Waveguide Bragg Grating
		<b>WD</b>	Working Distance

# Lista de símbolos

## Constantes

$\epsilon_0$	Permitividad en el espacio libre ( $\sim 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2/\text{Nm}^2$ )
$\eta$	Impedancia de onda en el espacio libre ( $\sim 120\pi \Omega$ )
$c$	Velocidad de la luz ( $\sim 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ )
$e$	Carga fundamental del electrón ( $-1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ )
$h$	Constante de <i>Planck</i> ( $\sim 6.63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ )

## Variables asociadas al micromecanizado de materiales

$\gamma$	Parámetro de <i>Keldysh</i>
$\lambda$	Longitud de onda de la fuente láser
$\tau$	Duración temporal del pulso del láser
$E(r)$	Campo eléctrico del haz láser según la posición espacial
$E_{gap}$	Energía de banda prohibida
$E_p$	Energía de pulso del láser
$f$	Tasa de repetición de pulsos del láser (PRR)
$I(r)$	Intensidad del haz láser según la posición espacial
$I_{th}$	Intensidad umbral de ruptura óptica
$m_e$	Masa efectiva del electrón
$M^2$	Factor de calidad del haz láser
$n$	Índice de refracción. Puede hacer referencia a núcleo ( $n_c$ ), cubierta ( $n_{clad}$ ) o guía de onda ( $n_{cwg}$ )
$N$	Número efectivo de pulsos del láser (interacción multipulso)
NA	Apertura numérica de la lente objetivo
ROC	Radio de curvatura
$T_f$	Temperatura ficticia
$v$	Velocidad de <i>scanning</i> ( <i>writing speed</i> )
$w_0$	“ <i>Waist radius</i> ” ( $2w_0$ hace referencia al diámetro del punto focal)
$z_0$	Longitud de <i>Rayleigh</i> ( $2z_0$ define la profundidad de foco)

### Variables en QPM

$\delta z$  Defocusing empleado en QPM

### Variables de diseño del FBG

$\theta_{tilt}$  Ángulo de *tilt* de un TFBG  
 $\lambda_B$  Longitud de onda de *Bragg* del FBG  
 $\Lambda$  Periodo del FBG  
 $L_g$  Longitud de la red de difracción en fibra  
 $m$  Orden (armónico) del FBG

### Variables de diseño del MZI

$\theta$  Ángulo de separación de la transición núcleo-CWG del MZI  
 $d$  Separación radial entre el núcleo y el tramo de cubierta paralelo ( $L_2$ ) de la CWG del MZI  
 $d_{coup}$  Separación radial entre el núcleo y el tramo de acoplo ( $L_{coup}$ ) de la CWG del MZI  
 $L$  Longitud de la guía de onda que propaga el modo secundario en un MZI  
 $L_1$  Distancia longitudinal del tramo de acoplo del MZI  
 $L_2$  Distancia longitudinal del tramo de cubierta paralelo al núcleo del MZI  
 $L_{coup}$  Distancia longitudinal del tramo de acoplo de la CWG del MZI  
 $R$  Anchura (diámetro) de la guía de onda ( $R_{cwg}$ ), el núcleo ( $R_c$ ) o la cubierta ( $R_{clad}$ )  
 $s$  Separación radial entre las inscripciones que conforman una guía de onda (técnica multiscan)

### Parámetros de medida

$\varepsilon$  Strain aplicado sobre el FBG/MZI  
 $\kappa$  Inverso del radio de curvatura (eje de flexión)  
 $d$  Separación inicial entre extremos fijos de la fibra para la configuración experimental de medida de strain y curvatura  
 $R$  Radio de curvatura (eje de flexión)

# 1

## Introducción

---

<b>1.1</b>	<b>Objetivos</b> . . . . .	<b>2</b>
<b>1.2</b>	<b>Contribuciones</b> . . . . .	<b>3</b>
<b>1.3</b>	<b>Estructura del documento</b> . . . . .	<b>4</b>

---

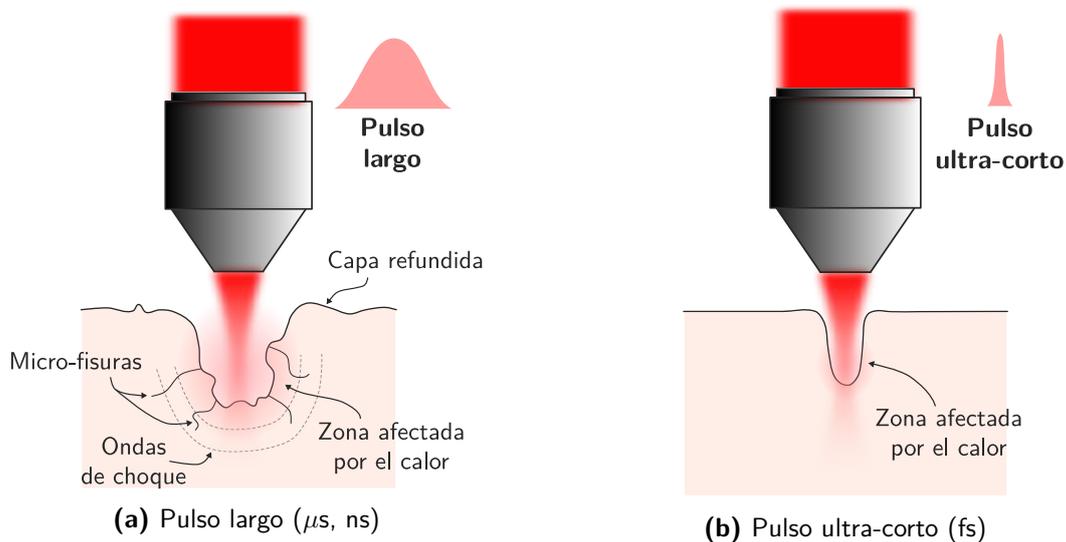
Controlando la interacción de haces láser intensos con materiales se pueden modificar localizadamente las propiedades de los mismos, siendo posible incluso micro-nanomecanizar [1]. Ello se puede lograr tanto para materiales transparentes como opacos (absorbentes) utilizando los diferentes efectos físicos de la interacción luz-materia que intervienen [2], en relación con los parámetros que caracterizan el haz láser [3]. Lo citado puede utilizarse de forma ventajosa para inscribir patrones en los sustratos trabajando por debajo de los correspondientes umbrales<sup>1</sup> o, incluso, superar el umbral de ablación (T3) y producir extracciones localizadas de material (micromecanizado) generando patrones arbitrarios (agujeros, canales, túneles, etc.) en la superficie, o incluso en el interior de los materiales objeto [4]. Esto posibilita incluso la combinación de patrones inscritos de guías de onda y el micromecanizado, permitiendo la concepción de estructuras diminutas en las que generar interacciones específicas de luz y fluidos.

Mediante láseres intensos pulsados emitiendo en las longitudes de onda y con las características de pulso (energía, duración, tasa de repetición) apropiadas es posible la realización tanto de investigación fundamental, como aplicada en una variedad de diferentes campos, incluyendo la óptica integrada avanzada, la ciencia de los materiales, fotoquímica, ciencias de la vida [5], la fabricación de materiales y, por supuesto, la realización de estructuras para sensores fotónicos. Estos láseres, caracterizados por pulsos de duración extremadamente corta (p.ej. femtosegundos), son idóneos para efectuar procesamiento láser de materiales ópticos (incluyendo las fibras ópticas), como puede ser la modificación del índice de refracción efectivo o la modificación axial del diámetro de la fibra.

---

<sup>1</sup>En la [Subsección 2.1.2](#) se presentarán los tres umbrales (T1, T2, T3) que definen los tipos de modificación en el material al incidir sobre él con un haz láser.

El empleo de láseres con pulsos ultra-cortos posibilita el procesado de materiales con precisión nanométrica, al no presentar el impacto térmico, las microfisuras o los daños superficiales propios del empleo de láseres con una duración de pulso mayor [2] (Figura 1.1).



**Figura 1.1.** Comparación de efectos causados por un pulso láser ultra-corto con un pulso largo

## 1.1. Objetivos

Una vez presentado el contexto y la motivación relativa al procesado láser, se define el objetivo de este Trabajo Fin de Máster como el estudio, fabricación y posterior optimización de estructuras ópticas a escala micrométrica que posibiliten el desarrollo de sensores y dispositivos fotónicos avanzados. Mediante el uso de un láser de femtosegundo, se realizan inscripciones sobre fibra óptica con objeto de modificar con exactitud el índice de refracción efectivo del material, consiguiendo una propagación de la luz tal que genere los efectos adecuados para realizar el sensado de diferentes parámetros.

Si bien el objetivo preeminente es claro desde una perspectiva general, este trabajo se puede dividir de forma concisa en el desarrollo de dos sensores, ambos con una utilidad práctica en aplicaciones de naturaleza multidisciplinar y con gran perspectiva de mejora.

- **Sensor de curvatura bidimensional** en una fibra óptica de 4 núcleos. Se puede ver como un prototipo aplicable en el ámbito biomédico, en tanto en cuanto una mejora en el aprovechamiento eficiente de los 4 núcleos puede derivar en la utilización de dicho sensor como catéter: sensado 2D (2 núcleos), "visión" (1 núcleo) y tratamiento biofotónico (1 núcleo). Dentro de las líneas de investigación futuras (Capítulo 6), se aborda dicho aspecto.
- **Sensor multi-parámetro** basado en la inscripción de un interferómetro y un FBG (*Fiber Bragg Grating*) en una fibra óptica estándar. La posibilidad de discriminar diferentes parámetros físicos (temperatura, curvatura, *strain* o índice de refracción) sugiere de forma implícita que se trata de un dispositivo fotónico con gran aplicación no sólo en el entorno médico, sino también en campos como la bioquímica.

## 1.2. Contribuciones

La consecución del presente trabajo ha derivado en una serie de resultados, de carácter eminentemente experimental, los cuales han dado lugar a las contribuciones científicas que se muestran seguidamente, estando divididas en aquellas cuyo contenido está estrechamente relacionado con este trabajo (y por tanto recogidas en el mismo), y aquellas que no están abordadas en este documento.

### Premios

Premio en el concurso “*Póster de Trabajos en Programas Máster/Doctorado*” del curso académico 2018/19, otorgado por la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación en la festividad de San José.

### Revista internacional

- [RPR1] P. Roldán-Varona, D. Pallarés-Aldeiturriaga, L. Rodríguez-Cobo, y J.M. López-Higuera. “In-fiber Mach-Zehnder Interferometer assisted by core FBG for multi-parameter sensing”, enviado a *Journal of Lightwave Technology* en Julio 2019, y a la espera de revisión.
- [LRQ2] I. Laarossi, P. Roldán-Varona, M.A. Quintela, L. Rodríguez-Cobo y J.M. López-Higuera. “Ultrahigh temperature and strain hybrid integrated sensor system based on Raman and femtosecond FBG inscription in a multimode gold-coated fiber”, enviado a *Optics Express* en Julio 2019, y a la espera de revisión.
- [PBR3] R.A. Pérez-Herrera, M. Bravo Acha, P. Roldán-Varona, D. Leandro, L. Rodríguez-Cobo, J.M. López-Higuera, y M. López-Amo. “Enhanced optical fiber lasers and optical fiber sensors assisted by micro-drilled optical fibers”, enviado a *Optics Letters* en Julio 2019, y a la espera de revisión.

### Conferencia internacional

- [RPR4] P. Roldán-Varona, D. Pallarés-Aldeiturriaga, L. Rodríguez-Cobo, y J.M. López-Higuera. “Reflected power-based 2D bending sensor using femtosecond laser FBG inscription in multicore fiber”, aceptado en EWOFs’19 (7th European Workshop on Optical Fibre Sensors), Limassol, Chipre, Octubre 2019.
- [RPR5] P. Roldán-Varona, D. Pallarés-Aldeiturriaga, L. Rodríguez-Cobo, y J.M. López-Higuera. “Hybrid Mach-Zehnder Interferometer manufactured by femtosecond laser multiscan technique”, aceptado en EWOFs’19 (7th European Workshop on Optical Fibre Sensors), Limassol, Chipre, Octubre 2019.
- [PRR6] D. Pallarés-Aldeiturriaga, P. Roldán-Varona, L. Rodríguez-Cobo, y J.M. López-Higuera. “Astigmatism compensation for waveguide inscription in optical fiber by femtosecond lasers”, aceptado en EWOFs’19 (7th European Workshop on Optical Fibre Sensors), Limassol, Chipre, Octubre 2019.
- [PBR7] R.A. Pérez-Herrera, M. Bravo Acha, P. Roldán-Varona, D. Leandro, L. Rodríguez-Cobo, J.M. López-Higuera, y M. López-Amo. “Micro-drilled optical fiber for enhanced laser strain sensors”, aceptado en EWOFs’19 (7th European Workshop on Optical Fibre Sensors), Limassol, Chipre, Octubre 2019.

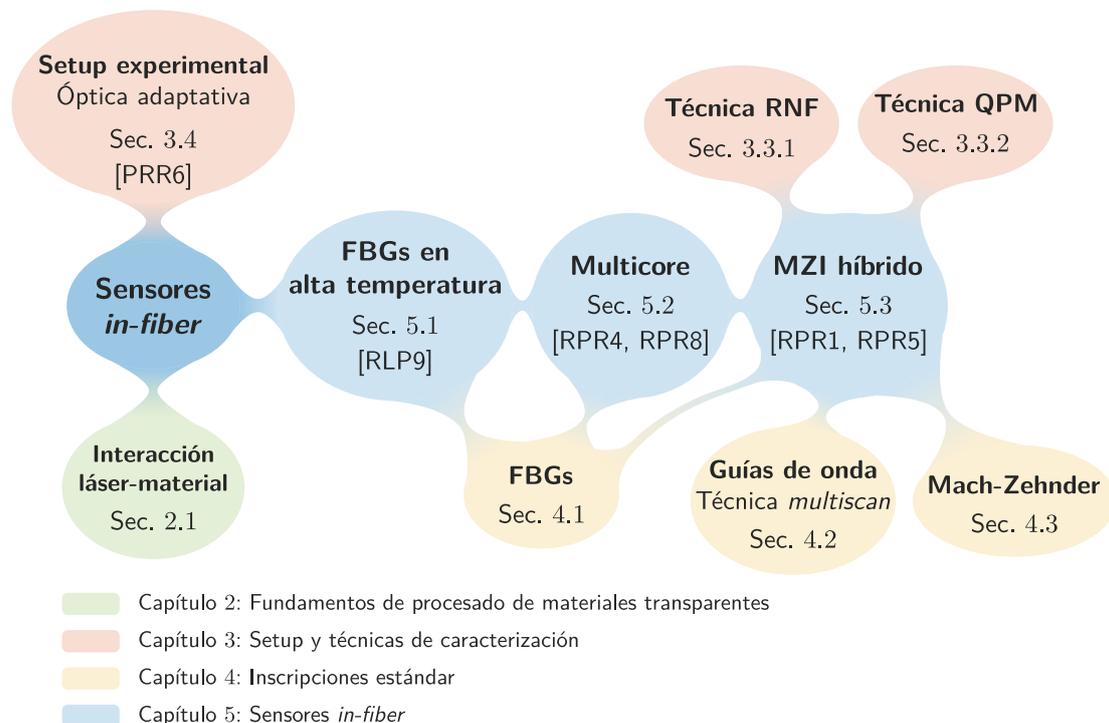
## Conferencia nacional

- [RPR8] P. Roldán-Varona, D. Pallarés-Aldeiturriaga, L. Rodríguez-Cobo, y J.M. López-Higuera. “Sensor de curvatura 2D basado en potencia reflejada por FBGs inscritos en una fibra multinúcleo mediante láser de femtosegundo”, en OPTOEL 2019 (XI Reunión Española de Optoelectrónica), Zaragoza, España, Julio 2019.
- [RLP9] P. Roldán-Varona, I. Laarossi, D. Pallarés-Aldeiturriaga, I. Aporta, M.A. Quintela, L. Rodríguez-Cobo, y J.M. López-Higuera. “Femtosecond laser fiber Bragg grating inscribed in multimode fibers”, en OPTOEL 2019 (XI Reunión Española de Optoelectrónica), Zaragoza, España, Julio 2019.

## 1.3. Estructura del documento

A continuación se define la estructura del documento, detallando de forma breve el contenido de los capítulos que conforman el mismo. En la [Figura 1.2](#) se muestra de forma esquemática la conexión que presentan los bloques más importantes del trabajo, indicando su localización en el documento, así como la temática con que se relacionan las publicaciones derivadas del trabajo, enumeradas previamente.

Se observa como el capítulo 5, que contiene el desarrollo de los sensores en fibra, es el más importante del trabajo. Dentro de él, la fabricación de un interferómetro Mach-Zehnder híbrido para el sensado de múltiples parámetros ([Sección 5.3](#)) se presenta como la contribución más notable, al aplicar la práctica totalidad del contenido teórico detallado en los capítulos previos a dicho capítulo 5 (ver conexiones del bloque en el diagrama de la [Figura 1.2](#)).



**Figura 1.2.** Estructura general, detallando para cada tema su localización dentro del documento y las publicaciones asociadas

- **Capítulo 1. Introducción**

El actual capítulo tiene por objetivo presentar las aplicaciones asociadas al procesado de materiales ópticos, con especial interés en la fibra óptica. Tras detallar las ventajas que se derivan de la utilización de pulsos ultra-cortos para acometer esta tarea, se indican los objetivos del trabajo y las publicaciones que se han derivado a partir del mismo.

- **Capítulo 2. Fundamentos de procesado de materiales transparentes**

El segundo capítulo incluye un repaso exhaustivo de los efectos que tienen lugar cuando interaccionan pulsos láser ultra-cortos con materiales transparentes. Adicionalmente, se aborda la influencia de los parámetros de exposición del láser sobre los cambios inducidos en el material. De esta forma, se extraen una serie de consideraciones prácticas de cara al desarrollo de microestructuras en fibra óptica.

- **Capítulo 3. Setup y técnicas de caracterización**

El capítulo 3 comprende la exposición del setup experimental con el que se trabaja, indicando las propiedades de la fuente láser y elementos auxiliares. Asimismo, se explicarán brevemente los fundamentos de dos técnicas de caracterización empleadas, como son la microscopía de contraste de fase (**QPM**, *Quantitative Phase Microscopy*) y la técnica de medida por campo cercano refractado (**RNF**, *Refracted Near Field*). Finalmente, centrando la atención en el procesado *in-fiber*, se detallarán teórica y experimentalmente las ventajas del empleo de óptica adaptativa.

- **Capítulo 4. Inscripciones estándar**

Con objeto de entender el comportamiento de los sensores fabricados en el capítulo 5, se presentan en este las propiedades y fundamentos de las estructuras ópticas utilizadas: FBG, interferómetro de Mach-Zehnder (**MZI**, *Mach-Zehnder Interferometer*), y guía de onda. Para las tres estructuras, se presentan también técnicas y formas de acometer su fabricación con láseres.

- **Capítulo 5. Sensores *in-fiber***

Se trata de un capítulo de contenido puramente experimental, englobando las principales contribuciones del trabajo. Incluye 3 secciones, cada una de ellas asociada al estudio y fabricación de diferentes sensores en fibra óptica: la primera engloba el análisis del comportamiento de FBGs en alta temperatura, la segunda el desarrollo de un sensor de curvatura bidimensional en una fibra *multicore* de cuatro núcleos, y la tercera comprende el grabado de un MZI híbrido (con un FBG en el núcleo) de forma que permita el sensado de múltiples parámetros, incluso simultáneamente.

- **Capítulo 6. Conclusiones y líneas futuras**

El capítulo final contiene las conclusiones principales del trabajo realizado, así como los aspectos esenciales a abordar de cara al futuro, ya sea en base a posibles mejoras del setup experimental, o bien como potenciales líneas de investigación.

# 2

## Fundamentos de procesamiento de materiales transparentes

---

<b>2.1 Interacción láser-material</b> . . . . .	<b>7</b>
2.1.1 Formación del plasma de electrones libres . . . . .	7
2.1.2 Relajación y modificación . . . . .	11
2.1.3 Interacción multipulso . . . . .	15
2.1.4 Síntesis temporal de fenómenos físicos . . . . .	16
<b>2.2 Parámetros de exposición en el procesamiento láser</b> . . . . .	<b>17</b>
2.2.1 Enfoque . . . . .	17
2.2.2 Consideraciones prácticas para el grabado láser . . . . .	21

---

Los pulsos derivados de un láser de femtosegundo incidentes sobre la superficie de un material transparente son absorbidos por dicho material mediante efectos no lineales<sup>1</sup>, causando modificaciones estructurales permanentes en dimensiones del orden de  $\mu\text{m}$ . Este es el principio fundamental sobre el que se basa el micromecanizado de materiales transparentes mediante el empleo de láseres de femtosegundo. Si bien la energía de pulso resulta un parámetro esencial en el cambio de la morfología del material, también son importantes la polarización, duración del pulso, profundidad, condición de focalización, frecuencia de repetición o velocidad de *scanning*; parámetros que se evaluarán a lo largo del capítulo. Cabe destacar que, a diferencia de la litografía tradicional<sup>2</sup>, se pueden formar regiones 3D con variaciones en el índice de refracción mediante movimientos controlados del volumen focal del láser. La fabricación de este tipo de estructuras tridimensionales se debe, fundamentalmente, a que la absorción no lineal se limita espacialmente al volumen focal del láser.

---

<sup>1</sup>Este hecho ya fue demostrado en 1996 mediante pulsos focalizados sobre cristal transparente, lo cual ocasionaba un incremento en el índice de refracción [6].

<sup>2</sup>Permite la fabricación de dispositivos en el plano (2D).

El objetivo del presente capítulo es presentar los fundamentos físicos relacionados con el procesamiento de materiales ópticos con láseres de femtosegundo. Primeramente, en la [Sección 2.1](#), se abordarán los efectos que tienen lugar a nivel atómico cuando interactúan los pulsos láser con el material. Es importante atender a la reestructuración molecular que tiene lugar, con los diferentes tipos de modificación del material que se pueden presentar, ya que en el [Capítulo 5](#) las inscripciones que se realizarán serán clasificadas dentro de un tipo de modificación.

Por su parte, la [Sección 2.2](#) acomete, desde un punto de vista más práctico, la influencia que tienen los distintos parámetros de exposición del láser en el grabado. Para abordar el enfoque de los pulsos láser, se introduce la óptica gaussiana, y a partir de la aproximación paraxial, se deduce un factor de corrección que se utilizará en el proceso de inscripción de los sensores en fibra óptica. Asimismo, se indican algunas consideraciones prácticas en lo que respecta a los parámetros del láser.

## 2.1. Interacción láser-material

Los láseres de femtosegundo comerciales que se pueden encontrar hoy en día pueden generar pulsos con intensidades de pico del orden de  $10 \text{ TW/cm}^2$ . Es este hecho el que induce la modificación de zonas localizadas del material (mediante la deposición de dicha energía de pulso) como consecuencia de la fuerte absorción no lineal [7]. Si bien el desarrollo físico completo del modelo asociado al proceso de transferencia de energía de los electrones excitados por el láser a las moléculas que forman el material resulta realmente complejo, este se puede subdividir en dos etapas que, pese a estar interrelacionadas de forma implícita, pueden ser desglosadas de forma independiente:

- (1) Formación del plasma de electrones libres ([Subsección 2.1.1](#))
- (2) Relajación y modificación del material ([Subsección 2.1.2](#))

Ambas etapas se desarrollarán de acuerdo a una interacción monopulso, esto es, con la incidencia de un único pulso sobre el material, lo cual servirá de base para realizar la extensión lógica a la interacción de múltiples pulsos en la [Subsección 2.1.3](#).

### 2.1.1. Formación del plasma de electrones libres

En primer lugar, es importante destacar que los pulsos del láser de femtosegundo, con longitudes de onda en el rango visible o infrarrojo cercano, contienen fotones cuya energía es insuficiente para que sean absorbidos de forma **lineal** por vidrios y demás materiales (no hay transiciones electrónicas permitidas para dicha energía). Consecuentemente, los electrones de valencia promueven a la banda de conducción mediante fotoionización<sup>1</sup> **no lineal**, pudiendo ser ocasionada bien por efecto de ionización multifotónica, bien por ionización por efecto túnel [8], o mediante la combinación de ambas.

---

<sup>1</sup>Proceso físico mediante el cual se forma un ión al interactuar un fotón con un átomo o molécula.

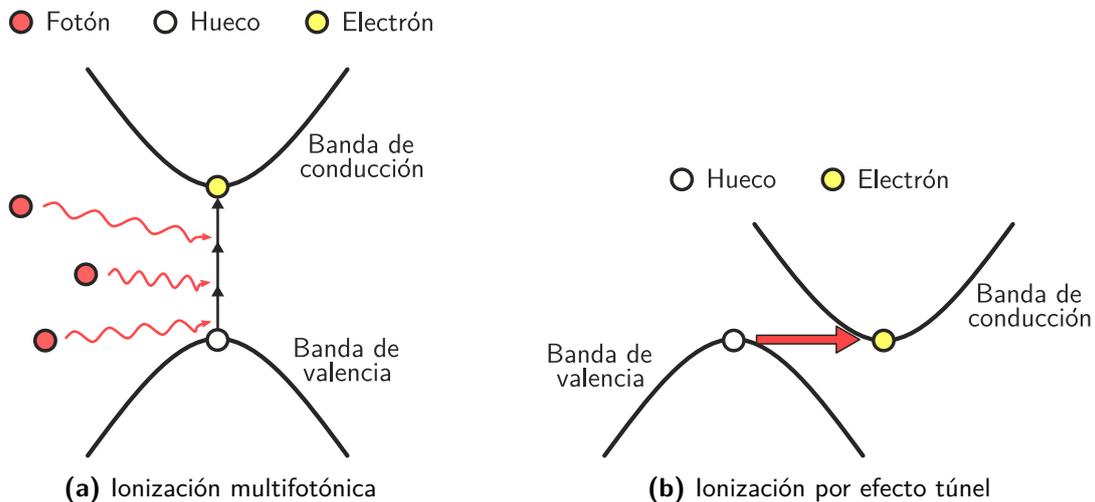
Si la fotoionización no lineal es el único proceso de absorción, la intensidad *threshold* para la ruptura óptica ( $I_{th}$ ) puede variar notablemente con la energía de la banda prohibida. Sin embargo, la fotoionización por avalancha se encuentra también presente en el proceso, dependiendo únicamente de forma lineal con la intensidad del láser. Puesto que esta última es dominante, la variación de  $I_{th}$  con la energía de banda prohibida se puede considerar despreciable [2]. Debido a la práctica independencia de la energía de banda prohibida, la microfabricación con láser de femtosegundo se puede aplicar a multitud de materiales. Seguidamente se describen tanto la fotoionización no lineal, como la fotoionización por avalancha.

### Fotoionización no lineal

En este punto, se describen los efectos no lineales asociados a la fotoionización, como son la ionización multifotónica y la ionización por efecto túnel. La ionización multifotónica comprende la absorción simultánea de múltiples fotones por un electrón en la banda de valencia, el cual promociona a la banda de conducción (dejando un hueco en la banda de valencia) (Figura 2.1a). El número de fotones ( $n_p$ ) necesarios para promocionar un electrón a la banda de conducción es tal que se ha de cumplir la siguiente condición:

$$n_p h \frac{c}{\lambda} \geq E_{gap}.$$

Dicha condición indica que la energía asociada a la combinación de fotones<sup>1</sup> ha de ser superior a la energía de la banda prohibida ( $E_{gap}$ ). Este mecanismo de fotoionización es el dominante para intensidades de láser reducidas y frecuencias del mismo elevadas<sup>2</sup>.



**Figura 2.1.** Efectos no lineales derivados de la fotoionización

Por otra parte, si la intensidad del láser es alta y la frecuencia reducida, el mecanismo de fotoionización no lineal dominante es el asociado al efecto túnel. El fuerte campo distorsiona

<sup>1</sup>La energía de un fotón viene dada por la Relación de *Planck-Einstein*:  $E_{fotón} = h \frac{c}{\lambda}$ , donde  $h$  hace referencia a la constante de *Planck*,  $c$  a la velocidad de la luz, y  $\lambda$  a la longitud de onda del fotón.

<sup>2</sup>Destacar que la frecuencia ha de estar necesariamente por debajo de la conocida como frecuencia umbral, derivada del efecto fotoeléctrico, ya que en caso contrario cada fotón es absorbido de forma individual, originando la promoción de un electrón en banda de conducción (ionización monofotónica).

la estructura de bandas, reduciendo el potencial de barrera entre valencia y conducción. En consecuencia, se tienen transiciones directas banda a banda, lo cual se conoce como efecto túnel (Figura 2.1b).

Ambos procesos asociados a la fotoionización no lineal (ionización multifotónica y efecto túnel) están relacionados a partir del parámetro de *Keldysh* [9]:

$$\gamma = \frac{f}{e} \sqrt{\frac{m_e c n \epsilon_0 E_{gap}}{I}},$$

siendo  $f$  la frecuencia del láser,  $I$  la intensidad focal del pulso,  $m_e$  la masa efectiva del electrón,  $e$  la carga fundamental del electrón,  $c$  la velocidad de la luz,  $n$  el índice de refracción, y  $\epsilon_0$  la permitividad en el espacio libre. En función del valor de  $\gamma$  resultan tres posibles casos:

- $\gamma \gg 1.5 \rightarrow$  el mecanismo dominante es la ionización multifotónica.
- $\gamma \ll 1.5 \rightarrow$  el mecanismo dominante es la ionización por efecto túnel.
- $\gamma \sim 1.5 \rightarrow$  la fotoionización es una combinación tanto de la ionización por múltiples fotones, como del efecto túnel<sup>1</sup>.

### Fotoionización por avalancha

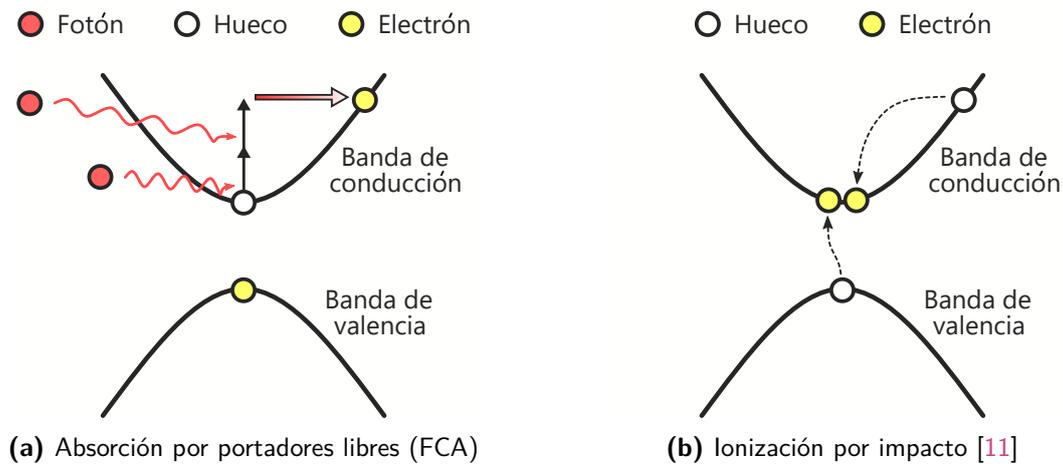
Antes de exponer la fotoionización por avalancha, es importante desarrollar el concepto de absorción por portadores libres (FCA, *Free Carrier Absorption*). Dicho proceso ocurre cuando un material absorbe un fotón, y un portador (electrón o hueco) es excitado de un estado a otro<sup>2</sup>, dentro de la misma banda (con posibilidad de estar en diferente subbanda).

La fotoionización por avalancha se da cuando los electrones presentes en la banda de conducción absorben fotones por el mecanismo FCA descrito. Tras la absorción secuencial de diversos fotones, la nueva energía del electrón en banda de conducción puede exceder la energía mínima de banda de conducción una cantidad superior a la energía de banda prohibida (Figura 2.2a). En este punto, dicho electrón puede ionizar por impacto un electrón de la banda de valencia, resultando en dos electrones en banda de conducción, con energía mínima (Figura 2.2b). Estos dos electrones pueden a su vez absorber nuevamente fotones mediante FCA, e ionizar electrones de la banda de valencia, originando un crecimiento exponencial del número de electrones en banda de conducción, generando un efecto avalancha que se mantiene mientras el campo del láser tenga la fuerza suficiente [10].

No obstante, la ionización por avalancha requiere inicialmente de un determinado número de electrones en banda de conducción, lo cuales pueden ser provistos por impurezas excitadas térmicamente, o mediante alguno de los procesos estudiados en la fotoionización no lineal (absorción multifotónica y/o efecto túnel). Cabe destacar que, para pulsos de duración inferior al picosegundo, el proceso de absorción ocurre a una velocidad superior a la transferencia de energía a la red molecular del material, siendo posible, por tanto, el desacople de ambos procesos.

<sup>1</sup>Típicamente, los láseres y materiales empleados presentan  $\gamma \sim 1$ , siendo la fotoionización no lineal una combinación de los dos procesos mencionados [8].

<sup>2</sup>Cabe destacar que el portador ya se encuentra en un estado previamente excitado (electrón en banda de conducción o hueco en banda de valencia), por lo que la absorción no es interbanda, sino intrabanda.



**Figura 2.2.** Fotoionización por avalancha

Si se tiene un determinado número de electrones en banda de conducción dispuestos por fotoionización no lineal, la densidad de dichos portadores se incrementará mediante fotoionización por avalancha hasta que la frecuencia de plasma<sup>1</sup> se aproxime a la frecuencia del láser, momento en el cual el plasma se convierte en fuertemente absorbente (*overdense*). La densidad de electrones existente cuando la frecuencia de plasma iguala la frecuencia del láser se conoce como densidad crítica de electrones libres<sup>2</sup>. Con dicha densidad de portadores en conducción, sólo un ínfimo porcentaje de la luz del láser es reflejada por el plasma, siendo por tanto, en su mayoría, absorbida mediante FCA [8]. A partir de ese punto, las modificaciones en el material empiezan a estar presentes de forma significativa.

En definitiva, el hecho de que se utilicen láseres de corta duración de pulso para el micro-mecanizado de materiales, cuyas diferencias frente a pulsos de larga duración se mostraron esquemáticamente en la [Figura 1.1](#) de la Introducción, viene cimentado en tres factores que se derivan de lo expuesto:

- Los pulsos cortos necesitan menor energía para alcanzar la intensidad de ruptura óptica ( $I_{th}$ ) y, por tanto, la densidad crítica de electrones libres.
- Procesos de absorción y transferencia de energía desacoplados → el tiempo de transferencia de energía es del orden de 10 ps, por lo que la energía absorbida es transferida al material tiempo después de que haya finalizado el pulso del láser<sup>3</sup> (para láseres de pulsos subpicosegundo).
- Debido a la utilización de láseres de femtosegundo es posible inducir fotoionización no lineal mediante efecto avalancha, lo cual redundará en una ruptura óptica determinista<sup>4</sup>.

<sup>1</sup>Sea un plasma en equilibrio y sin densidades de carga en el que se introduce un ligero desplazamiento de los electrones en una dirección. Estos son atraídos por los iones en la dirección opuesta, desplazándose y comenzando a oscilar en torno a la posición original de equilibrio. Dicha frecuencia de oscilación es lo que se conoce como frecuencia de plasma.

<sup>2</sup>Se considera que la ruptura óptica ocurre cuando se alcanza la densidad crítica de electrones libres.

<sup>3</sup>En la [Subsección 2.1.4](#) se muestra la escala temporal de los fenómenos físicos asociados al pulso láser, siendo la primera etapa la excitación de portadores comentada en la presente sección.

<sup>4</sup>Mediante pulsos más largos (por encima del picosegundo), la baja concentración de portadores en conducción hace que la ruptura óptica sea definida probabilísticamente, y no de forma determinista.

En el marco del presente trabajo, en el que láser empleado presenta una anchura temporal de pulso de 370 fs y se va a trabajar en fibra óptica ( $\text{SiO}_2$ ), cabe destacar que la fotoionización no lineal puede generar suficiente densidad de plasma como para causar daño en el material (aunque la ionización por avalancha incrementa el efecto) [12].

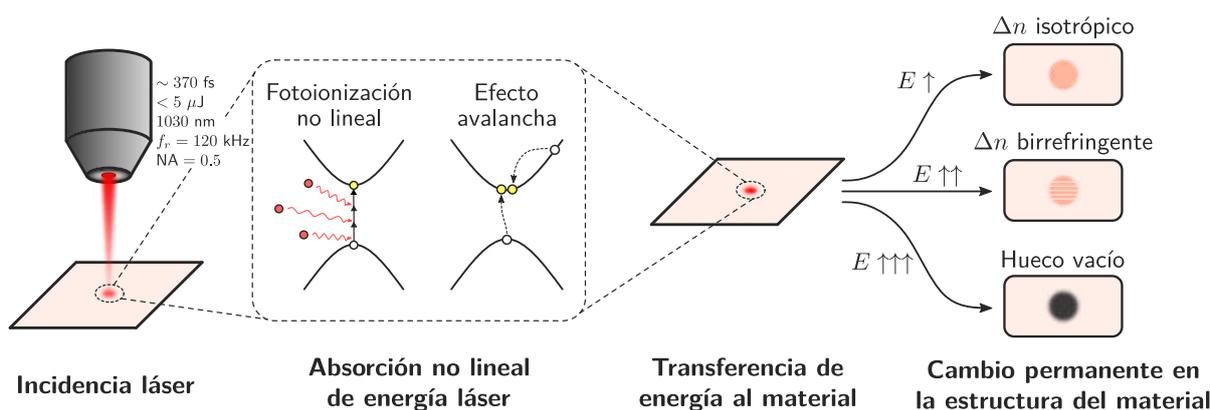
### 2.1.2. Relajación y modificación

Como se deduce del desarrollo previo, la fotoionización no lineal y el efecto avalancha derivados de la absorción de pulsos de láseres de femtosegundo son los principales responsables de la creación de plasma de electrones libres. No obstante, una vez los electrones han transferido su energía al material, los mecanismos físicos que desencadenan las modificaciones en la estructura molecular del material no están conocidos con exactitud en la actualidad.

Sin embargo, a partir de los múltiples estudios que se han publicado acerca de los cambios morfológicos que se pueden observar, estos se pueden dividir fundamentalmente en tres tipos, claramente diferenciados:

- **Tipo I** → cambio suave en el índice de refracción [13].
- **Tipo II**<sup>1</sup> → modificación del índice de refracción birrefringente [14, 15].
- **Tipo III** → microexplosiones que derivan en un agujero o abertura en el material [16].

Los cambios morfológicos dependen tanto de los parámetros del láser (energía de pulso, duración de pulso, frecuencia de repetición, longitud de onda, polarización, velocidad de *scanning*) como de las propiedades del material (energía de banda prohibida, conductividad térmica). No obstante, en  $\text{SiO}_2$ , que es el material sobre el que se desarrolla el micromecanizado en el presente trabajo, los tres tipos de cambios en la morfología se pueden observar únicamente variando la energía incidente del láser (Subsección 2.2.2).



**Figura 2.3.** Cambios morfológicos en  $\text{SiO}_2$  derivados del empleo de láseres de femtosegundo [17]

<sup>1</sup>Si bien esta sección (*Relajación y modificación*) y la previa (*Formación de plasma y electrones libres*) se desarrollan bajo una interacción monopulso con objeto de limitar su complejidad, cambios estructurales de Tipo II necesitan indispensablemente la interacción de 2 o más pulsos.

Como se puede observar en la [Figura 2.3](#), el proceso de modificación estructural del material comprende cuatro etapas que se suceden de forma secuencial:

- (1) Incidencia del láser sobre la superficie del material sobre el que se desea realizar una modificación en su estructura interna. En la [Subsección 3.1.1](#) se describe de forma exhaustiva el láser empleado, correspondiente al modelo FLCPA-03U-20 de la serie *Cazadero* de *Calmar Laser*.
- (2) Absorción mediante efectos no lineales de la energía asociada a los pulsos del láser, generando un plasma de electrones libres mediante fotoionización no lineal (ionización multifotónica y/o por efecto túnel) y fotoionización por avalancha, como ya se ha descrito previamente.
- (3) El plasma generado transfiere su energía a la estructura molecular en  $\sim 10$  ps, generando un cambio permanente en el material.
- (4) Modificación estructural permanente en el material, pudiendo ser de tres tipos en función de la energía incidente ([Tabla 2.1](#)), los cuales se detallan a continuación.

**Tabla 2.1.** Tipos de modificación en el material [17]

Tipo	Energía	Resultado	Mecanismo
Tipo I	● ○ ○	Cambio en el índice de refracción isotrópico	Fusión
Tipo II <sup>a</sup>	● ● ○	Cambio en el índice de refracción birrefringente	<i>Nanograting</i>
Tipo III	● ● ●	Hueco o agujero vacío	Micro-explosión

<sup>a</sup> Si bien esta sección y la previa se desarrollan bajo una interacción monopulso con objeto de limitar su complejidad, cambios estructurales de Tipo II necesitan indispensablemente la interacción de 2 o más pulsos.

### Tipo I – Cambio suave en el índice de refracción (isotrópico)

Resulta obvio que, en guías de onda ópticas, como las que se fabricarán posteriormente, se procura la obtención de modificaciones isotrópicas en su estructura, en tanto en cuanto cambios suaves y uniformes en su índice de refracción resultan óptimos para una propagación con escasa atenuación. Esto se observa para una energía de pulso reducida, siempre por encima del umbral correspondiente<sup>1</sup> ( $T1$ ).

El cambio en el índice de refracción está asociado con un incremento en la temperatura ficticia ( $T_f$ ), parámetro que cuantifica el desorden molecular de una estructura cristalina. De esta forma, se deduce de forma lógica que la estructura interna de un material es fuertemente dependiente de su historial térmico.

<sup>1</sup>La energía de pulso umbral depende de múltiples factores, como pueden ser las propiedades del láser o el material empleado, entre otros.

A partir de la curva de transición del volumen frente a la temperatura del sílice<sup>1</sup> (Figura 2.4), se puede observar que, en la zona de trabajo del láser, el enfriamiento rápido del vidrio fundido en el volumen focal una vez se ha transferido la energía asociada al pulso láser, ocasiona un aumento en la temperatura ficticia [18]. Este incremento implica una reducción en el volumen y, por tanto, una densificación del material. En consecuencia, el índice de refracción aumenta<sup>2</sup> [19]. Se ha demostrado igualmente que las ondas de choque generadas por los pulsos del láser de femtosegundo causan estrés en la material, dando lugar a la densificación recién mencionada.

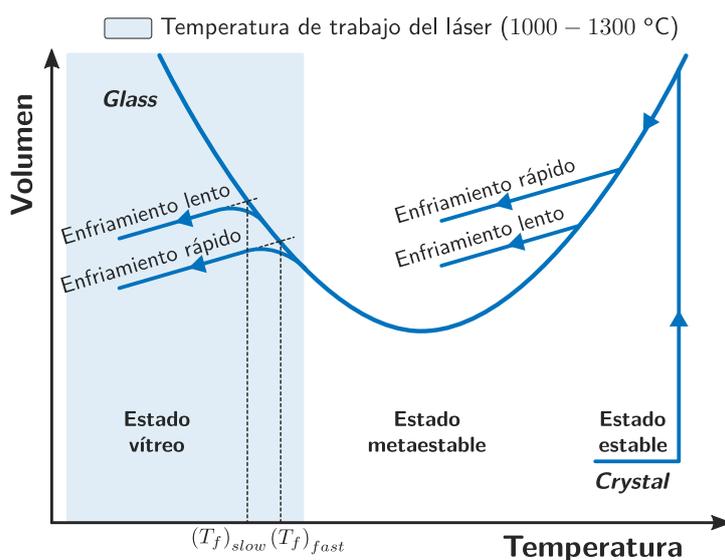


Figura 2.4. Curva de transición volumen-temperatura del sílice en estado vítreo

## Tipo II – Cambio en el índice de refracción birrefringente

En primer lugar, es conveniente desarrollar brevemente el concepto de birrefringencia, con objeto de comprender el posterior desarrollo asociado al cambio de Tipo II en un material.

La birrefringencia es una propiedad óptica que consiste en el desdoblamiento del rayo de luz incidente en dos rayos linealmente polarizados y perpendiculares entre sí<sup>3</sup>, por lo que, a efectos prácticos, el material presenta dos índices de refracción distintos. El rayo que toma la dirección dada por la Ley de Snell se denomina rayo ordinario, mientras que el otro se corresponde con el rayo extraordinario (Figura 2.5). El índice de refracción birrefringente se define como sigue:

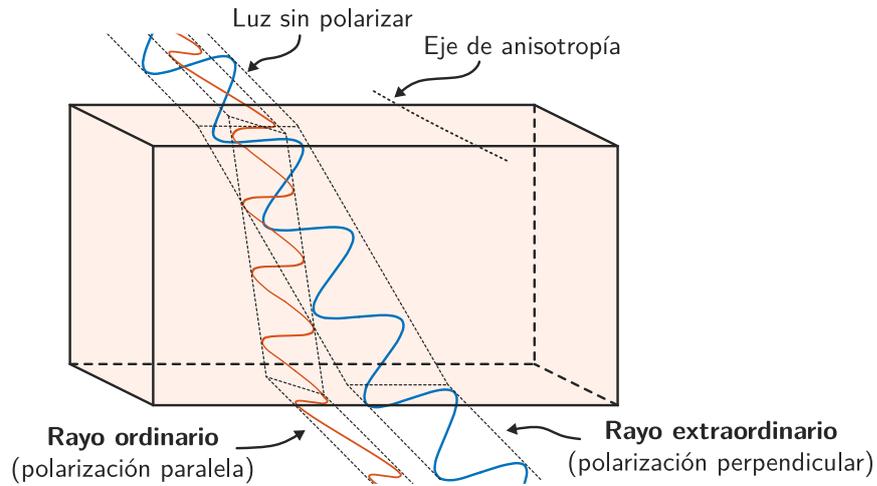
$$\Delta n = n_e - n_o, \quad (2.1)$$

siendo  $n_o$  y  $n_e$  los índices de refracción asociados al rayo ordinario (polarización paralela al eje de anisotropía) y extraordinario (polarización perpendicular al eje de anisotropía), respectivamente.

<sup>1</sup>Presenta un comportamiento anómalo en relación al vítreo común, cuya curva volumen-temperatura es monótona creciente.

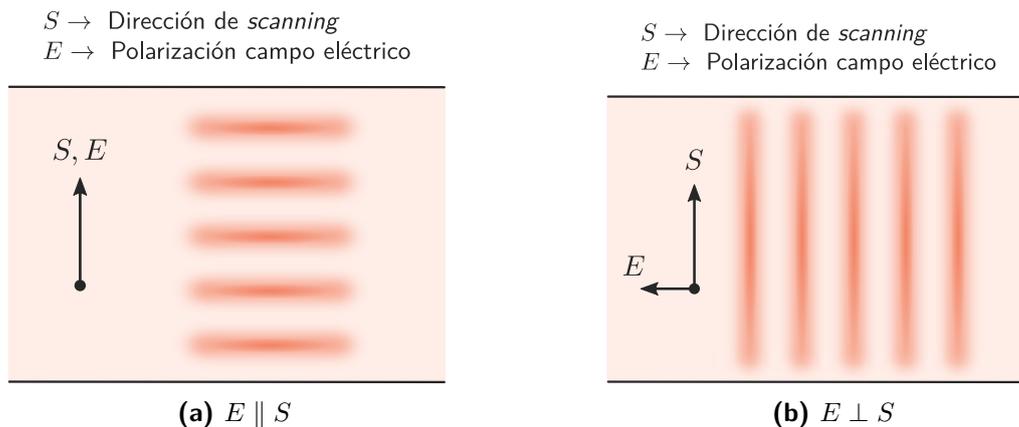
<sup>2</sup>Si bien hasta la fecha no existen evidencias notables, se considera que también existe una relación entre el cambio en el índice de refracción y la formación de centros de color, debido al cambio de absorción inducido.

<sup>3</sup>Este fenómeno únicamente puede darse si la estructura del material es anisótropa.



**Figura 2.5.** Rayos con polarización perpendicular atravesando un material birrefringente

En consonancia con lo descrito, es posible observar cambios en el índice de refracción birrefringente definido en la [Ecuación 2.1](#) cuando la energía de pulso se sitúa por encima del umbral correspondiente ( $T^2$ ) y se produce la interacción de dos o más pulsos. De acuerdo a diversos estudios [14], se considera que dicha birrefringencia se debe a las nanoestructuras periódicas causadas por la interferencia entre el campo originado por el láser y el plasma de electrones inducido. Numerosos estudios han confirmado que dichas nanoestructuras se corresponden con *nanogratings*<sup>1</sup>, cuyo periodo está relacionado con la longitud de onda de la fuente láser ( $\Lambda \approx \frac{\lambda}{2n}$ ). Asimismo, como se puede observar en la [Figura 2.6](#), la orientación de los *nanogratings* es perpendicular a la polarización (lineal) del campo eléctrico generado por el láser. Cabe destacar que, debido a la mayor profundidad que alcanzan los *nanogratings* cuando estos son paralelos a la dirección de *scanning*:  $E \perp S$  ([Figura 2.6b](#)), este mecanismo puede aplicarse en aplicaciones microfluídicas.



**Figura 2.6.** Esquema de *nanogratings* generados (Tipo II) en función de la polarización del campo eléctrico

<sup>1</sup>Estructura con una variación periódica del índice de refracción. Desarrollado exhaustivamente en la [Sección 4.1](#).

### Tipo III – Abertura en el material

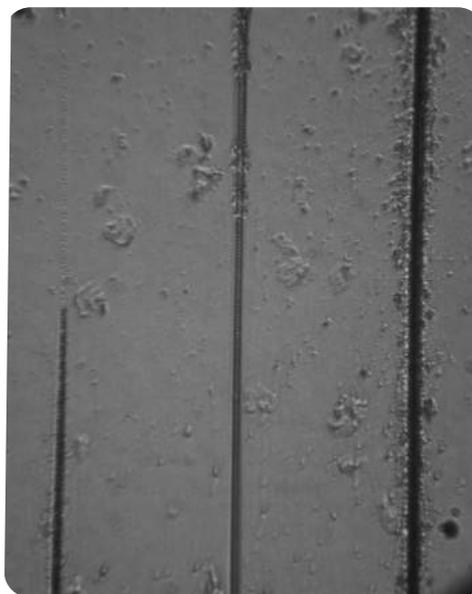
Finalmente, si la energía de pulso está por encima del umbral asociado al presente tipo de modificación estructural ( $T3$ ), es posible obtener aberturas en el material. Esto se debe a la intensidad de pico ( $\geq 10^{14}$  W/cm<sup>2</sup>) que ocasiona esta elevada energía, la cual origina una presión superior al límite elástico<sup>1</sup> dado por el módulo de *Young*, derivando en una onda de choque una vez se ha transferido la energía al material (tras  $\sim 10$  ps). Dicha onda de choque, a su vez, produce en el volumen focal una zona menos densa, o incluso vacía (hueco o agujero), rodeado de una zona más densa, con un mayor índice de refracción, debido a la conservación de masa. Si bien este tipo de modificación en el material puede tener aplicaciones, por ejemplo, en almacenamiento de memoria en 3D, resulta obvio que no es apropiado para guías de onda ópticas, por lo que no se trabajará con cambios de Tipo III en el presente trabajo.

### 2.1.3. Interacción multipulso

Todo lo descrito con anterioridad está asociado a los cambios inducidos en el material como consecuencia de la interacción de un único pulso del láser de femtosegundo<sup>2</sup>. No obstante, los fenómenos derivados de la emisión de múltiples pulsos (régimen normal del láser) se derivan de forma lógica [17].

En primer lugar, cabe destacar que si la frecuencia de repetición de pulsos (PRR, *Pulse Repetition Rate*) es inferior a 100 kHz, la difusión térmica se produce de forma previa a la llegada del siguiente pulso. En consecuencia, si bien el conjunto de pulsos contribuyen a la modificación general del material, estos actúan de forma independiente entre ellos.

Por el contrario, para altas tasas de repetición de pulsos ( $> 100$  kHz), el tiempo entre pulsos es inferior al proceso de difusión del calor, resultando, por tanto, en una acumulación de calor en el volumen focal. Para energías de pulso por encima del umbral  $T1$ , el material alrededor del foco se funde, y conforme aumenta el número de pulsos absorbidos, se incrementa el volumen fundido de material, hasta el punto en que se retira la emisión láser, momento en el cual se produce un enfriamiento rápido que deriva en una estructura con el índice de refracción modificado, tal y como se razonó a partir de la temperatura ficticia.



**Figura 2.7.** Inscripciones realizadas con el láser de fs sobre una placa de silicio con PRR = 120 kHz (influencia térmica entre pulsos) y diferentes energías de pulso. Se observa un ablación evidente (Tipo III) en la línea derecha.

<sup>1</sup>Tensión máxima que un material puede soportar sin sufrir deformaciones permanentes.

<sup>2</sup>Se acentúa nuevamente que, si bien tanto los cambios de Tipo I y Tipo III pueden darse con un único pulso, el Tipo II necesita la interacción de 2 o más.

El tamaño de dicho volumen fundido puede ser controlado a partir del número efectivo de pulsos  $N$ :

$$N = \frac{2w_0 \cdot f}{v},$$

siendo  $v$  la velocidad de *scanning* (*writing speed*),  $f$  la frecuencia de repetición de pulsos (PRR), y  $2w_0$  el diámetro del punto focal<sup>1</sup> (intensidad cae  $1/e^2$ ) (Figura 2.8). Es fácilmente deducible que un aumento en el PRR (mayor influencia térmica entre pulsos) o en la energía de pulso ( $w_0 \propto E_p$ ) implica una mayor modificación del material.

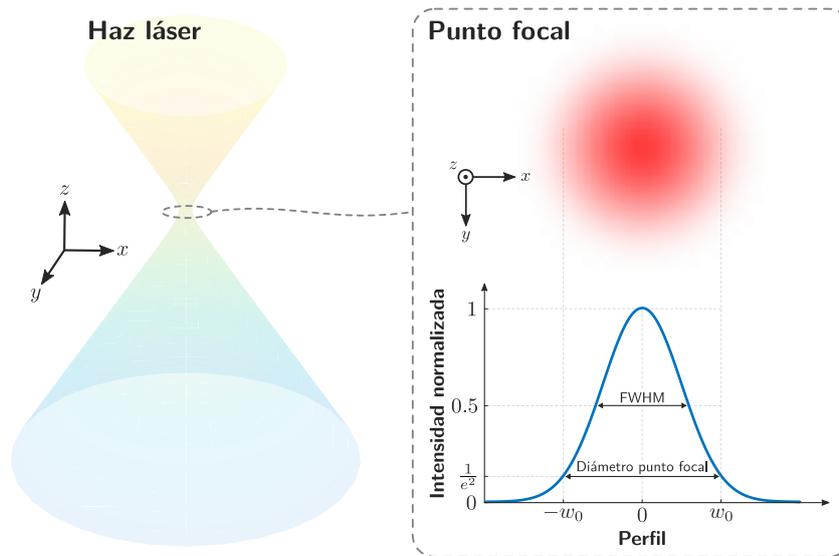


Figura 2.8. Sección transversal del haz gaussiano en el punto focal

### 2.1.4. Síntesis temporal de fenómenos físicos

En resumen, la Figura 2.9 muestra de forma gráfica la escala temporal de los fenómenos físicos asociados a la interacción de pulsos láser con materiales transparentes. Es importante atender al hecho de que, si bien la absorción de luz se produce en una escala temporal del orden de fs, el material puede experimentar cambios incluso  $\mu s$  más tarde.

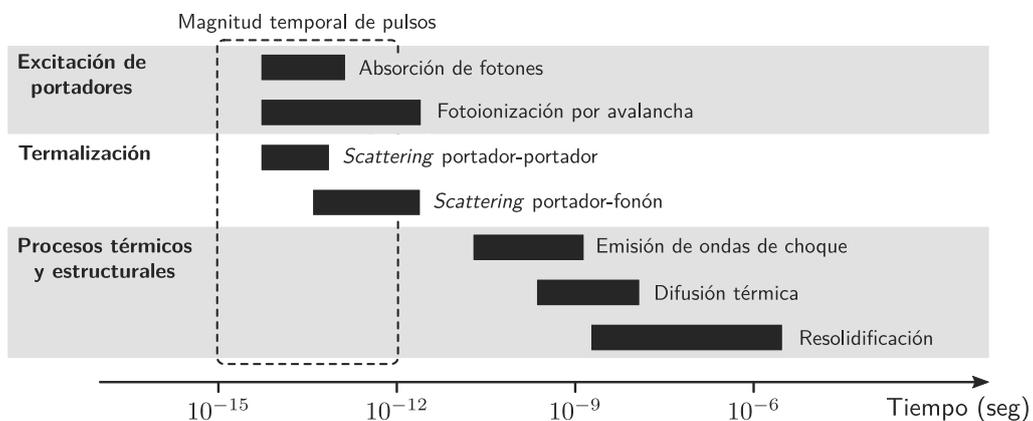


Figura 2.9. Escala temporal de fenómenos físicos asociados a pulsos de láser de femto [2]

<sup>1</sup>Estos conceptos son desarrollados exhaustivamente en la siguiente sección.

Se puede observar que parte de la energía óptica absorbida por los electrones es transferida a la estructura molecular en un tiempo del orden de ps ( $\sim 10$  ps). En escasos ns se genera, típicamente, una onda de choque que se separa del volumen focal, a alta temperatura. Esto desencadena, en la escala de  $\mu s$ , que la energía térmica se difunda fuera de dicho volumen focal, lo cual genera finalmente la modificación permanente del material en cuestión.

El tiempo de *scattering* electrón-fonón es del orden de 1 ps, por lo que los pulsos de duración inferior a 1 ps (pulsos subpicosegundo) son adecuados para aplicaciones de micro-mecanizado de materiales, ya que dichos pulsos terminan antes de que los electrones puedan excitar térmicamente un ión. En consecuencia, se minimiza de forma relevante la difusión de calor en el exterior del volumen focal, razón por la cual la precisión que se obtiene es notablemente superior.

## 2.2. Parámetros de exposición en el procesado láser

En la presente sección, se detallan los parámetros o variables más importantes asociados a la exposición del láser de femtosegundo para el procesado de materiales ópticos, haciendo especial énfasis sobre sustratos de vidrio. Se evaluarán parámetros relativos al enfoque a partir de la óptica gaussiana (bajo aproximación paraxial), considerando los efectos lineales y no lineales que se producen. Se muestra también la influencia del PRR sobre los parámetros del láser, y una serie de consideraciones prácticas que se utilizarán posteriormente a la hora de realizar inscripciones láser para la fabricación de estructuras ópticas.

### 2.2.1. Enfoque

Cabe destacar que existen múltiples factores que influyen en la propagación de los pulsos láser focalizados sobre materiales dieléctricos, los cuales alteran la distribución de energía sobre dicho volumen focal [20]. Estos factores se pueden desdoblar en efectos lineales y no lineales:

- Efectos lineales  $\rightarrow$  dispersión, difracción, aberración, etc.
- Efectos no lineales  $\rightarrow$  autoenfoque, desenfoque por plasma, reducción de energía (agotamiento), etc.

#### Propagación lineal

Los pulsos del láser de femtosegundo son focalizados a través de una lente convergente externa con objeto de conseguir un punto focal de reducidas dimensiones, favoreciendo así la absorción no lineal de dichos pulsos por el material. Por tanto, uno de los propósitos de dicha lente consiste en favorecer la convergencia de la luz en un punto focal único, eliminando así la aberración esférica propia de las lentes homónimas. Para ello, el setup experimental empleado presenta una lente asférica, que minimiza dicho efecto no deseado. No obstante, despreciando la aberración esférica y demás efectos no lineales, el perfil de intensidad óptica espacial del haz del láser de femtosegundo puede ser representado utilizando la óptica gaussiana (con aproximación paraxial), como se muestra seguidamente.

En primer lugar, cabe destacar que la variación del campo eléctrico que sigue un haz con distribución gaussiana viene dada por la siguiente ecuación<sup>1</sup>:

$$E(r) = E_0 \cdot e^{-\frac{r^2}{w_0^2}},$$

donde  $r$  se define como la distancia desde un punto espacial concreto al centro del haz, y  $w_0$ , conocido como “*waist radius*”, es el radio en el cual la amplitud del campo es  $1/e$  del valor axial (valor máximo).

Asimismo, la intensidad sigue igualmente una distribución gaussiana, lo cual coincide con la distribución asociada a la fuente de luz utilizada en el desarrollo del trabajo: el láser de femtosegundo.

$$I(r) = \eta E E^* = \eta E_0 E_0^* \cdot e^{-\frac{2r^2}{w_0^2}} = I_0 \cdot e^{-\frac{2r^2}{w_0^2}},$$

con  $I_0 = \eta E_0 E_0^*$ , y  $\eta$  la impedancia de onda en el espacio libre.

Como se detalló en la [Subsección 2.1.3](#), si  $w_0$  es el radio en el que el campo cae  $1/e$  (intensidad cae  $1/e^2$ ), se puede considerar  $2w_0$  como el valor asociado al diámetro del punto focal ([Figura 2.8](#)). Ahora bien, teniendo en cuenta que el “*waist radius*” define el radio mínimo que se puede focalizar sobre el dieléctrico (radio limitado por la difracción) ([Figura 2.10](#)), se deben considerar los factores que influyen en dicho valor.

$$w_0 = \frac{M^2 \lambda}{\pi \text{NA}}, \quad (2.2)$$

siendo  $M^2$  el factor de calidad del haz<sup>2</sup>, y NA la apertura numérica de la lente. Se puede deducir, de forma evidente, que aperturas numéricas elevadas redundan en un punto focal espacialmente más pequeño. La apertura numérica de la lente empleada en el setup es de valor 0.5.

A la hora de evaluar el perfil de intensidad óptica espacial, cabe destacar que la propagación de haces gaussianos a través de un sistema óptico se puede evaluar a partir de la óptica geométrica, conjuntamente con la aproximación paraxial<sup>3</sup>. De acuerdo a esto, la distribución transversal de la intensidad sigue siendo gaussiana en todos los puntos del sistema óptico ([Figura 2.10b](#)).

Si se genera un haz gaussiano de luz coherente y frente de onda plano en  $z = 0$ , el tamaño del haz y la curvatura del frente de onda varían con  $z$  como se muestra en la [Figura 2.10a](#). Se observa que, como se detalló previamente,  $w_0$  se corresponde con el mínimo radio que se puede focalizar sobre el material.

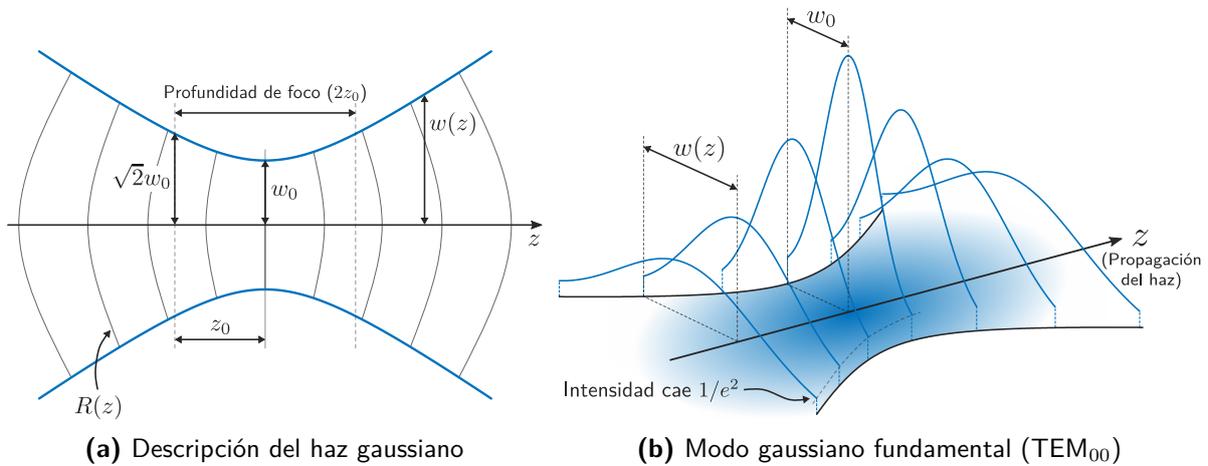
De igual manera, otro parámetro relevante es  $z_0$ , longitud de *Rayleigh* ( $\frac{1}{2}$  de la profundidad de foco), que diferencia el campo cercano ( $z < z_0$ ) y el campo lejano ( $z \gg z_0$ ). Se define como sigue:

$$z_0 = \frac{M^2 n \lambda}{\pi \text{NA}^2}. \quad (2.3)$$

<sup>1</sup>La transformada de *Fourier* de esta ecuación es igualmente una distribución gaussiana.

<sup>2</sup>Grado de variación de un haz respecto a un haz gaussiano ideal. El láser empleado presenta un  $M^2 < 1.1$ . Para un haz monomodo TEM<sub>00</sub> (haz gaussiano),  $M^2 = 1$ .

<sup>3</sup>Las trayectorias de los rayos de luz forman ángulos pequeños con el eje óptico. En consecuencia, las variaciones a lo largo del eje óptico (eje  $z$ ) son más lentas que las variaciones transversales.



**Figura 2.10.** Evolución de la intensidad asociada al haz gaussiano y la curvatura del frente de onda

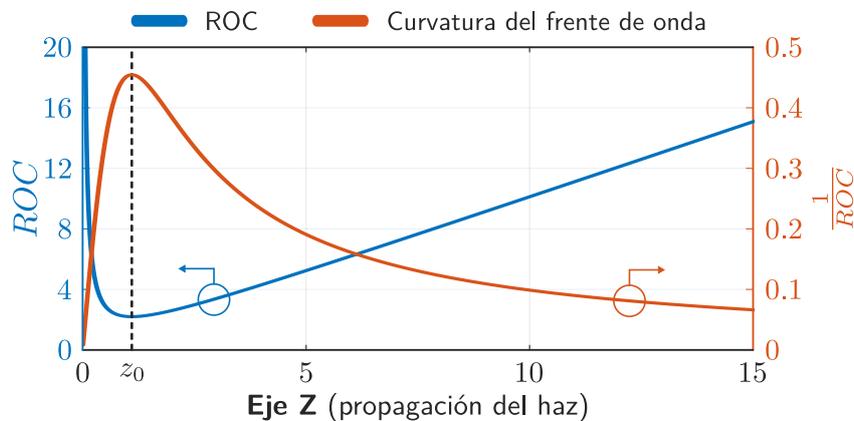
Teniendo en cuenta que el radio del haz en una posición arbitraria  $z$  es

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_0}\right)^2},$$

si  $z = \pm z_0$ , el radio del haz es  $w = \sqrt{2}w_0$  (Figura 2.10a), considerándose el haz como colimado entre ambos puntos (volumen focal). Asimismo, en dichos puntos es donde la curvatura del frente de onda es mayor, definiendo dicho concepto como el inverso del ROC (Radius Of Curvature), tomando este el siguiente valor:

$$ROC(z) = R(z) = z \left[ 1 + \left(\frac{z_0}{z}\right)^2 \right].$$

Conforme a esto, en  $z = 0$  ( $w = w_0$ ), la curvatura del frente de onda toma valor nulo ( $ROC = \infty$ ). La variación del ROC y la curvatura del frente de onda en función del eje  $Z$  puede observarse en la Figura 2.11 (para un valor  $z_0$  arbitrario).



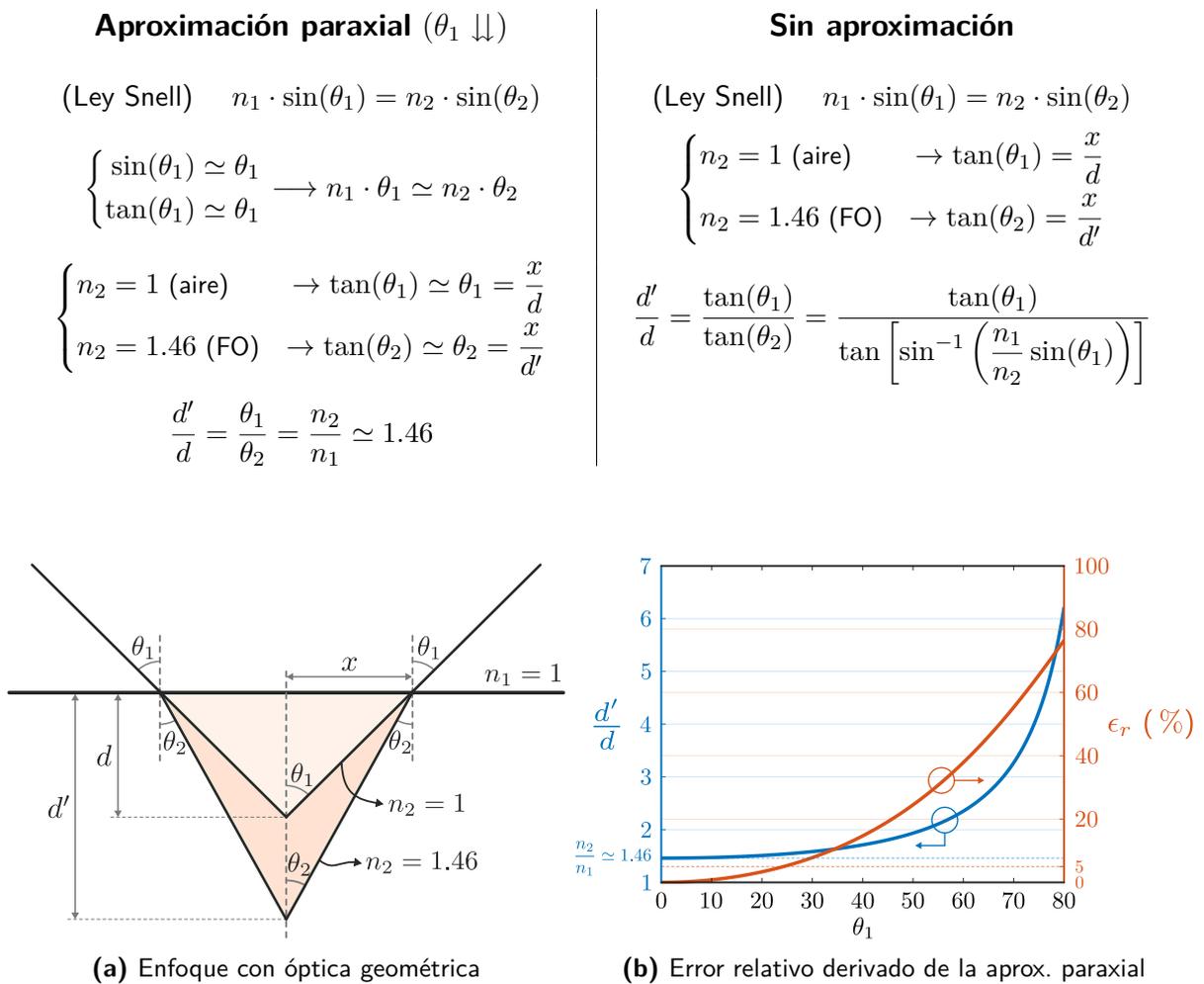
**Figura 2.11.** Variación del ROC y la curvatura del frente de onda según la propagación del haz (se toma  $z_0 = 1.1$  u.a.)

Por último, cabe destacar que lo desarrollado en este apartado únicamente es cierto ante la ausencia de efectos no lineales, ya que en presencia, por ejemplo, de aberración esférica y

cromática, existe una ligera desviación de la distribución de intensidad alrededor del foco, de forma que las expresiones dadas en la Ecuación 2.2 y 2.3 no serían válidas.

Como consideración práctica en el procesado láser, es importante atender al hecho de que, debido al cambio en el índice de refracción que sufre el haz láser al incidir sobre el material óptico (típicamente fibra óptica) desde el aire, resulta necesario realizar una corrección en lo que respecta a la profundidad del grabado (eje Z).

A continuación se detalla, empleando óptica geométrica, el error cometido al utilizar una aproximación paraxial. El esquema geométrico se muestra en la Figura 2.12a, mientras que el error relativo derivado de emplear la aproximación paraxial se observa en la Figura 2.12b.



**Figura 2.12.** Corrección en el enfoque en profundidad, y error cometido con aprox. paraxial

Fundamentalmente, se observa que, como consecuencia del cambio de índice de refracción entre el aire y la fibra óptica ( $n \simeq 1.46$ ), el cambio en la trayectoria de propagación de la luz ocasiona una variación del punto focal en el eje Z (profundidad de grabado) respecto a la situación en que no habría cambio de medio. De acuerdo a la Figura 2.12b, el error relativo cometido al utilizar la aproximación paraxial ( $d' = 1.46 \cdot d$ ) es inferior al 5% para ángulos incidentes inferiores a 24°, por lo que se empleará esta corrección ( $\frac{d}{d'} = \frac{1}{1.46}$ ) en los movimientos realizados en el eje Z durante el grabado láser en fibra.

## Propagación no lineal

En primer lugar, es conveniente indicar que el índice de refracción de un material se define de la siguiente forma:

$$n = n_0 + n_2 \cdot I, \quad (2.4)$$

siendo  $n_0 = \sqrt{1 + \chi^{(1)}}$  el índice de refracción lineal<sup>1</sup>,  $n_2 = \frac{3\chi^{(3)}}{4\epsilon_0cn_0^2}$  el índice de refracción no lineal, y finalmente  $I = \frac{1}{2}\epsilon_0n_0c|E|^2$  la intensidad del láser.

La intensidad espacialmente variable de un haz láser gaussiano posibilita la creación de índices de refracción también variables espacialmente en dieléctricos. Como  $n_2$  en la [Ecuación 2.4](#) suele ser positivo en la mayoría de materiales, la variación en el índice de refracción actúa como una lente que converge el haz en el dieléctrico con una fuerza dependiente de la potencia del láser.

No obstante, a medida que el haz se enfoca, se llega a un punto en el que la intensidad es suficiente para producir fotoionización no lineal, momento en el cuál se induce el plasma de electrones libres anteriormente desarrollado. Este actúa a su vez como una lente divergente, contrarrestando el efecto de enfoque anterior. La combinación apropiada de ambos fenómenos, autoenfoco y desenfoque por plasma, redonda en una propagación filamentosa que origina estructuras con una modificación axial del índice de refracción. Este tipo de propagación por filamentación (asociado a un Tipo II) [21], si bien no se emplea en el presente trabajo, puede ser utilizado para guiar luz debido al gran cambio generado en el índice de refracción a diferencia de lo que ocurre con las guías de onda de Tipo I ( $\Delta n$  más reducido).

### 2.2.2. Consideraciones prácticas para el grabado láser

Para finalizar, se introducen algunos aspectos prácticos para operar con el láser. La intensidad de campo eléctrico generada por el láser ( $I$ ) está determinada por tres parámetros: la duración del pulso del láser ( $\tau$ ), la energía del pulso ( $E_p$ ), y la apertura numérica (NA). La relación de la intensidad de campo eléctrico con estos tres parámetros es la siguiente:

$$I \propto \frac{E \cdot \text{NA}^2}{\tau \cdot \lambda^2(1 - \text{NA}^2)}.$$

Se ha demostrado empíricamente que la dependencia de la duración de pulso ( $\tau$ ) sobre la intensidad umbral de ruptura óptica ( $I_{th}$ ) es muy reducida, debido a la fotoionización por avalancha. Este hecho permite tener una mayor flexibilidad en la elección del láser.

Por otra parte, la apertura numérica (NA) determina el área focal en el material y, por tanto, la parte del mismo que presentará cambios estructurales. Además de alterar  $I$ , la NA también afecta a la geometría de la estructura resultante, de forma que para  $\text{NA} > 0.6$  el material presenta un cambio en su estructura simétricamente esférico. Puesto que en la configuración empleada se sitúa una lente con  $\text{NA} = 0.5$ , la estructura final se puede considerar ligeramente alargada. Sin embargo, se emplearán técnicas para conseguir dispositivos con estructuras simétricas, como la técnica multiscan, desarrollada en el [Capítulo 4](#).

<sup>1</sup> $\chi^{(i)}$  hace referencia al  $i$ -ésimo orden de susceptibilidad, tratándose de óptica lineal para  $i = 1$  y óptica no lineal para  $i \geq 2$ .

Ahora bien, en el presente trabajo, dado que tanto  $\tau$  como NA están fijados con un valor de 370 fs y 0.5, respectivamente<sup>1</sup>; el proceso de absorción depende fuertemente de la energía de pulso ( $E_p$ ), razón por la cual la modificación del material de acuerdo a tres tipos se ha considerado en función de este parámetro. Seguidamente, se indica el cambio de índice de refracción asociado a cada Tipo de modificación.

- Si  $E_p$  presenta un valor cercano a la energía umbral de pulso<sup>2</sup>, se induce un cambio en el índice de refracción localizado en el volumen focal, cuyo orden de magnitud es  $\sim 10^{-3}$ . No obstante, dicho cambio no es espacialmente homogéneo, siendo dependiente de procesos como estrés inducido, densificación, formación de centros de color, etc, que han sido mencionados anteriormente y que actualmente se encuentran bajo investigación. Se trata del Tipo I.
- Si  $E_p$  presenta un valor superior a la energía umbral de pulso, el tamaño del área afectada se incrementa, así como la energía del plasma inducido. A medida que la energía del plasma aumenta, se acentúa la repulsión de los iones de acuerdo a la fuerza de *Coulomb*, resultando en una modulación periódica birrefringente, con un cambio en el índice de refracción del orden de  $\sim 10^{-2}$ . Hace referencia al Tipo II.
- Si dicha energía del plasma aumenta aún más ( $E_p \uparrow\uparrow$ ), la repulsión de iones puede ser tal que origine una abertura en el material, tratándose así de un cambio de Tipo III.

### Influencia del PRR y otros parámetros

Como se mencionó en la [Subsección 2.1.3](#), referente a la interacción multipulso asociada a los láseres de femtosegundo, el control del PRR posibilita tener un cierto dominio de los procesos térmicos que tienen lugar en el material ([Figura 2.9](#)), con especial énfasis en la difusión térmica que se produce en la zona contigua al volumen focal.

Cuando no hay acumulación de calor en el volumen focal ( $\text{PRR} < 100$  kHz), la dependencia de la duración del pulso con las propiedades asociadas al material modificado se atribuyen a la propagación no lineal de dicho pulso [22], aspecto desarrollado previamente. Por su parte, cuando existe acumulación de calor ( $\text{PRR} > 100$  kHz), la duración del pulso juega un papel menos relevante en las propiedades de las estructuras creadas, debido a la simetría circular que infiere la difusión térmica.

Conforme a lo descrito, se ha demostrado que, mediante la utilización de láseres trabajando a 25 MHz, el tamaño de las estructuras formadas en el material se incrementa notablemente, debido a la fuerte acumulación de calor en el volumen focal [23]. Esta combinación de un alto régimen de repetición de pulsos con la acumulación de calor asociada, permite unas velocidades de *scanning* mayores.

El láser empleado presenta un PRR máximo de 120 kHz (regulable desde  $\sim 1$  Hz). De esta forma es posible la fabricación de estructuras que demandan un PRR alto ( $> 100$  kHz) y energías de pulso bajas ( $E_p \simeq 100$  nJ), como pueden ser las guías de onda; así como estructuras que requieren un PRR más reducido ( $\sim 1$  kHz) y altas energías de pulso ( $E_p > 0.5$   $\mu\text{J}$ ), como por ejemplo FBGs.

<sup>1</sup>Las características del láser y elementos auxiliares que conforman el setup se muestran en el próximo capítulo.

<sup>2</sup>Energía mínima requerida para generar los electrones “semilla” mediante fotoionización no lineal.

Adicionalmente, existen otros muchos parámetros de exposición que pueden inducir cambios en el material como consecuencia de la aplicación del láser de femtosegundo en alguna de sus configuraciones. De igual forma, considerando el  $\text{SiO}_2$  como material de trabajo, se muestran a continuación algunos de estos factores, con una breve explicación aclaratoria.

- Polarización

Además de la energía de pulso, las propiedades de las micro-estructuras generadas con el láser dependen fuertemente de la polarización de la luz incidente. Esto se debe a la birrefringencia generada a partir de los *nanogratings* que se forman dentro del volumen modificado por el láser. En el presente trabajo, no se realiza un control de la polarización.

- Dirección de grabado

Incluso con una distribución de intensidad simétrica existe una influencia en la dirección de grabado sobre el material [24]. Se ha demostrado que dicha dependencia se debe a una ligera inclinación frontal del pulso láser (*tilt*).

- Longitud de onda ( $\lambda$ )

En el caso del  $\text{SiO}_2$ , con elevada energía de banda prohibida (8.3 – 9.3 eV), es importante atender a la longitud de onda, en tanto en cuanto el segundo armónico<sup>1</sup> generado (*SHG*, *Second Harmonic Generation*) permite un mayor contraste en el índice de refracción. No obstante, el láser empleado en el trabajo opera con el tono fundamental<sup>2</sup> ( $\lambda = 1030$  nm).

---

<sup>1</sup>Proceso óptico de 2º orden mediante el cual pares de fotones interactúan en un cristal no lineal y generan fotones con energía igual a la suma de los dos fotones iniciales.

<sup>2</sup>La mayoría de setups experimentales de diversos grupos de investigación operan con el segundo armónico del láser, en longitudes de onda correspondientes al visible (típicamente verde).

# 3

## Setup y técnicas de caracterización

---

<b>3.1</b>	<b>Setup experimental</b>	<b>25</b>
3.1.1	Propiedades de la fuente láser y elementos auxiliares	25
3.1.2	Integración del sistema láser	27
<b>3.2</b>	<b>Configuraciones de grabado láser</b>	<b>28</b>
3.2.1	Aplicado a fibra óptica	30
<b>3.3</b>	<b>Técnicas de caracterización</b>	<b>32</b>
3.3.1	Refracted Near Field (RNF)	32
3.3.2	Quantitative Phase Microscopy (QPM)	33
<b>3.4</b>	<b>Compensación astigmática con óptica adaptativa</b>	<b>35</b>
3.4.1	Resultados de fase	38

---

Seguidamente, se aborda la exposición del setup utilizado para el grabado láser. La [Sección 3.1](#) detalla los elementos que componen el sistema óptico, con especial atención a la fuente láser, mostrando dónde se emplaza cada uno de ellos en el sistema completo.

La [Sección 3.2](#) detalla las distintas configuraciones que se presentan en el grabado láser de materiales ópticos en general, para posteriormente centrar la atención en la fibra óptica de forma específica. Sobre dicha fibra óptica, se indican las zonas donde se pueden realizar inscripciones láser de forma genérica, y los métodos empleados para ello.

Por su parte, la [Sección 3.3](#) presenta las técnicas empleadas para caracterizar los componentes ópticos inscritos. Se desarrollan brevemente los métodos QPM y RNF, utilizados para determinar cambios de fase *in-fiber* y cambios de índice de refracción en el *end-face* de la fibra, respectivamente.

Si bien el anterior capítulo se puede considerar íntegramente teórico<sup>1</sup>, la [Sección 3.4](#) contiene la primera gran contribución del trabajo, incorporada en un paper de conferencia internacional. Se presentan las mejoras desde el punto de vista de intensidad en el volumen focal derivadas de introducir una modificación en el setup (óptica adaptativa).

---

<sup>1</sup>Cabe destacar que presenta importantes consideraciones prácticas, como el factor de corrección empleado en el eje Z como consecuencia del cambio en el índice de refracción que sufre el pulso láser.

## 3.1. Setup experimental

En la presente sección se aborda de forma exhaustiva la configuración experimental utilizada para el micromecanizado de fibra óptica. De esta forma, bajo la correcta disposición de todos los elementos ópticos, se llevará a cabo en el [Capítulo 5](#) la fabricación de diferentes estructuras ópticas.

### 3.1.1. Propiedades de la fuente láser y elementos auxiliares

Si bien posteriormente se realizará la integración conjunta de los diferentes elementos ópticos, el setup se puede definir de forma sencilla y elemental como una fuente láser que, mediante una lente objetivo con una apertura numérica dada, es capaz de focalizar el haz de luz sobre la muestra<sup>1</sup>. En el desarrollo del trabajo, con la configuración empleada, la lente se mantiene fija, siendo la muestra la que realiza el movimiento durante el procesado, al estar situada sobre una plataforma que permite movimientos en tres dimensiones con escala nanométrica. Igualmente, con objeto de realizar una monitorización del material procesado en tiempo real, se ha dispuesto una cámara **CCD** (*Charge-Coupled Device*), que enfoca idealmente sobre la muestra<sup>2</sup>.

Conforme a esta introducción básica de la configuración empleada, se puede deducir que los elementos fundamentales de la misma son la fuente láser, la cámara CCD, la lente de enfoque del haz, así como la plataforma motorizada XYZ, por lo que seguidamente se realizará una breve descripción de sus especificaciones técnicas.

#### Fuente láser

La fuente de luz empleada para el post-procesado de materiales es un láser en fibra pulsado (**FLCPA**, *Fiber Laser Chirped Pulse Amplifier*) de la serie *Cazadero* de *Calmar Laser*, cuyo modelo es el FLCPA-03U-20. Dicho láser, de clase 4, permite generar pulsos de energía variable, así como modificar el PRR gracias a un controlador adicional. Los valores de frecuencia y energía de pulso pueden ser programados por software mediante una interfaz gráfica de usuario (**GUI**, *Graphical User Interface*) en el ordenador de control. Las funciones para el control del láser, así como las asociadas a la plataforma motorizada, han sido desarrolladas íntegramente en Matlab, por lo que las estructuras ópticas realizadas en este trabajo se han programado sobre dicho lenguaje.

A continuación se puede observar tanto una imagen física del láser ([Figura 3.1](#)), como sus especificaciones técnicas más relevantes ([Tabla 3.1](#)), siendo especialmente importantes la energía de pulso y el PRR de cara al posterior grabado láser.

---

<sup>1</sup>Debido a la presencia de un espejo dicróico, únicamente un 99% del haz incidente llega a la muestra, utilizándose el 1% restante como indicador de potencia.

<sup>2</sup>Como consecuencia del empleo de la cámara **CCD**, la configuración descrita permite no sólo el micromecanizado de materiales ópticos, sino también la disposición de un microscopio óptico de alta definición, debido al aumento que proporciona la lente. Esta utilidad es empleada en la técnica QPM ([Sección 3.3](#)).



Figura 3.1. Imagen FLCPA Cazadero

Tabla 3.1. Especificaciones FLCPA Cazadero

Parámetro	Valor
Energía de pulso ( $E_p$ )	$< 5 \mu\text{J}$
Longitud de onda ( $\lambda$ )	1030 nm
Anchura de pulso ( $\tau$ )	370 fs (medido)
PRR	120 kHz (variable)
Diámetro haz ( $1/e^2$ )	$< 3 \text{ mm}$
Factor de calidad ( $M^2$ )	$< 1.1$
Tª de operación	15 °C – 35 °C

### Elementos auxiliares – lente, motor y cámara

Por otra parte, la lente objetivo, el motor y la cámara CCD, a pesar de no poseer la importancia que presenta el láser, son imprescindibles en el setup. La lente se corresponde con el modelo M PLAN APO NIR 100X LWD de *Mitutoyo*, el motor con resolución nanométrica donde se colocan las muestras es el *Aerotech* FiberMaxHP Multi-Axis, mientras que la cámara CCD es la DMK 31AF03.AS de *Imaging Source*. Las especificaciones de dichos componentes se muestran en las Tablas 3.2, 3.3 y 3.4, respectivamente.

Tabla 3.2. Especificaciones lente *Mitutoyo*

Parámetro	Valor
Factor de magnificación	100×
NA	0.5
Distancia de trabajo (WD)	12 mm
Rango de $\lambda$ 's	480 – 1800 nm
Distancia focal	2 mm
Profundidad de campo	1.1 $\mu\text{m}$
Poder de resolución	0.6 $\mu\text{m}$

Tabla 3.3. Especificaciones motor *Aerotech*

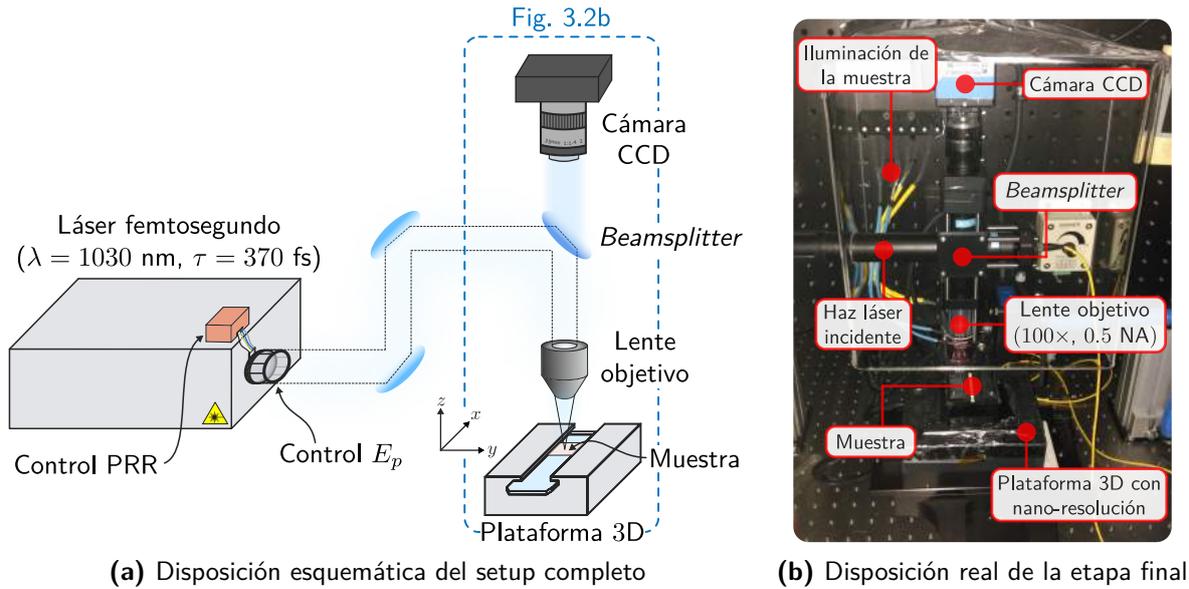
Parámetro	Valor
Ejes	3 (XYZ)
Movimiento	X,Y: 50 mm Z: 3 mm
Velocidad máx.	X: 400 mm/s Y: 200 mm/s Z: 75 mm/s
Resolución	2 nm
MTBF	30.000 horas

Tabla 3.4. Especificaciones cámara CCD

General	
Sensibilidad	0.05 lx
Rango dinámico	8 bits
Formato de vídeo	1024 × 768 (0.8 MP)
Frame rate	30 fps (variable)
Temperatura	-5 °C – 45 °C
Interfaz óptica	
Filtro IR	No
Sensor	CCD Sony ICX204AL
Formato	1/3 pulgadas
Montura de la lente	C/CS
Interfaz eléctrica	
Interfaz	FireWire 400
Ajustes	
Exposición obturador	$\frac{1}{10000}$ seg a 30 seg
Ganancia	0 dB a 36 dB

### 3.1.2. Integración del sistema láser

A continuación, en base a los dispositivos ópticos detallados, así como algún componente coadyuvante al procesado láser, se presenta el setup que, de forma genérica, se emplea para el post-procesado óptico con láser de femtosegundo. Dicho setup, implementado en el laboratorio, es el que se utilizará para la posterior fabricación de estructuras ópticas. La [Figura 3.2a](#) ofrece, de forma esquemática, una representación gráfica de lo descrito.



**Figura 3.2.** Setup experimental para el grabado con láser de femtosegundo

En primer lugar, la etapa inicial del setup está formada tanto por la fuente láser como por los diferentes controladores, los cuales permiten modificar algunas de las propiedades del haz, como puede ser la frecuencia de repetición de pulsos (PRR) o la energía de pulso ( $E_p$ ). El PRR es controlado a través de un *trigger* síncrono externo a la fuente láser, el cual permite bloquear  $n$  pulsos consecutivos, y transmitir 1, obteniendo así el siguiente PRR efectivo<sup>1</sup>:

$$\text{PRR} = \frac{\text{PRR}_{\text{laser}}}{n + 1} = \frac{120 \text{ kHz}}{n + 1}.$$

La energía de pulso ( $E_p$ ), por su parte, puede ser regulada mediante un obturador (*shutter*) externo con transmitancia regulable<sup>2</sup>, permitiendo obtener una  $E_p$  de hasta  $\sim 5 \mu\text{J}$ . También pueden ser controlados otros parámetros, como la polarización<sup>3</sup>. Si bien en el setup empleado no se controla de forma explícita la polarización del haz, en la inscripción de diversas estructuras la influencia de dicho parámetro puede llegar a ser importante, siendo el caso, por ejemplo, de los *nanogratings* detallados en la [Subsección 2.1.2](#).

Ahora bien, el haz láser generado es colimado con una divergencia tal que resulta inviable acometer el procesado de materiales, ya que presenta un nivel de irradiancia notablemente

<sup>1</sup>La posibilidad de controlar el PRR entre  $\sim 1 \text{ Hz}$  y  $120 \text{ kHz}$  posibilita inscribir FBGs mediante la técnica *PbP* de forma muy precisa. Sin embargo, no únicamente se permite el patrón  $n$  pulsos bloqueados y 1 transmitido, sino que de forma genérica es posible el bloqueo de  $n$  pulsos y la transmisión de  $m$ .

<sup>2</sup>Cabe destacar que la fuente láser en sí genera un haz con PRR y  $E_p$  fijos.

<sup>3</sup>Mediante un sistema compensador, se puede generar la diferencia de fase requerida entre ambos ejes.

inferior al umbral de daño del material. Para conseguir inducir cambios sobre la muestra es necesario disponer de una óptica de enfoque. Es por eso que, tras un sistema de espejos que posibilita propagar el haz láser a la zona óptima para procesar, se coloca un objetivo microscópico con una apertura numérica dada ( $NA = 0.5$  en el setup empleado). Dicha lente objetivo presenta una trascendencia relevante, al definir el volumen focal en el material y, por tanto, determinar de forma indirecta los umbrales T1, T2 y T3.

Finalmente, a la distancia adecuada respecto al objetivo<sup>1</sup> se encuentra la muestra, situada sobre la plataforma móvil 3D. De esta forma, durante el grabado láser, todos los elementos del setup permanecen fijos, a excepción de la plataforma móvil (que contiene la muestra), que se mueve a la velocidad y en la dirección que se definen por programación.

El hecho de que la plataforma móvil tenga una resolución nanométrica sugiere que, si se pretenden desarrollar estructuras ópticas con gran precisión, es necesario disponer de una cámara con la que monitorizar el procesado del material. Mediante la colocación de un divisor de haz (*beamsplitter*) antes del objetivo, dicho objetivo no sólo realiza el enfoque del haz láser sobre la muestra, aspecto ya desarrollado; sino que también recolecta la luz de la muestra procesada<sup>2</sup> y la dirige a la cámara CCD a través del camino de transmisión del *beamsplitter*. Esta etapa final del setup (cámara, *beamsplitter*, objetivo y muestra) se muestra en la [Figura 3.2b](#), con la disposición real situada en el laboratorio.

## 3.2. Configuraciones de grabado láser

Seguidamente, se presentan los tipos de configuración existentes en el grabado láser para, posteriormente, centrar la atención en el procesado sobre fibra óptica, al ser el material sobre el que se inscribirán estructuras ópticas. Las configuraciones estándar para el grabado láser de estructuras ópticas sobre materiales transparentes son las asociadas a geometrías de escritura transversal y longitudinal. En determinadas ocasiones, se emplea el autoenfoque derivado de efectos no lineales, aunque este puede ser considerado un subtipo de grabado longitudinal.

### Configuración longitudinal

En el grabado longitudinal la muestra se graba en paralelo, ya sea desde o hacia el láser ([Figura 3.3a](#)). Se debe agregar que, debido a la simetría transversal del perfil de intensidad gaussiano asociado al haz láser (mostrada en [Figura 2.8](#) mediante óptica gaussiana), las micro-estructuras ópticas que subyacen del grabado presentan simetría cilíndrica. No obstante, esta configuración presenta una desventaja relevante, y es el hecho de que la longitud de la micro-estructura óptica está limitada por la distancia de trabajo<sup>3</sup> de la lente (*WD*, *Working Distance*), siendo dicho valor inferior a 1.2 cm para el objetivo empleado en el setup ([Tabla 3.2](#)).

<sup>1</sup>En ausencia de elementos intermedios dicha distancia sería la distancia focal. No obstante, las posibles aberraciones que pueda presentar el material, o el simple cambio de índice de refracción que se produce al situar la muestra, implica que dicha distancia difiera ligeramente de la distancia focal.

<sup>2</sup>La plataforma 3D incorpora fuentes LED blancas que iluminan la muestra a procesar con objeto de obtener una imagen adecuada en la cámara CCD.

<sup>3</sup>Distancia desde el elemento frontal de la lente del objetivo a la superficie más cercana de la muestra sobre la que se realiza el grabado cuando esta está enfocada.

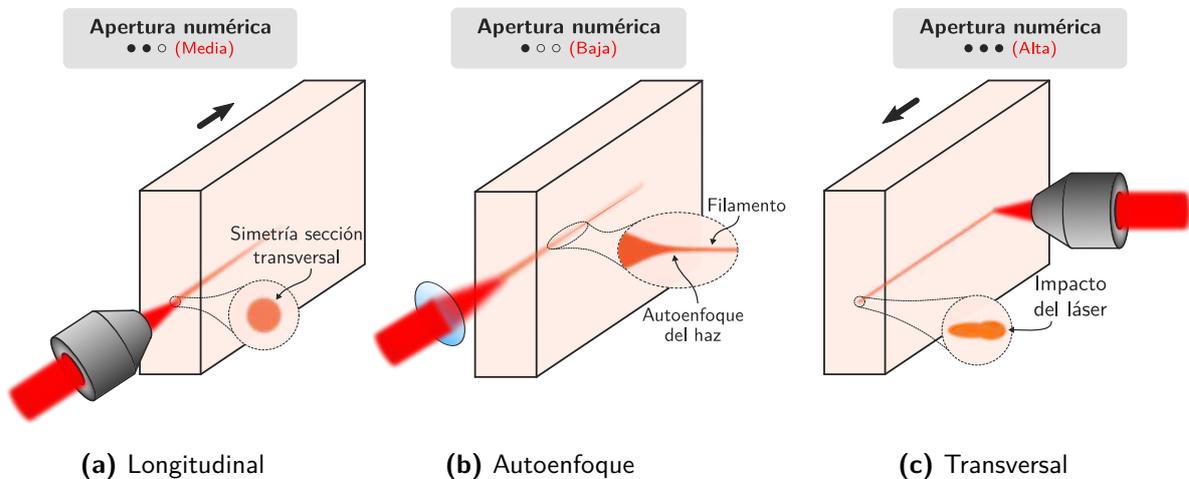
Si bien es posible minimizar este inconveniente mediante lentes con aperturas numéricas reducidas<sup>1</sup> ( $NA \sim 0.2$ ), la potencia de láser necesaria para alcanzar la intensidad de ruptura óptica se incrementa notablemente, lo cual induce a su vez efectos no lineales como el autoenfoque, por efecto *Kerr*<sup>2</sup> [25]. Dicho efecto es el que se utiliza en lo que se conoce como grabado por autoenfoque (Figura 3.3b), en el cual se producen filamentos que originan cambios en el índice de refracción en la dirección axial. A pesar de la elevada longitud de los filamentos ( $> 100 \mu\text{m}$ ), la velocidad de grabado es reducida actualmente ( $\sim 1 \mu\text{m/s}$ ). Un aspecto destacable es el hecho de que la micro-estructura típicamente ha de ser recta, ya que esta geometría no permite reproducir de forma sencilla el micromecanizado de dispositivos ópticos que presenten curvas.

### Configuración transversal

En el grabado transversal la muestra se graba perpendicularmente a la dirección del haz láser incidente (Figura 3.3c). En esta configuración, conmutan las ventajas y desventajas del grabado longitudinal. La distancia de trabajo no restringe la longitud de las micro-estructuras ópticas, sino únicamente la profundidad. No obstante, la profundidad que posibilita una lente con  $NA = 0.5$  es suficiente para la inscripción de estructuras ópticas en tres dimensiones [2]. La desventaja de este tipo de grabado se debe a la asimetría que presenta la sección transversal de la micro-estructura óptica, ya que la relación entre la profundidad de foco ( $2z_0$ , con  $z_0$  definido en la Ecuación 2.3) y el diámetro del punto focal ( $2w_0$ , con  $w_0$  definido en la Ecuación 2.2), que define la asimetría de volumen focal, toma el siguiente valor:

$$\frac{2z_0}{2w_0} = \frac{n}{NA} \xrightarrow[\text{Lente: } NA=0.5]{n_{\text{vidrio}} \sim 1.5} \frac{2z_0}{2w_0} \sim 3.$$

Dicho valor indica una sección transversal elíptica de la micro-estructura, conteniendo modos guiados elípticos que acoplan de forma deficiente la luz en fibra óptica, como se indicará a continuación.



**Figura 3.3.** Configuraciones de grabado de materiales transparentes con láser de fs [26]

<sup>1</sup>Una apertura numérica reducida implica una distancia focal elevada:  $F = \frac{1}{2 \cdot NA}$

<sup>2</sup>Birrefringencia creada en un material por un campo eléctrico exterior.

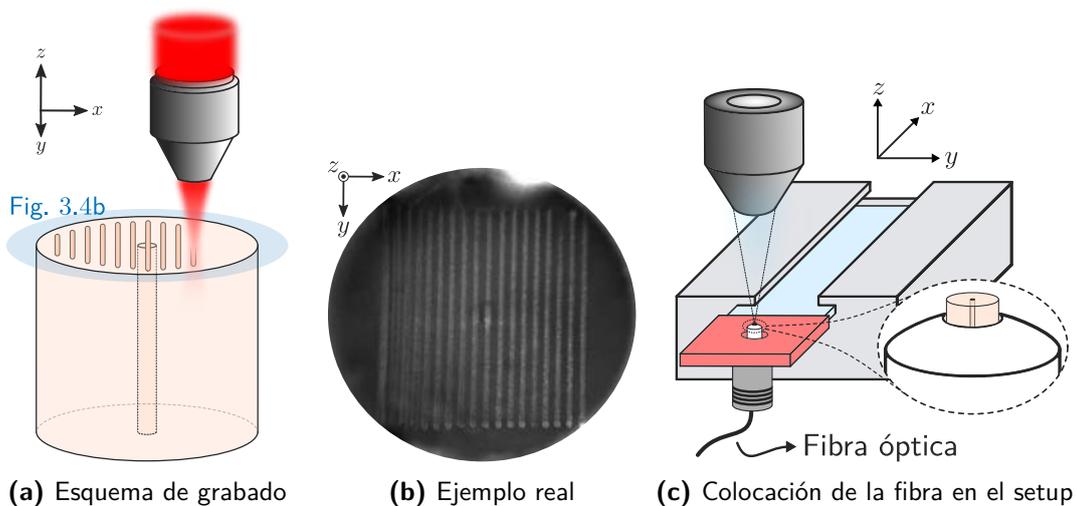
### 3.2.1. Aplicado a fibra óptica

Como se ha indicado en la Introducción del presente documento, la finalidad del proyecto es la realización de sensores en fibra óptica, por lo que seguidamente se muestran las dos zonas en las que, de forma genérica, se realizan las inscripciones en una fibra. Se trata del *end-face* (o *end-fiber*) y el *in-fiber*. Si bien los sensores que se fabricarán en el [Capítulo 5](#) son de tipo *in-fiber*, se muestran las particularidades y aplicaciones que presentan ambos tipos.

#### **End-face**

La inscripción *end-face* consiste en el grabado láser en la cara final de una fibra óptica, tal y como se indica en la [Figura 3.4a](#). La principal aplicación que subyace de la inscripción de patrones en el extremo de una fibra (dimensiones del orden de  $\mu\text{m}$ ) se corresponde con el grabado de redes de difracción ([Figura 3.4b](#)), con objeto de generar patrones de luz en el campo lejano que respondan a unos requerimientos dados<sup>1</sup>. En el grabado *end-face* se utiliza la configuración transversal, aunque puede estar emplearse conjuntamente con la configuración longitudinal en caso de realizar patrones en el espacio (y no en el plano), como pueden ser redes de difracción inclinadas. Asimismo, en lo que respecta al setup experimental, es necesaria una colocación de la fibra en la plataforma 3D tal que sea posible su inscripción en el *end-face*. En el laboratorio se emplea la disposición mostrada en la [Figura 3.4c](#).

A pesar de que este documento no presenta ningún resultado referente al grabado en el *end-face* de la fibra, durante la realización del proyecto se han fabricado redes de difracción en la punta de la fibra, y se ha evaluado su comportamiento en función del periodo, longitud de onda, y *tilt*<sup>2</sup>.



**Figura 3.4.** Grabado *end-face* en una fibra óptica

<sup>1</sup>Esto tiene una gran relevancia en el campo médico. Por ejemplo, puede ser utilizado para activar selectivamente fotosensibilizadores en el marco de terapias fotodinámicas (PDT).

<sup>2</sup>El *tilt* de la red de difracción hace referencia a la inclinación ( $\alpha$ ) que presenta dicha red.

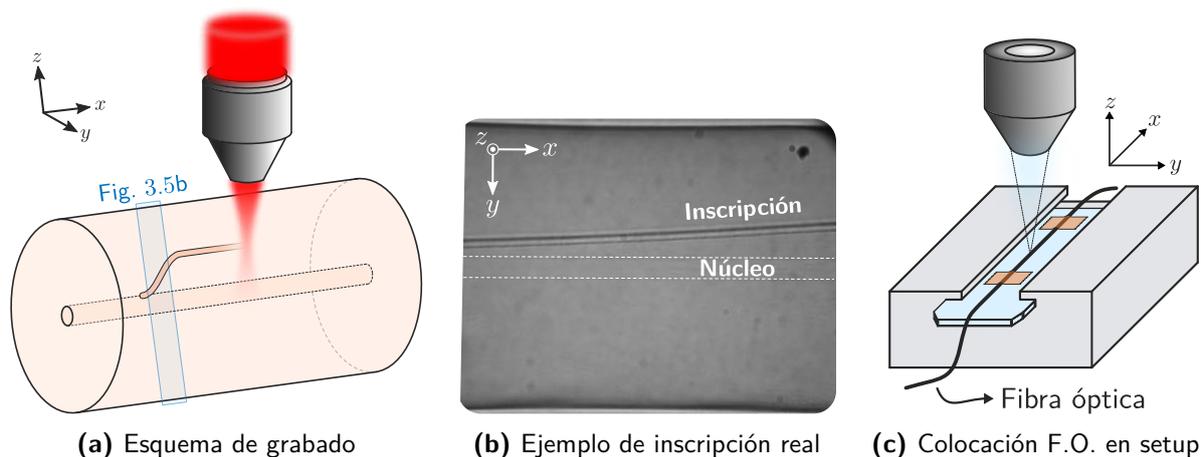
***In-fiber***

Por su parte, la inscripción *in-fiber* consiste en el grabado láser en la zona longitudinal de una fibra óptica, tal y como se muestra en la [Figura 3.5a](#). Las estructuras ópticas generadas, por lo general, tienen unas dimensiones superiores en comparación con los patrones situados en el *end-face*, situándose en el orden de  $\mu\text{m}$  o  $\text{mm}$ . Se pueden inscribir guías de onda, cavidades *Fabry-Perot*, interferómetros, redes de *Bragg* en fibra (FBG) o de periodo aleatorio (RFG, *Random Fiber Grating*), entre muchas otras estructuras. En la [Figura 3.5b](#) se muestra el ejemplo de una guía de onda desacoplando luz del núcleo. En el grabado *in-fiber* se utiliza fundamentalmente la configuración transversal, con la disposición de la fibra que se esquematiza en la [Figura 3.5c](#): se estira previamente sobre un cubreobjetos<sup>1</sup>, y se fija mediante cinta Kapton.

Ahora bien, el hecho de emplear una configuración transversal para el grabado implica, como se ha mencionado, que las estructuras generadas presentan una sección transversal elíptica<sup>2</sup>, lo cual para componentes *in-fiber*<sup>3</sup>, como pueden ser guías de onda, origina un acoplamiento pésimo de luz. Existen diferentes técnicas de conformación de haz para corregir esta asimetría, las cuales serán mencionadas en la [Sección 4.2](#), referente a las guías de onda.

Por otra parte, en lo que respecta a la propagación del haz láser durante la inscripción, existe una diferencia notable respecto al grabado en el *end-face*. En el *end-face*, la interfase aire-material se produce en un plano, pero en el grabado *in-fiber* esto no es así: la geometría cilíndrica inherente a la fibra induce aberraciones esféricas, lo cual genera astigmatismo en el volumen focal. En la última sección del presente capítulo se describe este problema y se deriva una modificación en el setup que corrige el astigmatismo generado.

Por último, se reincide en el hecho de que las contribuciones presentadas en este documento responden exclusivamente a inscripciones láser *in-fiber*.



**Figura 3.5.** Grabado *in-fiber* en una fibra óptica

<sup>1</sup>Para una inscripción más precisa se suele eliminar de forma previa el recubrimiento plástico de la fibra en la zona a procesar. No obstante, no es estrictamente necesario.

<sup>2</sup>El volumen focal presenta una forma elipsoidal.

<sup>3</sup>El grabado *end-face* también se acomete a través de una configuración transversal, pero las redes de difracción no tienen el guiado de luz como finalidad, por lo que la asimetría que subyace del grabado transversal no es relevante en el *end-face*.

### 3.3. Técnicas de caracterización

A la hora de realizar el procesado de materiales, es importante caracterizar los cambios efectuados en el mismo, esto es, cuantificar cómo y cuánto ha cambiado una determinada propiedad tras el efecto del láser. Asimismo, no sólo permite obtener información cuantitativa, sino también cualitativa, al facilitar la comprensión de los cambios efectuados en el material y, por tanto, poder realizar diseños futuros con parámetros del láser más apropiados y simulaciones basadas en datos realistas.

Las técnicas de caracterización empleadas en este trabajo son la medida por campo cercano refractado (RNF) y la microscopía de contraste de fase (QPM), que permiten determinar cambios en el índice de refracción y en la fase ( $\propto \text{RI}$ ), respectivamente. A continuación se desarrollan brevemente los fundamentos de ambas técnicas.

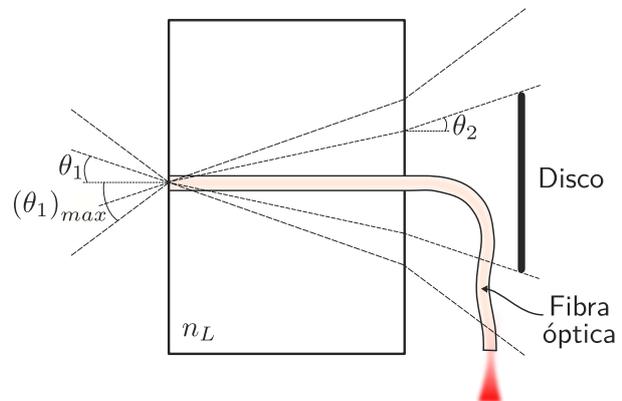
#### 3.3.1. Refracted Near Field (RNF)

Como se ha mencionado, la técnica de medida RNF permite determinar la evolución del índice de refracción efectivo<sup>1</sup> ( $n_{eff}$ ) a lo largo del diámetro de la fibra, esto es, del *end-face*. Típicamente, se suele emplear para caracterizar guías de onda y optimizar así sus parámetros de grabado. A continuación se desarrolla el principio de medida para el caso de fibra óptica [27], y se muestra un ejemplo práctico. No obstante, el funcionamiento se puede extrapolar a otro tipo de materiales.

Inicialmente, el *end-face* de la fibra está inmerso en un líquido con un índice de refracción ( $n_L$ ) ligeramente superior al propio la cubierta. Una fuente monocromática con un patrón espacial lambertiano focaliza la luz sobre el *end-face*, mediante una lente con una apertura numérica superior a la de la fibra. Esto genera un cono de luz con una zona hueca en la parte central, correspondiente a la luz guiada por la fibra óptica. En el centro del cono de luz se sitúa una especie de disco cuya finalidad es bloquear una pequeña parte de luz correspondiente fundamentalmente a modos de cubierta, ya que su medición es complicada. En la Figura 3.6 se muestra un esquema del proceso de medida.

Se puede observar que  $\theta_2$  se corresponde con el ángulo refractado incidente en la circunferencia del disco. Dicho ángulo se corresponde con el ángulo de entrada  $\theta_1$ . Entre dicho ángulo  $\theta_1$  y  $(\theta_1)_{max}$ , la luz refractada no es bloqueada por el disco y, por tanto, es capturada por el detector. La relación entre el ángulo  $\theta_2$  y  $\theta_1$  puede ser determinada aplicando la ley de Snell a la celda de líquido, obteniendo:

$$n^2(r) = \sin^2(\theta_1) + n_L^2 - \sin^2(\theta_2). \quad (3.1) \quad \text{Figura 3.6. Diagrama proceso de medida RNF [27]}$$



<sup>1</sup>Índice de refracción que experimenta un modo de propagación respecto a su velocidad de grupo. Se define  $n_{eff} = \frac{\beta}{k_0}$ , siendo  $\beta$  la constante de propagación del modo, y  $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}$  el número de onda en el vacío.

Teniendo en cuenta que  $n_L$  y  $\theta_2$  son fijados durante la medida, un cambio en  $n(r)$  ocasiona una variación en el ángulo  $\theta_1$ . Considerando que el detector situado tras el disco mide la potencia del haz de salida para  $\theta \geq \theta_2$ , y que dicha cantidad equivale a  $P(\theta_1)$  (potencia del haz de entrada asociada al ángulo  $\theta_1$ ), despreciando posibles pérdidas se tiene:

Dependencia de  $P(\theta_1)$  con  $\theta_1$  se reduce de  $\tan^2(\theta_1)$  a  $\sin^2(\theta_1)$ .

$$P(\theta_1) = P(0) \left( 1 - \frac{\tan^2(\theta_1)}{\tan^2(\theta_1)_{max}} \right) \uparrow \approx P(0) \left( 1 - \frac{\sin^2(\theta_1)}{\sin^2(\theta_1)_{max}} \right). \quad (3.2)$$

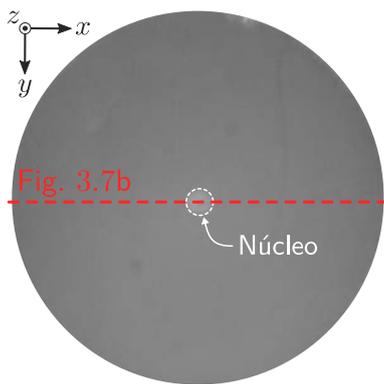
Dado que la variación del índice de refracción en la fibra es muy reducida ( $\sim 1\%$ ), se puede realizar la siguiente aproximación:

$$n(r) = n(0) + \delta(r) \rightarrow n^2(r) = n^2(0) + 2n(0)\delta(r) + \delta^2(r) \overset{\approx 0}{\simeq} 2n(0)n(r) - n^2(0). \quad (3.3)$$

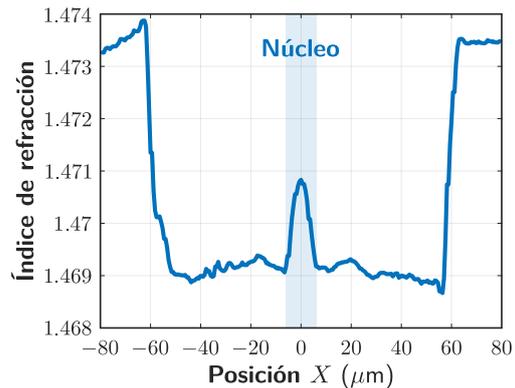
Combinando las ecuaciones 3.1, 3.2 y 3.3, se obtiene que:

$$P(\theta_1) \simeq \text{cte}_1 - \text{cte}_2 \cdot n(r),$$

por lo que, se deduce que la potencia del cono de luz refractado es proporcional al índice de refracción del punto enfocado del *end-face*. De esta forma, a partir de esta técnica, realizando un barrido sobre el diámetro de la fibra, la potencia óptica detectada proporciona el perfil del índice de refracción de la fibra. En la Figura 3.7 se muestra el perfil resultante de aplicar la técnica RNF sobre el *end-face* de una fibra monomodo SMF (*Single-Mode Fiber*) con diámetros de núcleo y cubierta de  $9\ \mu\text{m}$  y  $125\ \mu\text{m}$ , respectivamente. Dicha medida, así como las restantes realizadas durante el proyecto, se han llevado a cabo con el perfilómetro RNF *Sira Electro-Optics*.



(a) Barrido realizado con el perfilómetro RNF



(b) Perfil del índice de refracción

**Figura 3.7.** Perfil del índice de refracción del *end-face* de una fibra SMF medido con RNF

### 3.3.2. Quantitative Phase Microscopy (QPM)

QPM es una técnica microscópica que permite cuantificar el cambio de fase que ocurre cuando la luz que ilumina la muestra pasa a través de un medio ópticamente más denso que

el aire, como es la fibra óptica. Este método, que se empleará en la zona longitudinal de la fibra (*in-fiber*), permite obtener un perfil transversal de la fase, siendo proporcional al índice de refracción a través de la siguiente relación:

$$\Delta n = \frac{\lambda}{2\pi \cdot z} \Delta \phi, \quad (3.4)$$

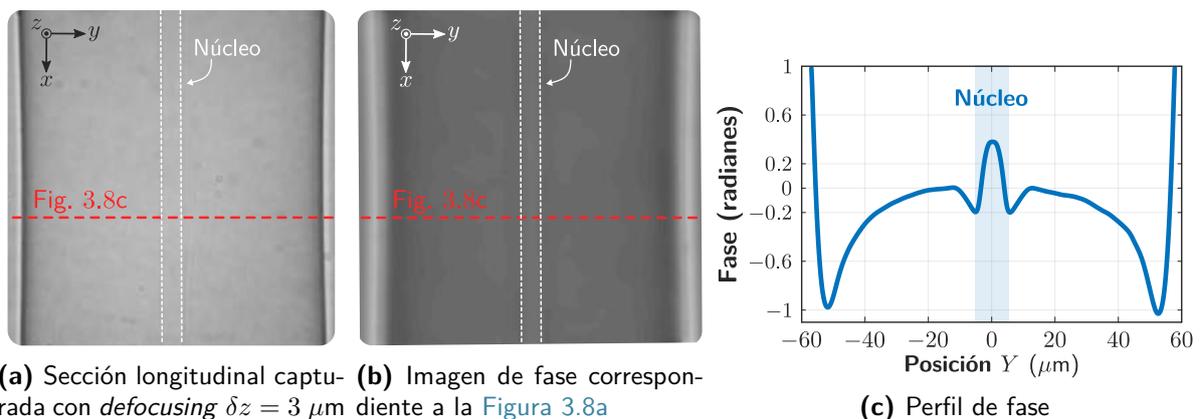
donde  $\lambda$  es la longitud de onda de la fuente que ilumina la muestra, y  $z$  hace referencia a la profundidad de la inscripción (región con diferente RI).

Esta técnica se fundamenta en la ecuación del transporte radiativo, conocida comúnmente como TIE (*Transport-of-Intensity Equation*) [28]:

$$k \frac{\partial I(\vec{r})}{\partial z} = -\nabla \cdot (I(\vec{r}) \nabla \phi(\vec{r})), \quad (3.5)$$

siendo  $I(\vec{r})$  la distribución de intensidad de la imagen,  $\phi(\vec{r})$  la distribución de fase de la imagen, y  $z$  la posición en dicho eje (profundidad en el enfoque). La ecuación muestra que la fase puede ser recuperada cuando la intensidad de la luz cambia respecto a su dirección de propagación (sin presencia de la muestra). Con ese objetivo, se toman tres imágenes de intensidad, estando una enfocada<sup>1</sup> ( $\delta z = 0$ ) y las otras dos desenfocadas<sup>2</sup> una cantidad  $\pm \delta z$  [29]. Dichas imágenes se han obtenido en transmisión mediante la cámara CCD del setup (con el aumento de  $100\times$  proporcionado por la lente objetivo) y una iluminación blanca<sup>3</sup> de la muestra. El *defocusing*, por su parte, se consigue mediante desplazamientos en el eje  $Z$  con la plataforma 3D de *Aerotech*.

Con objeto de efectuar el mismo ejemplo que el realizado en la técnica RNF, se muestra en la Figura 3.8 la medida del perfil de fase de una fibra SMF mediante el empleo de QPM. Además de exponer una captura *in-fiber* y el perfil de fase resultante, se incorpora la imagen de fase asociada (Figura 3.8b), con tonos oscuros para valores de fase altos, y tonos más claros para valores reducidos.



**Figura 3.8.** Perfil de fase del *in-fiber* de una fibra SMF medido mediante QPM

<sup>1</sup>El correcto enfoque de la muestra es un factor clave para obtener un resultado válido.

<sup>2</sup>A lo largo del trabajo, se ha empleado un *defocusing* de  $\pm \delta z = \pm 3 \mu\text{m}$ .

<sup>3</sup>Estrictamente, la Ecuación 3.5 sólo es válida para fuentes coherentes, aunque fuentes de luz parcialmente coherentes, como la empleada en el proyecto, ofrecen resultados correctos.

### 3.4. Compensación astigmática con óptica adaptativa

Como se mencionó en el apartado de inscripción *in-fiber* correspondiente a la Subsección 3.2.1, la geometría cilíndrica inherente a la fibra óptica ocasiona una distorsión astigmática en el haz láser que incide sobre el material. En consecuencia, como se expondrá seguidamente, se produce una pérdida de fluencia<sup>1</sup>, derivando en una disminución de la capacidad de procesamiento del material. El estudio realizado sobre este problema y su solución se presenta en [PRR6], siendo la primera gran contribución del trabajo.

La fabricación de estructuras ópticas *in-fiber* con el láser de femtosegundo tiene como principal dificultad la forma cilíndrica que presenta la interfase aire-material en el grabado. Este hecho, que induce astigmatismo<sup>2</sup> en el volumen focal (Figura 3.9), puede ser corregido de forma sencilla a través del método propuesto por Zhou *et al.*<sup>3</sup> [30], en el cual, como se muestra en la Figura 3.10, sobre el setup inicial de inscripción *in-fiber* mostrado en la

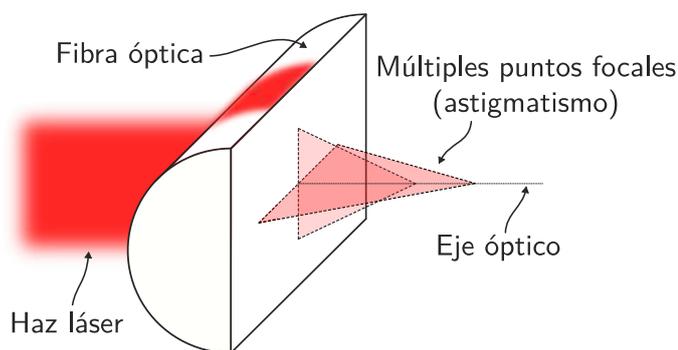


Figura 3.9. Astigmatismo en fibra óptica (*in-fiber*)

Figura 3.5c se añade un cubreobjetos sobre la fibra, rellenando con líquido adaptador de índice el espacio entre el portaobjetos y cubreobjetos<sup>4</sup>. De esta forma, el haz láser se encuentra con una interfase plana, evitando así las aberraciones esféricas propias de la exposición directa.

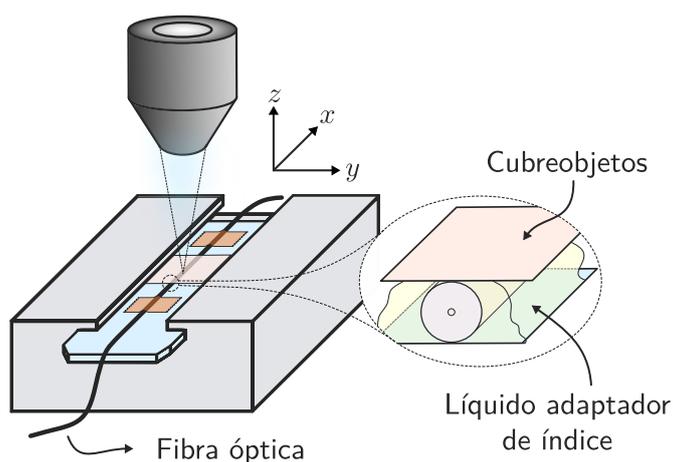


Figura 3.10. Empleo de óptica adaptativa (adaptador de índice) en el grabado láser

<sup>1</sup>Energía por unidad de superficie ( $J/m^2$ ).

<sup>2</sup>Aberración óptica que hace que los rayos se propaguen en dos planos perpendiculares con dos focos diferentes (Figura 3.9).

<sup>3</sup>Existen soluciones basadas en la inmersión del objetivo en líquidos adaptadores, pero requiere que dicho objetivo disponga de unas especificaciones concretas.

<sup>4</sup>El método propuesto por Zhou *et al.* [30] incluye dos fibras situadas a ambos lados de la fibra a procesar, únicamente con el objetivo de contener el líquido en la zona de interés.

### Óptica adaptativa - Haz estigmático

Cuando un pulso láser, de longitud de onda  $\lambda$ , es enfocado mediante un objetivo con apertura numérica NA sobre una muestra plana con índice de refracción  $n_{cl}$ , como la modificación propuesta con el cubreobjetos, la anchura del punto focal  $w_o$  y la longitud de Rayleigh  $z_0$ , vienen dadas por las ecuaciones indicadas en la Sección 2.2, que son la 2.2 y la 2.3, respectivamente. Despreciando el factor de calidad del haz ( $M^2$ ), se tiene:

$$w_{0p} \simeq \frac{\lambda}{\pi \text{NA}}, \quad z_{0p} \simeq \frac{n_{cl} \lambda}{\pi \text{NA}^2},$$

donde el subíndice  $p$  hace referencia al enfoque sobre un medio plano [31]. La única consideración a tener en cuenta es que, como se derivó en la Sección 2.2, el punto focal se encuentra desplazado a  $z' = \frac{n_{cl}}{n_0} \cdot z$  (aprox. paraxial), siendo  $z$  la distancia de la interfase al punto focal en un medio con RI  $n_0$ <sup>1</sup>, esto es, sin la presencia de la muestra. De esta forma, se deduce que existe un desenfoque dependiente de la profundidad de penetración. Con todo, el volumen focal es el representado en la Figura 3.11a, presentando un enfoque libre de aberraciones.

### Exposición directa - Haz astigmático

Ahora bien, si no se emplea dicha modificación en el setup, y se realiza un grabado mediante exposición directa, la fibra (con RI =  $n_{cl}$ ), dada su geometría, actúa como una lente. En ese caso,  $w_o$  y  $z_0$  toman el siguiente valor [31]:

$$w_{0c} \simeq \frac{1}{n_{cl}} \frac{\lambda}{\pi \text{NA}}, \quad z_{0c} \simeq \frac{1}{n_{cl}} \frac{\lambda}{\pi \text{NA}^2},$$

donde el subíndice  $c$  hace referencia al enfoque sobre la superficie cilíndrica de la fibra. Cuando un haz gaussiano, como el proporcionado por la fuente láser, es enfocado en una fibra, este se comporta como un haz astigmático [32], ya que la interfase exhibe diferentes propiedades geométricas según se trate del eje perpendicular o paralelo. La distribución de intensidad de un haz gaussiano astigmático de potencia  $P$  es

$$I(x, y, z) = \frac{2P}{\pi w_x(z) w_y(z)} e^{-2 \left[ \left( \frac{x}{w_x(z)} \right)^2 + \left( \frac{y}{w_y(z)} \right)^2 \right]},$$

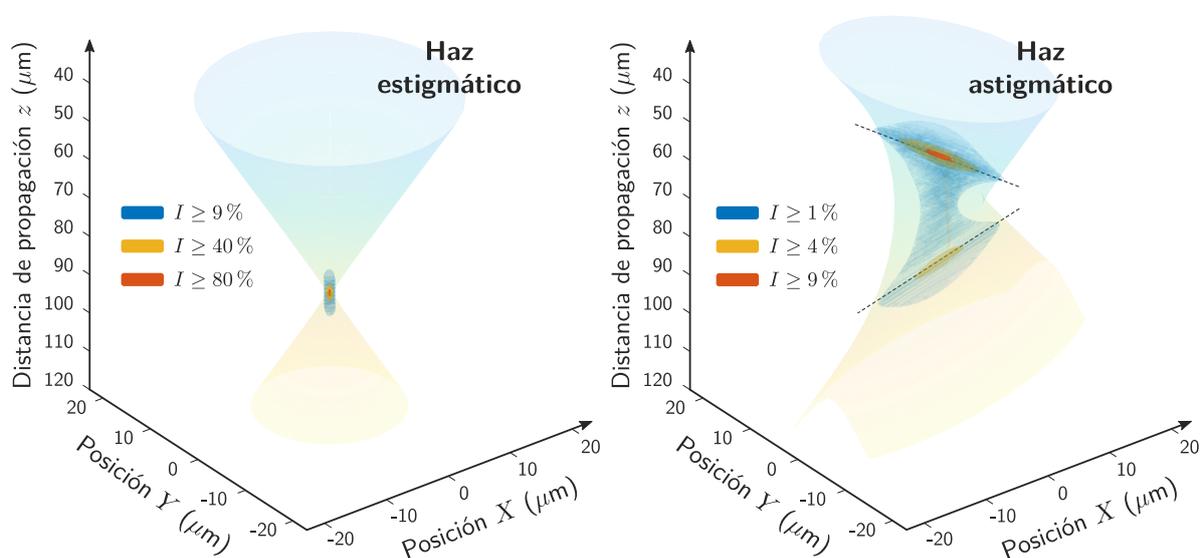
con

$$w_i(z) = w_{0i} \sqrt{1 + \left( \frac{z - z_{ei}}{z_{0i}} \right)^2},$$

donde  $z_{ei}$  hace referencia al punto  $z$  donde se realiza el enfoque ( $z_{ex} = z$ ,  $z_{ey} = z' = \frac{n_{cl}}{n_0} z$ ). Por ejemplo, en caso de enfocar el núcleo en una fibra SMF (diámetro de  $125 \mu\text{m}$ ), se tiene  $z_{ex} = 62.5 \mu\text{m}$ , mientras que  $z_{ey} = n_{cl} \cdot 62.5 \mu\text{m}$ . En la Figura 3.11b se muestra el enfoque del haz gaussiano ante una exposición directa sobre la fibra, sin emplear adaptador de índice. Se puede observar que existe una distorsión astigmática en el volumen focal, presentando dos máximos, los cuales corresponden a las posiciones en que  $w_x(z)$  es mínimo ( $w_{0x}$ ), y  $w_y(z)$  es mínimo ( $w_{0y}$ ). Las direcciones de dichos máximos son perpendiculares entre sí.

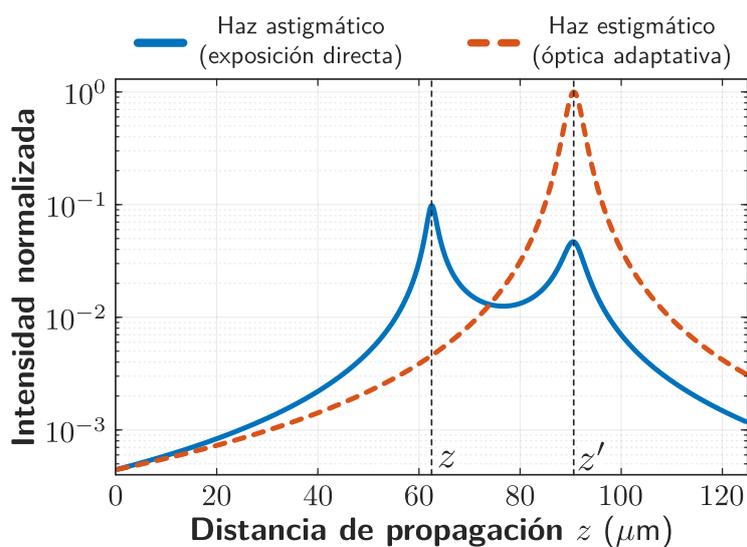
<sup>1</sup>Típicamente, como sucede en el setup empleado,  $n_0 = 1$ , al tratarse del aire.

Si se atiende a las intensidades mostradas en la leyenda de ambos haces (Figura 3.11a y 3.11b), estando ambas normalizadas al valor máximo del haz estigmático, se puede concluir que el empleo de óptica adaptativa ocasiona una concentración de la intensidad en una región espacialmente más reducida. Este hecho se muestra de forma explícita en la Figura 3.11c, en el que se muestra la intensidad del haz conforme aumenta la distancia de propagación ( $z$ ) para  $x = 0$ ,  $y = 0$ . Se observa que el volumen focal del haz astigmático no contiene intensidades superiores al 10% del valor estigmático máximo, esto es, se encuentra un orden de magnitud por debajo. De esta forma, el empleo de óptica adaptativa, además de ofrecer una mayor exactitud en el procesado (volumen focal más reducido), requiere energías de pulso más reducidas para ocasionar modificaciones en el material (reducción de los *threshold* asociados a los tipos de modificación).



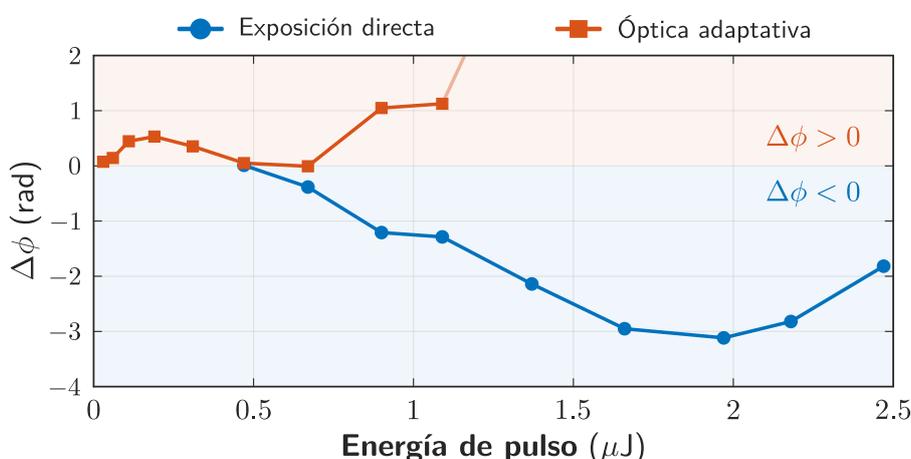
(a) Óptica adaptativa (haz estigmático)

(b) Exposición directa (haz astigmático)

(c) Intensidad del haz láser con y sin el empleo de óptica adaptativa ( $x = 0$ ,  $y = 0$ )**Figura 3.11.** Propagación del haz láser ante el empleo de óptica adaptativa y exposición directa

### 3.4.1. Resultados de fase

Con objeto de complementar el estudio realizado sobre la evolución espacial del haz gaussiano en el caso de emplear o no emplear óptica adaptativa, se caracterizan a continuación los cambios de fase ( $\propto$  RI) que tienen lugar en el material ante diferentes energías de pulso para ambas formas de grabado: exposición directa y óptica adaptativa (adaptador de índice). Se emplea el setup expuesto con anterioridad (Sección 3.1), y como muestra se hace uso de la fibra convencional SMF, sobre la cuál se realizan inscripciones en el núcleo manteniendo fijo el PRR a 120 kHz (únicamente varía  $E_p$ ). La velocidad de inscripción ( $v$ ) se mantiene estable a  $100 \mu\text{m/s}$ , por lo que las inscripciones presentan 1200 pulsos/ $\mu\text{m}$ . Los resultados, obtenidos a partir de QPM<sup>1</sup>, se representan en la Figura 3.12.



**Figura 3.12.** Cambio de fase generado en el material en función de la energía de pulso

Analizando los resultados, se puede encontrar un nexo coherente con los datos que ofrece la Figura 3.11b. Los primeros cambios de fase con óptica adaptativa se obtienen para  $E_p = 0.06 \mu\text{J}$ , mientras que la exposición directa requiere  $E_p = 0.67 \mu\text{J}$ . Existe un factor 10 entre ambos valores, que es aproximadamente el cociente existente entre las intensidades máximas de los haces estigmático y astigmático. No obstante, la diferencia más destacada viene dada por el signo del cambio de fase. El haz astigmático genera un cambio en la fase, y por tanto en el índice de refracción, negativo; mientras que el empleo de óptica adaptativa induce cambios positivos.

En la curva correspondiente al uso de óptica adaptativa se pueden destacar tres regiones: la primera ( $0 - 0.31 \mu\text{J}$ ) está caracterizada por un cambio en el índice de refracción (RIC, *Refractive Index Change*) suave y positivo, asociado con el Tipo I detallado en el Capítulo 2. Por su parte, la segunda ( $0.31 - 0.67 \mu\text{J}$ ) presenta un cambio de fase menor en la zona central de la inscripción (mayor en la zona externa), mientras que en la tercera ( $0.67 - 1.09 \mu\text{J}$ ), con  $E_p$  más altas, se generan estructuras más complejas, en las que el cambio positivo en el volumen focal se incrementa, pero se crean también estructuras secundarias con un cambio de índice negativo, existiendo evidencias en la literatura de que esto se deba a la filamentación que tiene lugar en este régimen de energías<sup>2</sup>.

<sup>1</sup>Se emplea un *defocusing* de  $\pm 3 \mu\text{m}$ .

<sup>2</sup>Para  $E_p > 1.09 \mu\text{J}$ , los pulsos láser dañan el cubreobjetos, por lo que no se ha caracterizado el cambio de fase existente. Al emplear QPM, el daño en el cubreobjetos induciría errores en la medida.

Por otra parte, en lo que respecta a la exposición directa, existe una primera región ( $0-1.09 \mu\text{J}$ ) con un RIC suave pero de signo negativo. En ese punto, el volumen focal presenta un cambio de fase negativo abrupto que se estabiliza en  $E_p = 1.97 \mu\text{J}$ , descendiendo (en valor absoluto) a partir de dicho valor. En esta región, las líneas inscritas presentan filamentación, siendo la longitud de dichos filamentos fuertemente dependiente de la velocidad de inscripción ( $v$ ). Un aspecto a destacar es que, dichos filamentos (no el volumen focal), pueden presentar un RIC positivo, siendo válidos, por tanto, para el guiado de luz<sup>1</sup>.

En resumen, la modificación del setup introducida para corregir el astigmatismo inherente a la exposición directa, no sólo reduce el umbral de modificación en el material, sino que también permite realizar estructuras con cambios en el índice de refracción suaves (RIC de Tipo I). Este tipo de cambios resulta adecuado para la fabricación de guías de onda<sup>2</sup> y gratings, aspecto que se explotará en el [Capítulo 5](#) para el desarrollo de diferentes sensores.

---

<sup>1</sup>La desventaja que presentan los filamentos generados es su geometría. La estructura asimétrica que poseen ofrece grandes pérdidas en el guiado. Estos aspectos son discutidos en el siguiente capítulo.

<sup>2</sup>Especialmente para guías de onda basadas en la técnica multiscan, desarrollada en el próximo capítulo.

# 4

## Inscripciones estándar

---

<b>4.1</b>	<b>Redes de <i>Bragg</i> en fibra (FBGs)</b>	<b>41</b>
4.1.1	Tipos de estructuras	42
4.1.2	Configuraciones de grabado láser	43
<b>4.2</b>	<b>Guías de onda</b>	<b>46</b>
4.2.1	Técnica <i>multiscan</i>	47
4.2.2	Geometrías de acoplo en CWGs	48
<b>4.3</b>	<b>Interferómetro Mach-Zehnder</b>	<b>50</b>
4.3.1	Acoplo evanescente	52

---

**E**ste capítulo tiene por objetivo presentar las estructuras ópticas estándar sobre las que se fundamenta el capítulo posterior, relativo a la fabricación de sensores. La exposición de dichas estructuras y el razonamiento asociado a posibles mejoras en el proceso de grabado láser se realizan apoyándose en resultados experimentales y simulaciones.

En la [Sección 4.1](#), además de mostrar de forma sencilla los fundamentos teóricos que rigen el comportamiento físico de una red de *Bragg* en fibra (FBG), se presentan las principales estructuras de acuerdo al cambio inducido en el índice de refracción (RIC), así como las configuraciones de grabado existentes en láseres de femtosegundo.

A continuación, la [Sección 4.2](#) comprende lo referente a guías de onda en fibra, con especial énfasis en parámetros de inscripción adecuados y técnicas para el perfeccionamiento de la sección transversal de las mismas. Asimismo, se estudian las geometrías de guiado óptimas desde el punto de vista de reducción de pérdidas.

Por último, en la [Sección 4.3](#) se presentan los interferómetros Mach-Zehnder en fibra, sus parámetros de caracterización más relevantes, y cómo influye la variación de los mismos sobre el patrón de interferencia generado.

## 4.1. Redes de Bragg en fibra (FBGs)

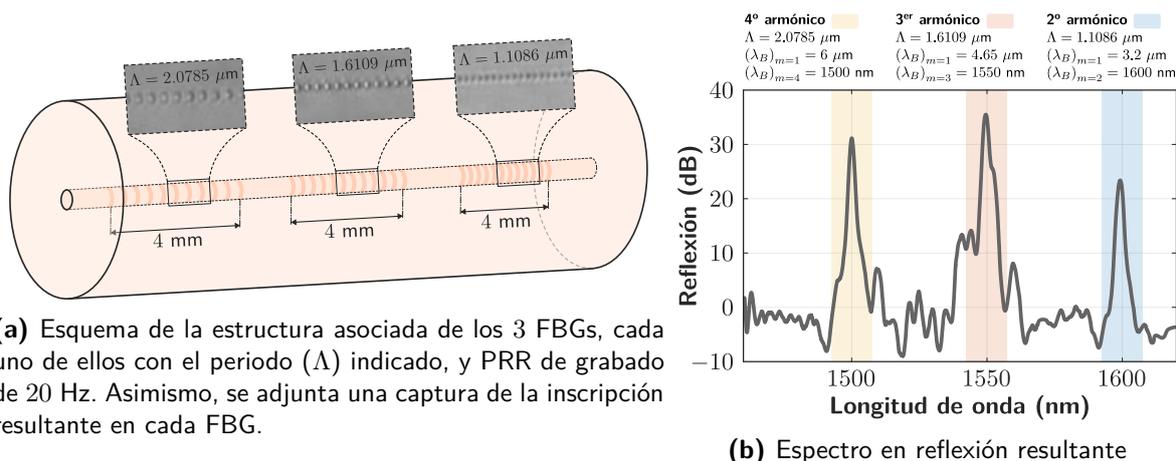
La inscripción de FBGs se ha venido empleando tradicionalmente para su aplicación en sensores de fibra óptica (OFS, *Optical Fiber Sensor*), como consecuencia de su elevada sensibilidad en el sensado de múltiples parámetros (químicos, biológicos, mecánicos, etc), así como su simplicidad de fabricación. Al mismo tiempo, la combinación de estos mecanismos de sensado óptico con tecnología de fibra óptica permite disponer de dispositivos fotónicos de dimensiones micrométricas con capacidad para medir de forma remota en tiempo real.

Un FBG grabado en el núcleo de una fibra óptica consiste en una perturbación periódica del índice de refracción de dicho núcleo. Dicha perturbación actúa como un reflector de una longitud de onda específica, denominada longitud de onda de Bragg ( $\lambda_B$ ), transmitiendo el resto de longitudes de onda [31]. La representación esquemática se puede observar en la Figura 4.2a. De forma genérica, la longitud de onda de Bragg se corresponde con:

$$\lambda_B = \frac{2}{m} n_{eff} \Lambda,$$

siendo  $n_{eff}$  el índice de refracción efectivo del grating,  $\Lambda$  el periodo de la estructura, y  $m$  el orden (armónico) del grating<sup>1</sup>.

Típicamente, considerando el índice de refracción efectivo de una fibra<sup>2</sup>, y teniendo en cuenta que existe un especial interés en generar  $\lambda_B$  en el infrarrojo cercano, particularmente en la 3ª ventana de comunicaciones ópticas ( $\lambda \simeq 1550$  nm), el periodo de grating necesario para conseguir que  $\lambda_B$  se sitúe en dicha zona espectral sería  $\Lambda \simeq 0.5 \mu\text{m}$ . Puesto que, con el láser de fs, resulta inviable realizar FBGs con  $\Lambda \lesssim 1 \mu\text{m}$ <sup>3</sup>, se hace necesario trabajar con ordenes superiores ( $m \geq 2$ ). En la Figura 4.1 se muestra un ejemplo real en el que, a través de FBGs de diferentes periodo, se obtienen longitudes de onda de Bragg en el rango espectral anteriormente mencionado (operando con el armónico adecuado en cada caso).



**Figura 4.1.** Demostración del empleo de diferentes ordenes de FBG

<sup>1</sup>Los armónicos se generan como consecuencia de una modulación no sinusoidal del índice de refracción, tal y como sucede en el grabado láser. En caso de que el perfil del índice de refracción fuera quasi-sinusoidal (FBGs grabados con máscara de fase), la presencia de armónicos es prácticamente despreciable.

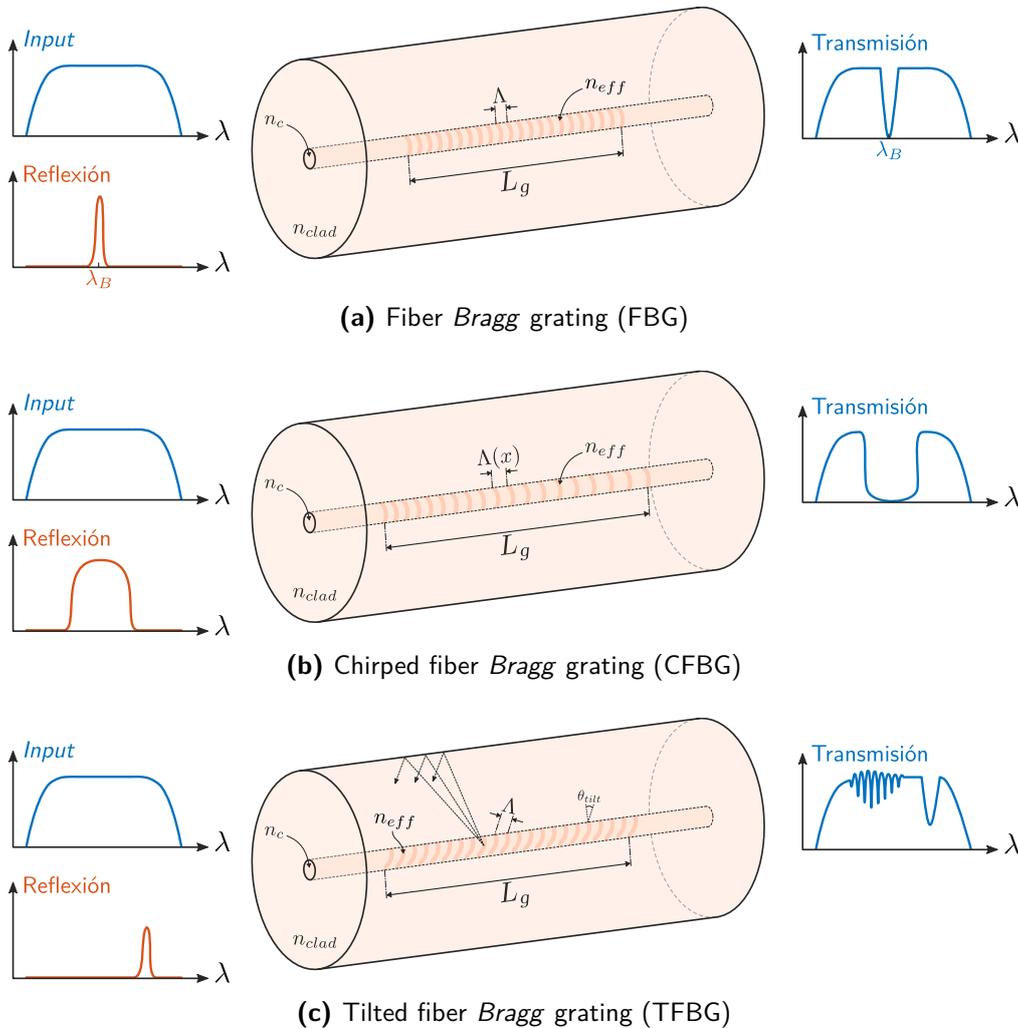
<sup>2</sup>El cambio inducido en el índice de refracción asociado a un FBG es del orden de  $10^{-3}$  (Tipo I).

<sup>3</sup>Se produce un solapamiento de las modificaciones de material generadas por cada pulso láser.

### 4.1.1. Tipos de estructuras

En la [Figura 4.2](#) se muestra una representación gráfica de las estructuras de FBG más empleadas, desde el punto de vista de la modificación generada en el índice de refracción. Adicionalmente al FBG de periodo uniforme ([Figura 4.2a](#)), ya detallado, destacan el CFBG (*Chirped FBG*) [[33](#)] ([Figura 4.2b](#)) y el TFBG (*Tilted FBG*) [[34](#)] ([Figura 4.2c](#)).

En el CFBG, la periodicidad del grating no es constante ( $\Lambda(x)$ ), lo cual implica que cada sección del grating refleja una  $\lambda_B$  diferente<sup>1</sup>. En consecuencia, el espectro resultante corresponde a la combinación de las  $\lambda_B$  de cada sección, originando una reflexión espectralmente más ancha. Por su parte, el TFBG se corresponde con un FBG cuyos patrones de modulación se encuentran inclinados un ángulo  $\theta_{tilt}$ , lo cual ocasiona el acoplo de luz en modos de cubierta<sup>2</sup> (ver espectro transmisión), reduciendo así la propagación *backward* en el núcleo (menor reflexión). Los modos de cubierta se suelen emplear para sensar cambios externos, como puede ser el índice de refracción del entorno (*SRI, Surrounding Refractive Index*).



**Figura 4.2.** Tipos de FBG en relación a la estructura del RIC inducido

<sup>1</sup>Un CFBG se puede entender como la concatenación de  $i$  FBGs uniformes.

<sup>2</sup>Si bien idealmente el FBG y el CFBG no presentarían modos de cubierta, en una inscripción real sí, dadas las imperfecciones de la estructura.

### 4.1.2. Configuraciones de grabado láser

A continuación se desarrollan las distintas formas de grabado de FBGs a través de láseres de femtosegundo: *PbP*, *LbL* y *PI-b-PI*. La eficiencia de las técnicas se incrementa desde *PbP* (más sencilla) hasta *PI-b-PI* (más compleja). Cabe destacar que, como resultado de la investigación realizada en el proyecto, se han conseguido implementar FBGs mediante las técnicas *PbP* y *LbL*, con resultados sobresalientes.

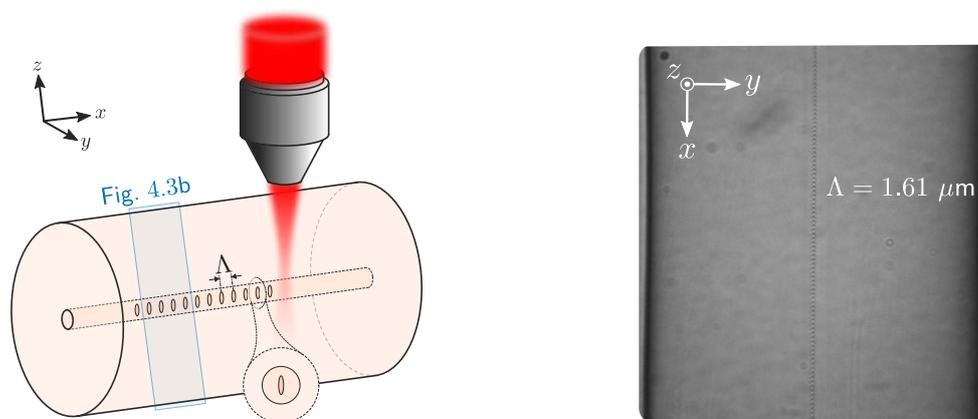
#### **Point-by-point (PbP)**

La técnica *point-by-point* (o *direct-writing*) es la forma más sencilla de realizar redes de Bragg en fibra. De acuerdo a la Figura 4.3a, consiste en trasladar la fibra a lo largo del eje  $X$  (eje longitudinal), de forma que controlando la velocidad de traslación ( $v$ ) y el PRR del láser, es posible fabricar FBGs con un periodo determinado (Figura 4.3b) [31]:

$$\Lambda = \frac{v}{\text{PRR}}$$

Esta técnica, si bien presenta una sencillez inherente al proceso de grabado, así como un tiempo de inscripción reducido, presenta dos desventajas notables:

- La estabilidad del periodo ( $\Lambda$ ) depende fuertemente de la precisión de la plataforma sobre la que se encuentra la fibra<sup>1</sup>. Típicamente, para la realización de un FBG de 5 mm en el núcleo de una fibra SMF ( $d_{\text{core}} \simeq 8.3 \mu\text{m}$ ), se requiere una precisión en el desplazamiento inferior a  $1 \mu\text{m}$ .
- Puesto que las modificaciones generadas en el patrón del FBG vienen dadas por pulsos individuales, desde una perspectiva transversal del núcleo, la sección del mismo modificada es reducida (ver Figura 4.3a), siendo dependiente del volumen focal (*spot size*) definido por la apertura numérica del objetivo. Este hecho origina una reflexión más reducida que en las técnicas *LbL* y *PI-b-PI*, y una contribución notable de modos de cubierta en transmisión<sup>2</sup>.



(a) Diagrama esquemático del proceso de inscripción (b) Captura de un FBG inscrito mediante *PbP*

**Figura 4.3.** Empleo de la técnica *point-by-point* para el grabado de FBGs en fibra

<sup>1</sup>En caso de acometer la inscripción de un *LPG* (*Long Period Grating*), este aspecto no resulta tan crítico.

<sup>2</sup>El patrón no es perfectamente simétrico, originado *back-scattering* en la fibra.

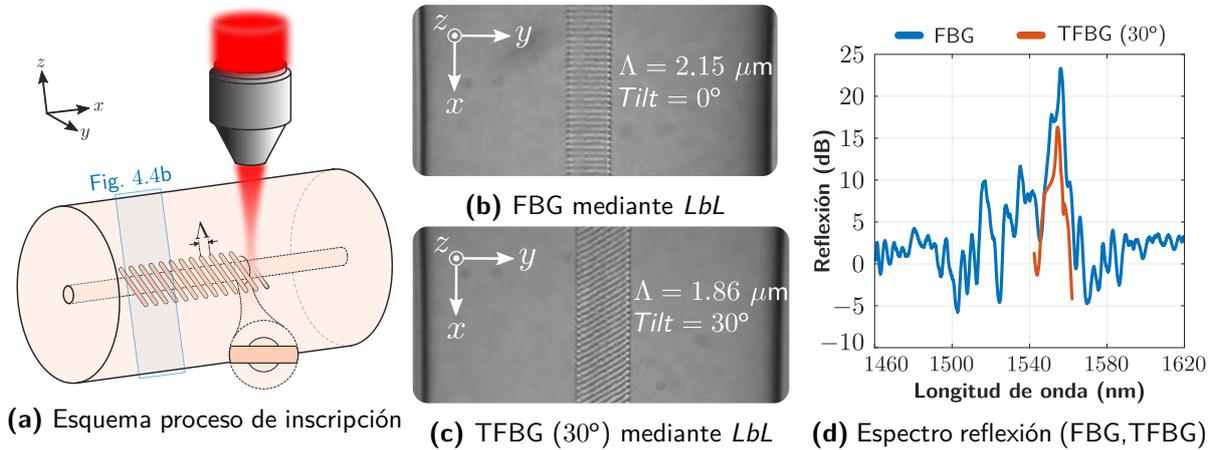
**Line-by-line (LbL)**

La técnica de grabado *LbL* presenta diferencias notables en el proceso de grabado. En este caso, como esquematiza la [Figura 4.4a](#), el grabado láser se produce en el eje *Y* (eje transversal), siendo el periodo ( $\Lambda$ ) la separación entre dos líneas consecutivas<sup>1</sup> [35, 36]. En este método, el PRR y la velocidad de inscripción (*v*) no definen el periodo, sino los pulsos/ $\mu\text{m}$  que conforman cada línea:

$$\text{pulsos}/\mu\text{m} = \text{PRR} \left[ \frac{\text{pulsos}}{\text{seg}} \right] \cdot \frac{1}{v} \left[ \frac{\text{seg}}{\mu\text{m}} \right].$$

El tiempo de inscripción es considerable con esta técnica. No obstante, la precisión necesaria no es trascendente desde el punto de vista de desplazamiento indeseado en el eje *Y*, ya que se pueden realizar líneas de mayor longitud. Como se muestra en la [Figura 4.4a](#), puesto que se realizan líneas que atraviesan el núcleo, se genera una modificación (casi) completa del mismo en su vista transversal. Esto genera una reducción de los modos de cubierta y un aumento en la potencia reflejada.

Adicionalmente, es posible realizar FBGs con inclinación (*tilt*)<sup>2</sup>, lo cual permite diseñar dispositivos más sensibles al medio externo, al excitar modos de cubierta. En la [Figura 4.4b](#) y [4.4c](#) se muestran sendas capturas de un FBG uniforme y un TFBG con 30° de *tilt* inscritos mediante la técnica *LbL*<sup>3</sup>, observando el espectro resultante en reflexión en la [Figura 4.4d](#). Obviamente, la potencia reflejada por el TFBG es más reducida, por el acoplo de modos de cubierta favorecido por el *back-scattering* (reducción de la reflexión *backward* en el núcleo). El FWHM en ambos casos es  $\sim 2.2$  nm.



**Figura 4.4.** Empleo de la técnica *line-by-line* para el grabado de FBGs en fibra

<sup>1</sup>A diferencia de *PbP*, en que es posible realizar FBGs con  $\Lambda \geq 1 \mu\text{m}$ , en *LbL* (y *PI-b-PI*) resulta inviable establecer un periodo inferior a  $\sim 2 \mu\text{m}$ . Debido a ello, se trabaja de forma genérica con el 4° armónico, o superiores.

<sup>2</sup>En este caso se tiene  $\lambda_B = \frac{2}{m} n_{eff} \frac{\Lambda}{\cos(\theta_{tilt})}$ , siendo  $\theta_{tilt}$  en ángulo de *tilt*.

<sup>3</sup>Los parámetros de inscripción de ambos son los siguientes: longitud del grating de 5 mm,  $E_p = 0.19 \frac{\mu\text{J}}{\text{pulso}}$ , PRR = 30 kHz, líneas de 1000  $\frac{\text{pulsos}}{\mu\text{m}}$ , longitud de las mismas de 15  $\mu\text{m}$  para el FBG y 20  $\mu\text{m}$  para el TFBG, y periodo  $\Lambda = 2.15 \mu\text{m}$  y  $\Lambda = 1.86 \mu\text{m}$ , respectivamente.

### Plane-by-plane (PI-b-PI)

Finalmente, el método *plane-by-plane* es una nueva técnica implementada por Theodosiou *et. al.* en 2016 [37], mediante la cual es posible inducir cambios bidimensionales en el índice de refracción. De esta forma, a diferencia del *PbP* y *LbL*, es posible generar en el núcleo planos transversales con capacidad para controlar su anchura y profundidad. Con ello, se consigue una modificación en el material que comprende la sección completa del núcleo, originando así una potencia de reflexión muy elevada, y un *scattering* muy reducido en cubierta.

Para generar dichos planos se precisa una modificación en el setup, con la colocación de una lente cilíndrica antes del objetivo [38]. En consecuencia, la forma elipsoidal o cilíndrica que presenta el volumen focal en ausencia de lente cilíndrica, se transforma en un volumen focal con forma de plano cuando se sitúa dicha lente. Puesto que cada pulso genera el plano, el proceso de inscripción se corresponde de forma exacta con el dado por el método *PbP* [39].

Finalmente, a modo de síntesis, la [Tabla 4.1](#) muestra, para múltiples parámetros concernientes a un FBG, una comparación de las tres técnicas de grabado láser, junto con el esquema tradicional que emplea una máscara de fase y un haz UV para el grabado.

**Tabla 4.1.** Comparación métodos de grabado FBGs: máscara de fase y láser fs (*PbP*, *LbL*, *PI-b-PI*)

	Máscara de fase	<i>PbP</i>	<i>LbL</i>	<i>PI-b-PI</i>
Tiempo inscripción	● ● ○	● ○ ○	● ● ●	● ● ○
Periodo grating ( $\Lambda$ )	Constante	Flexible ( $\gtrsim 1 \mu\text{m}$ )	Flexible ( $\gtrsim 2 \mu\text{m}$ )	Flexible ( $\gtrsim 2 \mu\text{m}$ )
Repetibilidad	Alta	Media	Baja	Media
<i>Chirping</i>	Sí (óptica adicional)	Sí (limitado)	Sí	Sí
<i>Tilt</i>	Sí	No	Sí	Sí
Selección del orden	No	Sí	Sí	Sí
Presencia modos cubierta	○ ○ ○	● ● ●	● ● ○	● ○ ○
Tiempo preparación <sup>a</sup>	● ○ ○	● ● ● <sup>b</sup>	● ● ●	● ● ○
Óptica necesaria	Máscara de fase	Objetivo	Objetivo	Objetivo + lente cilíndrica

<sup>a</sup> Incluye el tiempo de preparación de la fibra, su estirado y colocación en la plataforma.

<sup>b</sup> En *PbP* es clave el alineamiento de la fibra ( $< 1 \mu\text{m}$  de precisión requerida).

La utilización de láseres de femtosegundo para la inscripción de FBGs en fibra tiene extraordinarias propiedades, que se mencionan seguidamente:

- Pueden ser inscritos en fibras compuestas por diferentes materiales, sin necesidad de que estos materiales sean fotosensibles.
- Pueden operar en temperaturas superiores a 1000°C ([Sección 5.2](#)).
- Debido al perfil no sinusoidal del RI, están presentes órdenes de reflexión elevados (incluso en espectro visible y ultravioleta).
- Permite el diseño flexible de estructuras: pueden grabarse gratings en el núcleo, o en la cubierta (en combinación con guías de onda) ([Figura 4.5](#)).

## 4.2. Guías de onda

La fabricación de guías de onda en materiales ópticos en general, y más específicamente en fibras ópticas, posibilita el desarrollo de dispositivos fotónicos para múltiples aplicaciones. Tener un control espacial preciso del guiado de la luz permite fabricar, por ejemplo, guías de onda en la cubierta de la fibra (CWG, *Cladding Waveguide*) [40], que si bien no son apropiadas para aplicaciones relacionadas con las comunicaciones, dada la extrema sensibilidad que presentan con el medio externo, sí que resultan perfectas para el sensado de parámetros externos a la fibra, por ese mismo motivo. Igualmente, pueden ser utilizadas conjuntamente con los FBGs detallados anteriormente<sup>1</sup>, formando lo que se conoce como WBG (*Waveguide Bragg Grating*) [39] (Figura 4.5).

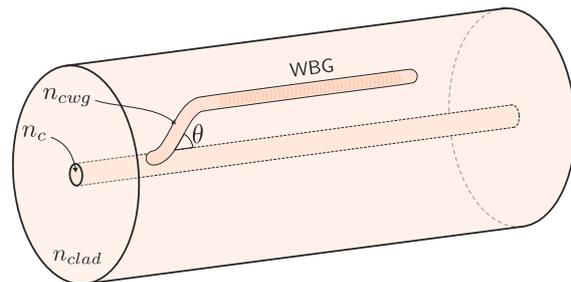


Figura 4.5. FBG situado en un CWG (WBG)

A diferencia de los FBGs, que requieren en inscripción energías de pulso altas ( $> 400$  nJ/pulso) y una PRR baja ( $\sim$  kHz), la fabricación de guías de onda precisa energías de pulso más reducidas ( $\sim 100 - 250$  nJ/pulso) en combinación con frecuencias de repetición de pulso elevadas ( $> 100$  kHz), con objeto de que exista difusión térmica, y el cambio de índice generado sea espacialmente más suave (menos pérdidas).

El empleo de dichos valores de  $E_p$  en combinación con óptica adaptativa ocasiona un cambio en el material de Tipo I, que de acuerdo al estudio realizado en la Figura 3.12, genera un cambio positivo en el índice de refracción (Tipo I  $\rightarrow$  guiado débil) (Figura 4.6a). Ahora bien, ante una exposición directa en combinación con energías de pulso más altas, tal y como se mencionó en dicho estudio, se generan estructuras cuyo volumen focal presenta un cambio de índice negativo<sup>2</sup>, así como un filamento con cambio positivo, con capacidad para guiar luz (Figura 4.6b). No obstante, en ambos casos, las pérdidas pueden ser considerables, debido a la ausencia de simetría en la estructura generada. A continuación, se presenta una técnica para subsanar dicho inconveniente.



(a) Óptica adapt. ( $E_p = 0.19 \mu\text{J}$ , PRR = 60 kHz) (b) Exp. directa ( $E_p = 1.09 \mu\text{J}$ , PRR = 120 kHz)

Figura 4.6. CWGs (*end-face*) basadas en propagación por volumen focal (a) o filamentación (b)

<sup>1</sup>Este tipo de estructuras, si se colocan periódicamente en la fibra, permiten determinar la forma tridimensional de la misma (disposición espacial de la fibra).

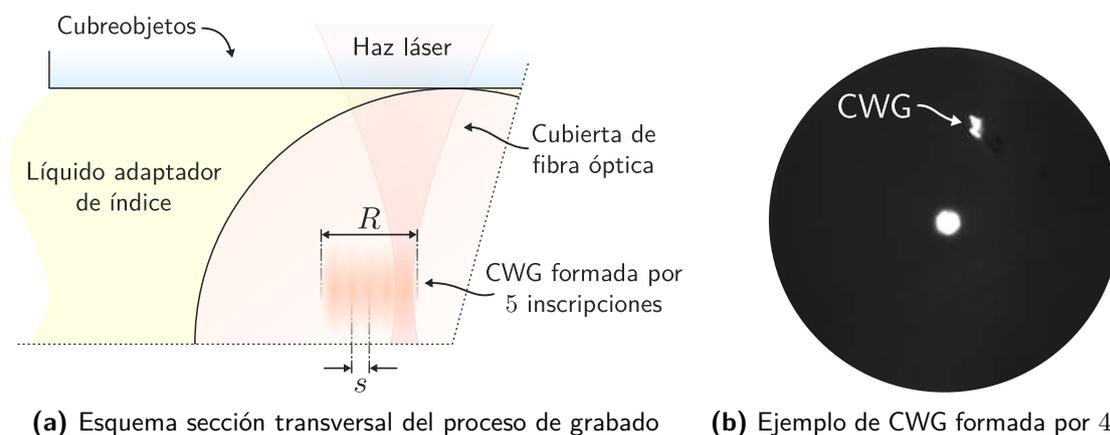
<sup>2</sup>Existen guías de onda basadas fundamentadas en estructuras con cambios de índice negativo (*depressed*-CWG) [41]. Mediante dos inscripciones con cambio de índice negativo, la luz es guiada entre ambas.

### 4.2.1. Técnica *multiscan*

Existen numerosas técnicas que permiten controlar la sección transversal de guías de onda inscritas mediante láseres ultra-rápidos [26]. Muchas de ellas se fundamentan en la modificación del haz láser en sí<sup>1</sup>, como pueden ser la técnica de enfoque espacio-temporal, técnicas basadas en óptica activa<sup>2</sup>, técnica de conformación del haz en *slit*, o incluso generar astigmatismo en el enfoque de tal forma que el volumen focal tenga la forma requerida<sup>3</sup>.

Sin embargo, existen también métodos que, sin necesidad de alterar el haz láser, permiten generar guías de onda con la sección transversal deseada desde el punto de vista geométrico. Uno de esos métodos es el que se conoce como técnica *multiscan* [39, 40], que es el que se ha empleado para la realización de guías de onda en el trabajo experimental realizado a lo largo del presente proyecto. Como se muestra en la Figura 4.7a, la guía de onda se construye realizando múltiples inscripciones paralelas (separadas una distancia radial  $s$ ) sobre el sustrato, derivando en una estructura de anchura total  $R$ . De esta forma, a partir de las líneas de material modificado inducidas por cada *scan*, es factible no sólo enmendar la asimetría asociada a la guía formada por 1 *scan*, sino también controlar el índice de refracción de la misma, tal y como se ha demostrado en los resultados detallados en la Sección 5.3.

En lo relativo al proceso de inscripción, después de cada *scan*, la fibra se mueve ligeramente (una distancia  $s$ ) en la dirección perpendicular tanto al eje longitudinal de la fibra como al eje de propagación del haz láser. En la Figura 4.7b se puede observar la sección transversal de una CWG formada por 4 *scans*, observando que se obtiene una geometría más adecuada para el guiado de luz. Dicha inscripción se ha realizado empleando óptica adaptativa con  $E_p = 0.19 \mu\text{J}$ ,  $\text{PRR} = 120 \text{ kHz}$  y  $s = 0.2 \mu\text{m}$  (4 *scans*).



**Figura 4.7.** Aplicación de la técnica *multiscan* para el grabado de CWGs con una sección transversal que presente la forma geométrica requerida (típicamente circular para reducir pérdidas)

<sup>1</sup>Este tipo de técnicas suele ser óptimo para estructuras con una geometría específica. Por ejemplo, una guía de onda inscrita mediante técnicas de conformación de haz no tendrá la misma sección transversal en un tramo recto que en una S-Bend.

<sup>2</sup>Se basan en un *SLM* (*Spatial Light Modulator*), que es un sistema formado por pequeños espejos deformables, a través del cual se modifica la forma del haz láser antes de la lente objetivo.

<sup>3</sup>A diferencia del anterior capítulo, en que se estudiaba la corrección del astigmatismo producido, para generar estructuras simétricas de guía puede ser útil.

### 4.2.2. Geometrías de acoplo en CWGs

Típicamente, centrando la atención en fibra óptica, las guías de onda que se fabrican se fundamentan en el acoplo de luz desde el núcleo a modos secundarios que se propagan por estructuras ópticas de guiado situadas en la cubierta (CWG), por los motivos ya mencionados (sensado externo, generación de interferencia, excitación de partículas en cubierta, etc). Entre las muchas estructuras existentes para el acoplo de la luz que se propaga por el núcleo hacia el tramo recto de la guía situada en la cubierta, destacan dos en la literatura existente: transición en curva S (S-Bend) (Figura 4.8a) o transición por tramo recto (Figura 4.9a). Dicha transición está caracterizada por el ángulo  $\theta$ :

$$\theta = \arctan\left(\frac{d}{L}\right), \quad (4.1)$$

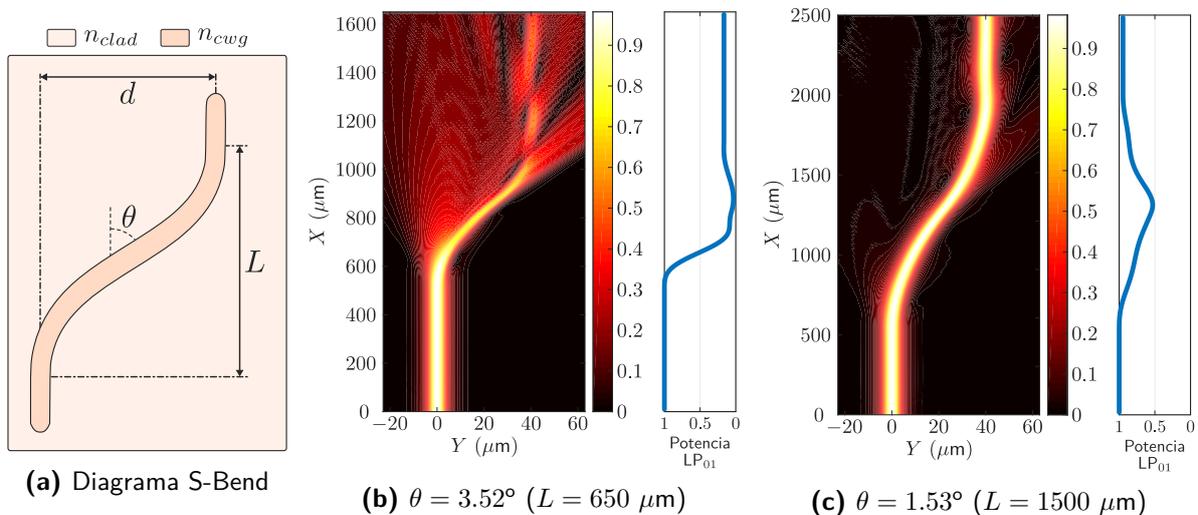
donde  $d$  hace referencia a la separación radial entre los dos tramos paralelos, y  $L$  a la distancia longitudinal de la transición.

Con objeto de evaluar el comportamiento de ambas estructuras se han realizado diversas simulaciones empleando el método de los elementos finitos (FEM, *Finite Element Method*) sobre la propagación del haz de luz por la estructura (BPM, *Beam Propagation Method*) [42]. Los parámetros que se han empleado en la simulación se indican en la Tabla 4.2.

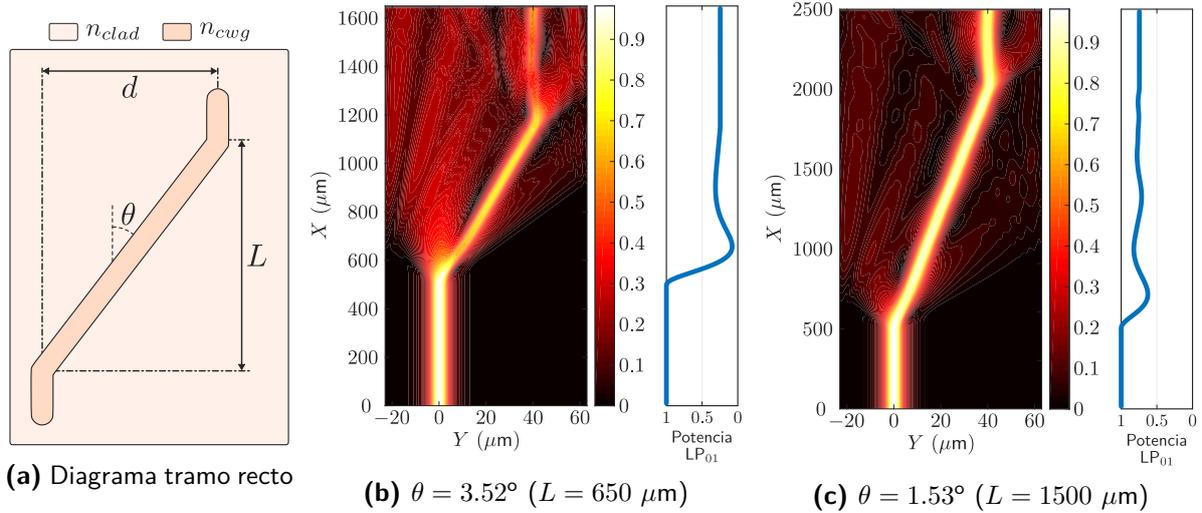
**Tabla 4.2.** Parámetros utilizados en las simulaciones, con valores realistas

$n_{clad}$	1.4661	$d$	40 $\mu\text{m}$	$R_{cwg}$ (anchura)	4 $\mu\text{m}$
$(\Delta n)_{cwg}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$L$	[250, 5500] $\mu\text{m}$	Modo excitado	LP <sub>01</sub>

Realizando un barrido de la variable  $L$  (longitud de la transición), es posible modificar el ángulo de transición de la guía ( $\theta$ ), y evaluar la transmisión de potencia en función de dicho valor para ambas estructuras. En la Figura 4.10 se muestran los resultados obtenidos.



**Figura 4.8.** Representación gráfica de la distribución espacial de potencia en una transición S-Bend

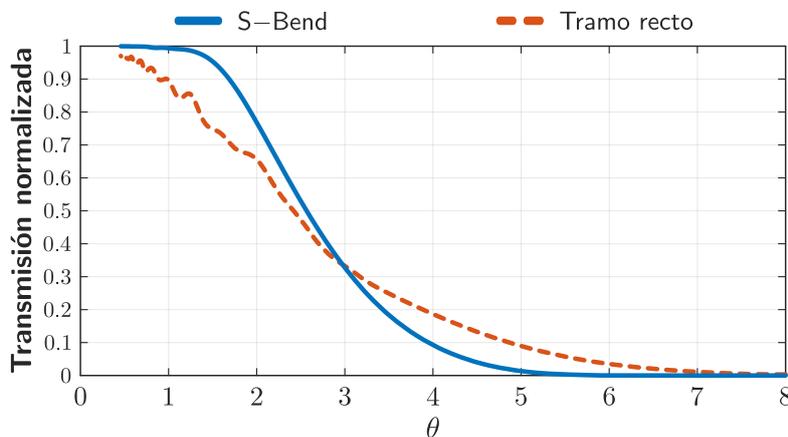


**Figura 4.9.** Representación gráfica de la distribución espacial de potencia en una transición recta

A partir de dichos resultados, se infiere una tendencia obvia, y es el hecho de que disminuyendo  $\theta$  (aumentando  $L$ ), las pérdidas son menores y, por tanto, existe mayor transmisión. No obstante, la estructura óptima en términos de potencia transmitida depende de  $\theta$ .

Para ángulos superiores a  $\sim 3^\circ$  la transición en tramo recto presenta un mejor comportamiento (Figura 4.8b vs Figura 4.9b), ya que si bien los puntos de inicio y fin de la transición presentan mayores pérdidas (transición en codo ocasiona mayores pérdidas), la S-Bend prácticamente pierde toda la potencia en el punto central de la misma, al tener una mayor pendiente en dicho punto. Por tanto, si el dispositivo óptico a diseñar presenta limitaciones en términos de tamaño, y se han de efectuar guías con transiciones pronunciadas, parece apropiado utilizar tramos rectos.

Al contrario, si no existen restricciones en las dimensiones de la estructura, y se pueden diseñar transiciones con  $\theta \lesssim 3^\circ$ , lo óptimo es emplear curvas en S (Figura 4.8c vs Figura 4.9c), ya que la transmisión que proporcionan es significativamente mejor. Del mismo modo, si bien la S-Bend tiende a la transmisión completa de potencia ( $\frac{P_{out}}{P_{in}} \simeq 1$ ) con  $\theta \simeq 1^\circ$ , el tramo recto idealmente no logra la ausencia de pérdidas (suponiendo condiciones de entorno ideales) hasta una transición prácticamente con  $\theta \simeq 0^\circ$ .



**Figura 4.10.** Transmisión ( $\frac{P_{out}}{P_{in}}$ ) de la guía de onda en función del ángulo de transición ( $\theta$ )

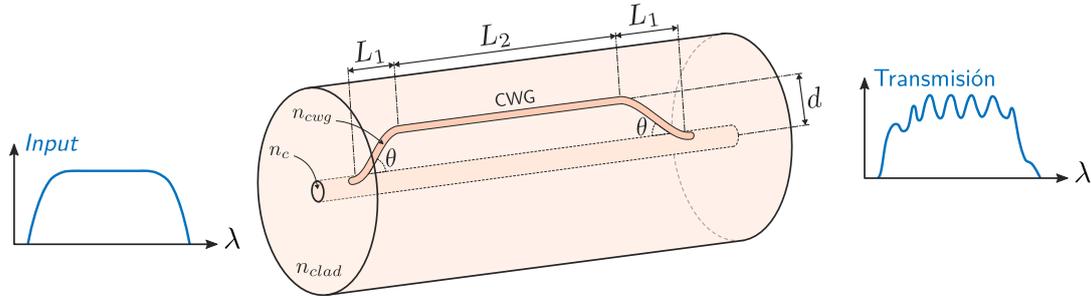
### 4.3. Interferómetro Mach-Zehnder

La fabricación de interferómetros Mach-Zehnder (MZI) en fibra óptica se realiza frecuentemente como consecuencia de su simple diseño. Como dispositivos *in-fiber*, se pueden formar a partir de cavidades de aire internas en la fibra, LPGs, micro-fibras, acoplo imperfecto del núcleo (fusión desplazada) o, como es el caso del presente trabajo, mediante CWGs basadas en el cambio de índice generado a partir de inscripciones con el láser de fs [21, 39], tal y como esquematiza la Figura 4.11.

En cualquier caso, un MZI se fundamenta en la diferencia de camino óptico (OPD, *Optical Path Difference*) que surge cuando un haz de luz se divide en dos caminos ópticos, en el que uno es tomado como referencia, y el otro actúa como elemento sensor [43]. Cuando el MZI se fabrica en una fibra óptica, se puede entender de la siguiente forma: el modo fundamental que se propaga por el núcleo (referencia) se desacopla a un modo secundario que se propaga por una CWG (elemento sensor) durante una distancia  $L \approx 2 \cdot L_1 + L_2$ , tal y como se observa en la figura, punto en el cual se acopla de nuevo al núcleo, derivado en una OPD que causa el patrón de interferencia definido por la conocida expresión

$$I \approx I_c + I_{cwg} + 2\sqrt{I_c I_{cwg}} \cos\left(\frac{2\pi(\Delta n)_{cwg} L}{\lambda} + \phi_0\right), \quad (4.2)$$

donde  $I_c$  y  $I_{cwg}$  hacen referencia a las irradiancias del núcleo y la guía de onda, respectivamente;  $L$ , como se ha especificado previamente, es la longitud de la guía de onda por donde se propaga el modo secundario,  $(\Delta n)_{cwg} = |n_c - n_{cwg}|$  se corresponde con la diferencia del índice efectivo entre ambos modos, y  $\phi_0$  es la fase inicial.



**Figura 4.11.** Esquema de un MZI basado en una CWG, con patrón de interferencia en transmisión

El espectro de transmisión tiene una forma sinusoidal (propia de un patrón de interferencia), en el que el desplazamiento de los mínimos locales<sup>1</sup>, conocidos como *dips*:

$$\lambda_{dip} = \frac{2\pi(\Delta n)_{cwg} L}{\pi(2m + 1) - \phi_0}, \quad (4.3)$$

se utiliza para cuantificar el parámetro a medir. Igualmente, el rango espectral libre<sup>2</sup> (FSR, *Free Spectral Range*) se puede controlar durante la inscripción de la guía de onda, ya que

<sup>1</sup>Los mínimos se producen cuando el  $\cos(\cdot)$  de la Ecuación 4.2 es  $-1$ . Esto sucede cuando el argumento del mismo toma valor  $(2m + 1)\pi$ , por lo que despejando se deduce la Ecuación 4.3.

<sup>2</sup>El FSR se define como la separación en longitud de onda entre dos máximos (o mínimos) locales en el espectro de transmisión.

como se indicó en el desarrollo de la técnica multiscan, los cambios inducidos en el material tras realizar varios scans modifican el índice de refracción de la CWG. Para una longitud de onda  $\lambda_0$  se tiene

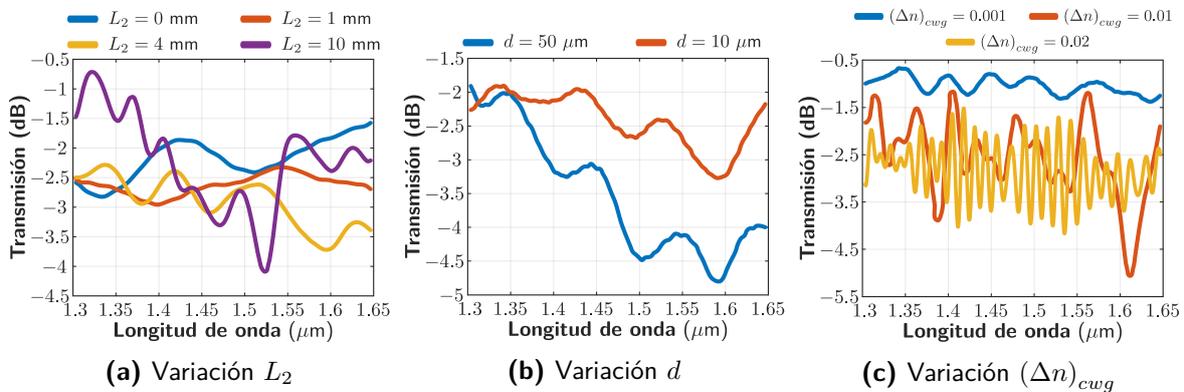
$$FSR \approx \frac{\lambda_0^2}{(\Delta n)_{cwg} L}. \quad (4.4)$$

A continuación, en base a simulaciones efectuadas mediante BPM, se evalúa el comportamiento del MZI ante la modificación de alguno de los parámetros que lo caracterizan. En concreto se establecerán variaciones en  $L_2$ ,  $d$  y  $(\Delta n)_{cwg}$ . En la siguiente subsección se contempla una modificación del diseño del MZI, con objeto de que el acoplo de potencia sea indirecto (sin contacto de la CWG con el núcleo), mediante los campos evanescentes de los modos. En la [Tabla 4.3](#) se muestran los parámetros establecidos en los cuatro tipos de simulación, mostrándose los resultados en la [Figura 4.12](#) y [4.13](#).

**Tabla 4.3.** Parámetros establecidos en los cuatro tipos de simulación

Parámetro	Variación $L_2$ (Fig. 4.12a)	Variación $d$ (Fig. 4.12b)	Variación $(\Delta n)_{cwg}$ (Fig. 4.12c)	Variación $L_{coup}^a$ (Fig. 4.14)
$n_{clad}$	1.4661	1.4661	1.4661	1.4661
$n_c$	1.4711	1.4711	1.4711	1.4711
$(\Delta n)_{cwg}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	{0.001, 0.01, 0.02}	$5 \cdot 10^{-3}$
$R_{clad}$ (diám. cubierta)	125 $\mu\text{m}$	125 $\mu\text{m}$	125 $\mu\text{m}$	125 $\mu\text{m}$
$R_c$ (diám. núcleo)	8.3 $\mu\text{m}$	8.3 $\mu\text{m}$	8.3 $\mu\text{m}$	8.3 $\mu\text{m}$
$R_{cwg}$ (anchura CWG)	4 $\mu\text{m}$	4 $\mu\text{m}$	4 $\mu\text{m}$	4 $\mu\text{m}$
$L_1$	1.25 mm	1.25 mm	1.25 mm	1.25 mm
$L_2$	{0, 1, 4, 10} mm	4 mm	4 mm	4 mm
$L_{coup}^a$	20 $\mu\text{m}$	20 $\mu\text{m}$	20 $\mu\text{m}$	{0, 100, 250, 500, 1000} $\mu\text{m}$
$d$	40 $\mu\text{m}$	{10, 50} $\mu\text{m}$	40 $\mu\text{m}$	40 $\mu\text{m}$
$d_{coup}^a$	0 $\mu\text{m}$	0 $\mu\text{m}$	0 $\mu\text{m}$	7 $\mu\text{m}$

<sup>a</sup> Estos parámetros, asociados con el acoplo por campos evanescentes, se definen posteriormente.



**Figura 4.12.** Resultados correspondientes a las simulaciones para variaciones de  $L_2$ ,  $d$  y  $(\Delta n)_{cwg}$

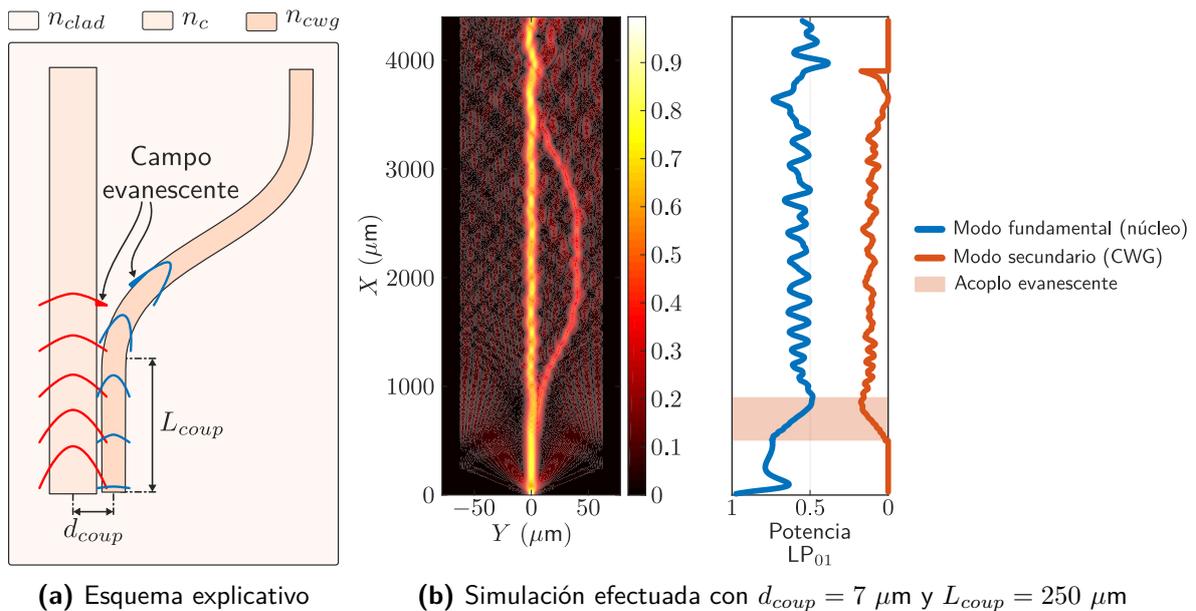
De acuerdo a la [Ecuación 4.4](#), es evidente que un incremento en la longitud de la CWG (modo secundario) ( $L_2$ ) o en la diferencia de índice efectivo entre modos ( $(\Delta n)_{cwg}$ ) ocasiona

una reducción en el rango espectral libre, como se puede observar en la [Figura 4.12a](#) ( $L_2$ ) y, de forma manifiesta, en la [Figura 4.12c](#) ( $(\Delta n)_{cwg}$ ). De esta forma, durante la inscripción de la guía de onda mediante la técnica multiscan, ya que el número de scans determina el cambio inducido en el índice de refracción de la CWG, es posible controlar las propiedades del MZI en lo que respecta al FSR. Por su parte, en la [Figura 4.12b](#) se varía la separación radial entre el núcleo y el tramo central de la CWG paralelo al núcleo ( $d$ ), observando como una mayor separación ocasiona una reducción de las pérdidas. Esto puede deberse a que distancias pequeñas inducen acoplos mutuos entre núcleo y CWG (y viceversa), pudiendo reducir la potencia transmitida.

### 4.3.1. Acoplo evanescente

Las simulaciones realizadas anteriormente, así como la mayoría de diseños de MZIs existentes en la literatura, se basan en un acoplo de luz directo, esto es, la guía de onda que propaga el modo secundario está físicamente en contacto con el núcleo, que propaga el modo fundamental. No obstante, el acoplo de luz puede ser realizado de forma indirecta, sin contacto físico entre la CWG y el núcleo [39, 44].

Dicho acoplo tiene lugar en base a los campos evanescentes de los modos presentes en el núcleo. Debido a las discontinuidades de campo existentes (condiciones de contorno) en la interfase núcleo – cubierta, el campo no es nulo en la cubierta. En definitiva, la potencia óptica no está totalmente confinada en el núcleo, sino que existe una parte (decaimiento exponencial en cubierta) que se propaga en sus proximidades, pero ya en la cubierta, y que se conoce como campo evanescente. Esto puede ser aprovechado para acoplar luz a la guía de onda, tal y como se esquematiza en la [Figura 4.13a](#), donde  $d_{coup}$  es la separación radial entre núcleo y CWG<sup>1</sup>, y  $L_{coup}$  la longitud del tramo de acoplo (paralelo al núcleo).

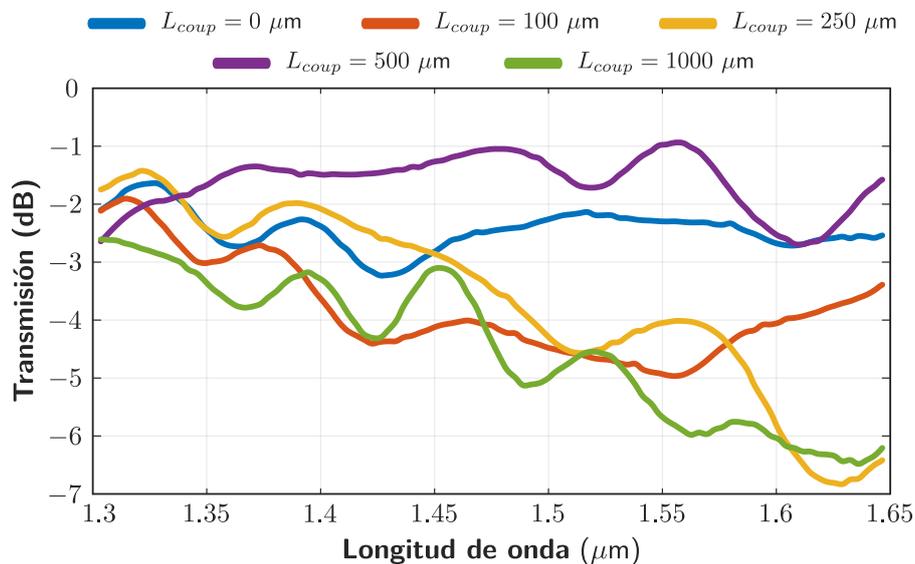


**Figura 4.13.** Acoplo óptico mediante campo evanescente

<sup>1</sup>Para que no exista contacto,  $d_{coup}$  ha de ser superior a  $\frac{R_c + R_{cwg}}{2}$ , definiendo  $d_{coup}$  como muestra la [Figura 4.13a](#).

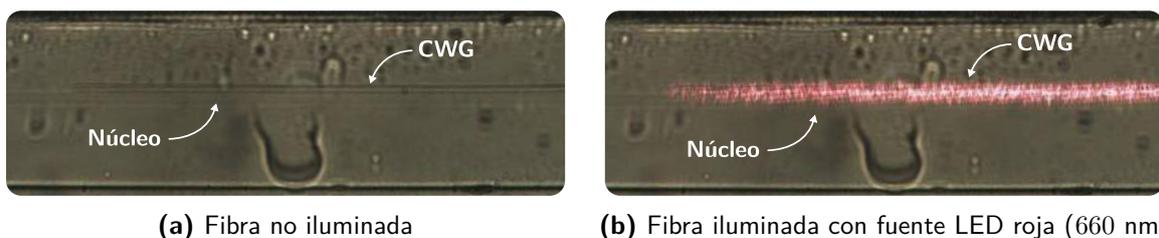
En la [Figura 4.13b](#) se muestran los resultados asociados a una simulación con  $d_{coup} = 7 \mu\text{m}$  y  $L_{coup} = 250 \mu\text{m}$ , siendo el resto de parámetros los especificados en la última columna de la [Tabla 4.3](#). Se puede observar de forma explícita cómo durante el tramo de acoplo parte de la potencia que se propaga por el núcleo (modo fundamental) pasa a la CWG (modo secundario), generando el patrón de interferencia en la estructura. La gran ventaja de emplear este tipo de acoplo óptico se cimenta en la disminución drástica de las pérdidas en la estructura, al no inducir ningún cambio físico con el láser sobre el núcleo.

Otro aspecto a destacar es que, como se muestra en la [Figura 4.14](#), una mayor longitud del tramo de acoplo ( $L_{coup}$ ) no implica una mayor potencia óptica en la guía de onda, ya que, de la misma forma que puede acoplarse potencia del núcleo a la CWG, puede darse el caso de que  $L_{coup}$  presente un valor tal que la potencia acoplada a la CWG retorne nuevamente al núcleo. Por consiguiente, si se precisa utilizar el acoplo evanescente se ha de determinar el valor de  $L_{coup}$  óptimo para acoplar a la CWG la potencia óptica requerida.



**Figura 4.14.** Simulación correspondiente a la variación de  $L_{coup}$  (0, 100, 250, 500 y 1000  $\mu\text{m}$ )

Finalmente, en la [Figura 4.15](#) se muestran imágenes capturadas con un microscopio de transmisión de una inscripción real con el láser de fs correspondiente a una S-Bend con el tramo de acoplo sin estar en contacto físico con el núcleo, esto es, utilizando el campo evanescente para el acoplar luz<sup>1</sup>. Se observa que la luz presente en la guía aumenta durante el tramo de acoplo.



**Figura 4.15.** CWG inscrita basada en acoplo evanescente (captura con microscopio de transmisión)

<sup>1</sup>Cabe destacar que la luz que se observa en la imagen se debe a pérdidas en la guía de onda.

# 5

## Sensores in-fiber

---

<b>5.1</b>	<b>FBGs en alta temperatura</b>	<b>55</b>
<b>5.2</b>	<b>Sensor de curvatura 2D en fibra multinúcleo</b>	<b>60</b>
5.2.1	Diseño y fabricación del sensor	60
5.2.2	Caracterización de la estructura	61
5.2.3	Sensado de curvatura en 2D	63
<b>5.3</b>	<b>MZI híbrido para sensado multi-parámetro</b>	<b>65</b>
5.3.1	Diseño y fabricación del sensor	66
5.3.2	Caracterización de la estructura	67
5.3.3	Sensado multi-parámetro	71

---

**E**ste capítulo contiene las principales contribuciones derivadas del trabajo realizado en dispositivos sensores en fibra. A partir del contenido detallado en los anteriores capítulos se acomete la fabricación de micro-estructuras en diferentes tipos de fibras ópticas, con objeto de poder detectar variaciones en diversos parámetros físicos o químicos.

La [Sección 5.1](#) comprende, más allá del diseño de un sensor de temperatura, el estudio del comportamiento de FBGs en fibra cuando esta se somete a temperaturas muy elevadas.

Por su parte, la [Sección 5.2](#) comprende el diseño y fabricación de una estructura óptica capaz de detectar la curvatura de la fibra, y la dirección en que se produce. En definitiva, mediante la combinación de FBGs y una fibra multinúcleo, se consigue detectar cualquier tipo de flexión bidimensional.

Finalmente, la [Sección 5.3](#) engloba la contribución y el estudio más sustancial de los llevados a cabo durante el proyecto, ya que incluye la práctica totalidad de conceptos desarrollados anteriormente, tanto desde el punto de vista de técnicas de caracterización, como de las estructuras inscritas en la fibra. Se fabrica un sensor de dimensiones reducidas capaz de discriminar parámetros físico-químicos como temperatura, curvatura, strain e índice de refracción ambiente, siendo incluso capaz de sensar simultáneamente dos de ellos con elevada precisión.

## 5.1. FBGs en alta temperatura

Esta sección tiene por objetivo presentar brevemente el comportamiento de FBGs inscritos en fibra MMF (*Multi-Mode Fiber*) con alta temperatura, esto es, por encima de 700–800 °C. Parte de los resultados expuestos se han incluido en el paper de conferencia nacional [RLP9].

Inicialmente se trabaja con una fibra MMF con recubrimiento de cobre<sup>1</sup> (además de una fina capa de carbono<sup>2</sup> entre ambas), con la geometría mostrada en la Figura 5.1. Para el grabado se emplea el proceso de inscripción *in-fiber* con óptica adaptativa (Figura 3.10), y por medio del método *PbP* se inscribe un FBG de longitud  $L_g = 5$  mm con una energía de pulso de 0.47  $\mu$ J (RIC de Tipo I), un PRR de 20 Hz, y un periodo  $\Lambda = 1.065$   $\mu$ m, generando el segundo armónico del FBG en la 3ª ventana de comunicaciones ópticas, concretamente  $\lambda_B = 1562.8$  nm (2º armónico). Los espectros de reflexión (con cada incremento de 1 mm de  $L_g$ ) y transmisión resultantes se indican en la Figura 5.2.

Cabe destacar que de forma previa al grabado láser, resulta necesario eliminar el recubrimiento de cobre de la fibra<sup>3</sup>, para lo cual se sumerge la misma (únicamente la zona donde se inscribe) en una disolución de ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) al 40% durante  $\sim 5$  min.

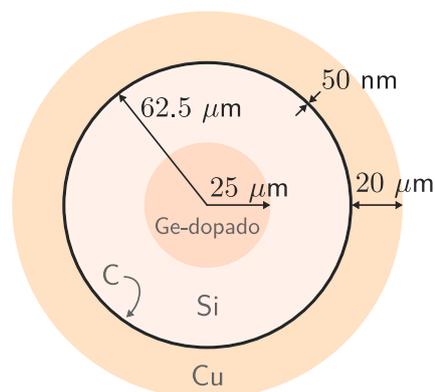
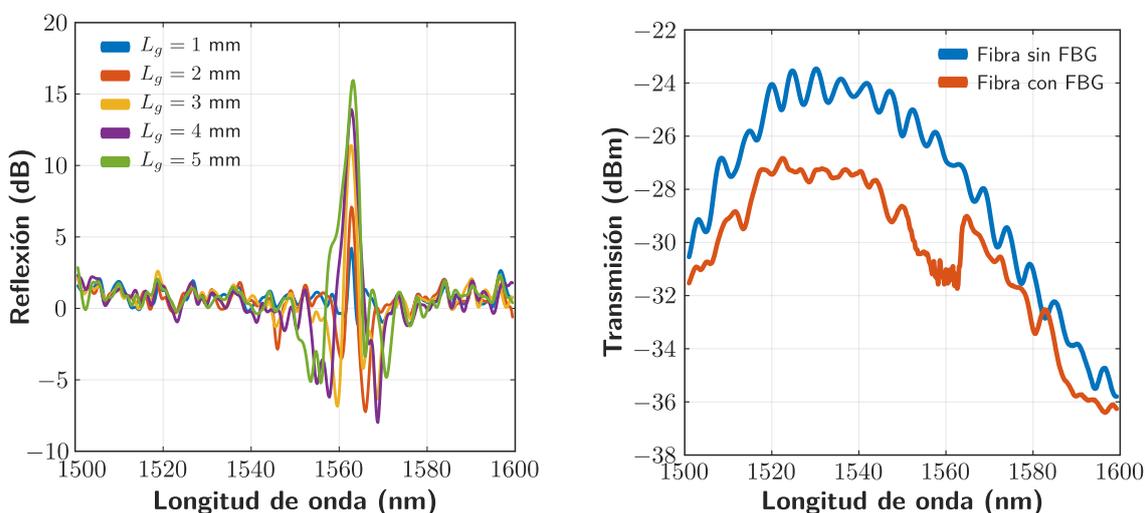


Figura 5.1. Diagrama de la sección transversal de la fibra empleada



(a) Espectro de reflexión conforme aumenta  $L_g$  (b) Espectro de transmisión sin y con el FBG grabado

Figura 5.2. Caracterización del FBG en la fibra MMF recubierta de cobre

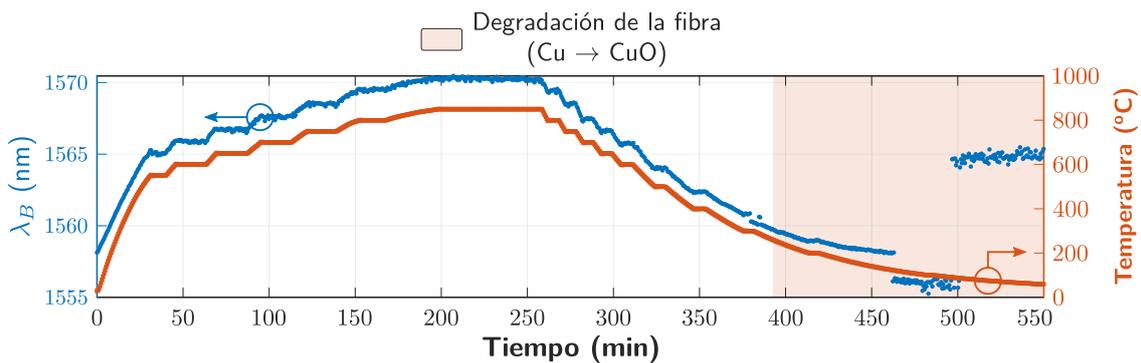
<sup>1</sup>Con objeto de soportar temperaturas elevadas se emplean recubrimientos metálicos (el recubrimiento plástico de las fibras se carboniza en  $\sim 300$  °C), siendo los más típicos Al, Cu y Au. No obstante, tienen desventajas asociadas: el aluminio tiene el punto de fusión en 660 °C (además, reacciona con la fibra a partir de  $\sim 400$  °C); el cobre y el oro, si bien tienen el punto de fusión por encima de 1000 °C, presentan también inconvenientes (Cu se oxida a partir de  $\sim 300$  °C, y Au presenta atenuación variable con la temperatura) [45].

<sup>2</sup>Esta capa actúa como una barrera protectora contra la inclusión de hidrógeno en el núcleo de la fibra.

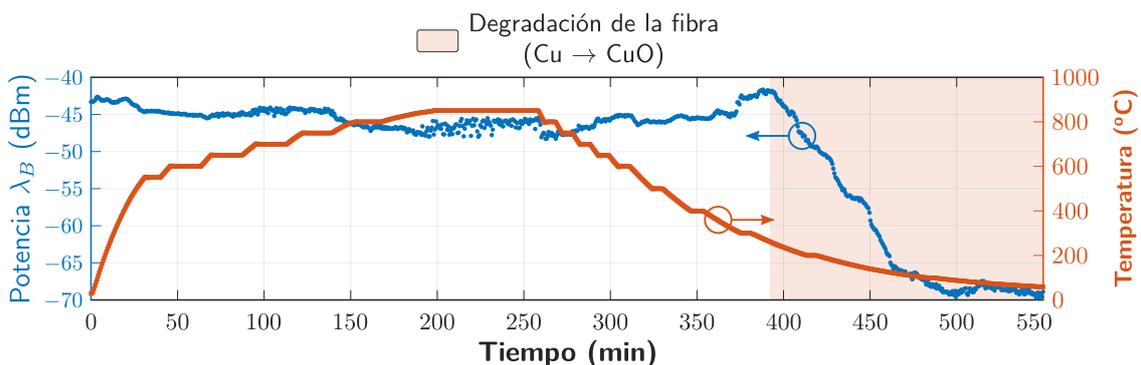
<sup>3</sup>No se ha realizado un estudio del procesado láser en materiales metálicos.

Típicamente, los FBGs de Tipo I–UV se borran completamente a 600 – 800 °C [46], por lo que no es adecuado para aplicaciones de alta temperatura. No obstante, como se muestra a continuación, mediante el láser de femtosegundo se pueden inducir modificaciones permanentes en el material capaces de soportar temperaturas más altas. En particular, las modificaciones de Tipo I asociadas a grabados con láser de fs, como la efectuada, son muy atractivas para la inscripción de FBGs, ya que pueden producir cambios suaves en el índice de refracción capaces de resistir temperaturas de hasta 1000 °C, o incluso superiores.

El ciclo de temperatura realizado a la fibra es el que se muestra en las gráficas correspondientes a la Figura 5.3 (color naranja), en el que se sube de forma directa a 550 °C, y a partir de ahí en pasos de 50 °C hasta alcanzar los 850 °C. Se observa como el desplazamiento de la longitud de onda de Bragg sigue una correlación exacta con la temperatura. Asimismo, la potencia de dicha  $\lambda_B$  decrece al aumentar la temperatura, con una fluctuación relativamente significativa en temperaturas elevadas (850 °C). Puesto que se ha realizado un ciclo de temperatura en sentido ascendente, y en sentido descendente (para volver a temperatura ambiente), se ha caracterizado la histéresis de ambos parámetros, mostrándose los mismos en la Figura 5.4, observando que presentan un comportamiento semejante tanto en el ciclo de subida como en el de bajada, sobre todo el desplazamiento de  $\lambda_B$ .



(a) Variación de  $\lambda_B$  durante el ciclo

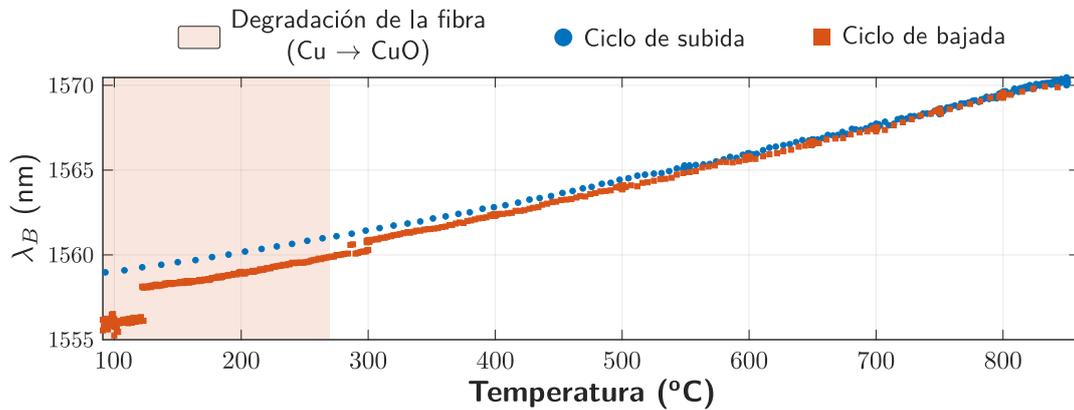


(b) Variación de la potencia de  $\lambda_B$  durante el ciclo

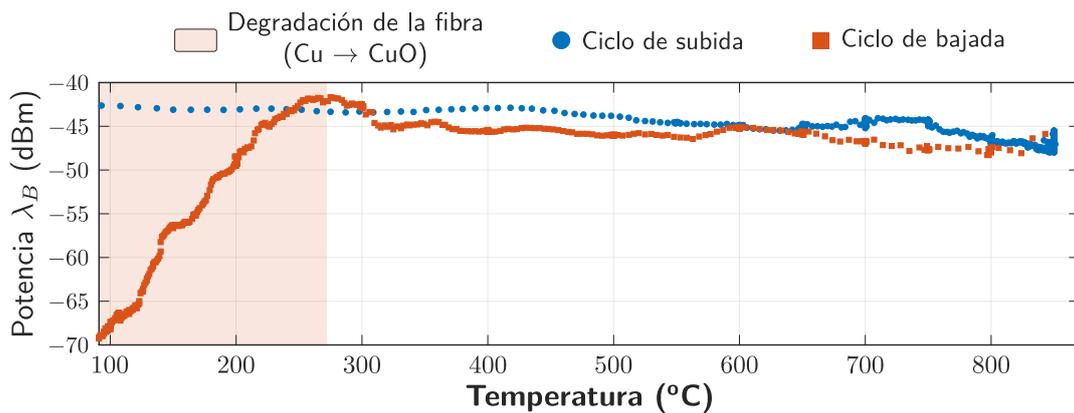
**Figura 5.3.** Ciclo de temperatura realizado sobre el FBG inscrito en la fibra de cobre

No obstante, en las gráficas presentadas se puede comprobar que, en el ciclo de bajada, a partir de 275 °C, se produce una degradación en el comportamiento de la fibra que deriva en una disminución drástica de la potencia reflejada, haciendo inviable operar nuevamente con dicha estructura como sensor. Esto se debe a la diferencia existente entre los coeficientes

de dilatación del cobre y el silicio, más bajo este último: cuando aumenta la temperatura, el cobre se dilata más que el silicio, por lo que el cobre deja de oprimir la fibra, reduciendo así las pérdidas. Sin embargo, al bajar la temperatura, el cobre comprime la fibra, por lo que la importancia de las micro-curvaturas empieza a ser notable y las pérdidas se disparan. Asimismo, la oxidación del cobre produce un incremento en las pérdidas de la fibra.

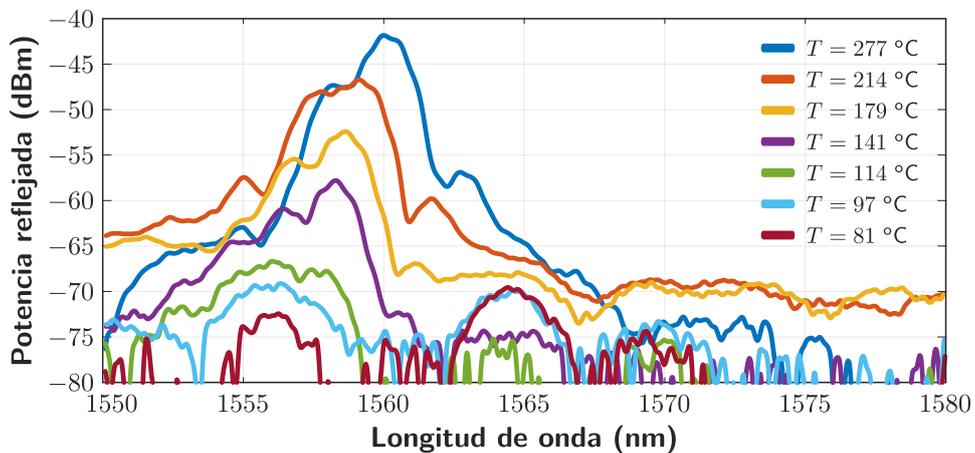


(a)  $\lambda_B$  durante los ciclos de subida y bajada



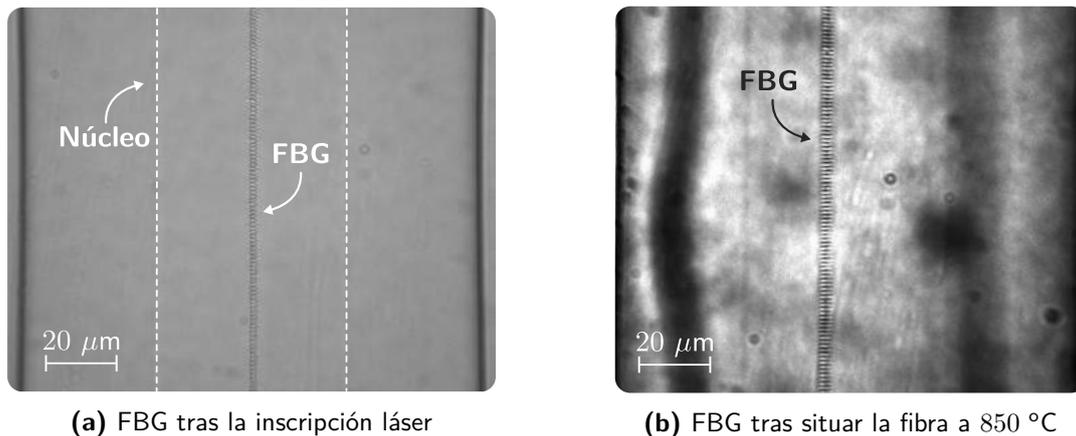
(b) Potencia de  $\lambda_B$  durante los ciclos de subida y bajada

**Figura 5.4.** Evaluación de la histéresis durante el ciclo de temperatura realizado



**Figura 5.5.** Visión explícita de la degradación de la fibra en el ciclo de bajada (desaparición de  $\lambda_B$ )

Todo lo mencionado hace que la fibra pierda sus propiedades mecánicas y, pueda incluso llegar a romperse. En la [Figura 5.5](#) se muestra este efecto, observando cómo disminuye la potencia correspondiente a  $\lambda_B$  en el ciclo de bajada hasta enmascarse con el ruido. Esta degradación en el comportamiento de la fibra no tiene analogía con el estado del FBG tras el ciclo de temperatura, ya que este, tal y como muestra la imagen de la [Figura 5.6b](#), se encuentra presente en la fibra (no se ha borrado).



**Figura 5.6.** Estado del FBG antes y después del ciclo de temperatura de la [Figura 5.3](#)

Seguidamente, con objeto de evitar los problemas derivados de la oxidación del cobre, se acomete el estudio de FBGs en fibra MMF normal, sin ningún tipo de recubrimiento, esto es, sin la capa de carbono y sin el recubrimiento metálico<sup>1</sup>. En un régimen normal de operación, sería inviable emplear fibras ópticas sin protección. No obstante, puesto que en este caso únicamente se pretende evaluar la resistencia de los FBGs de Tipo I fabricados con láser de fs, y no se somete la fibra a múltiples ciclos de temperatura, se puede utilizar la misma sin ningún tipo de protección.

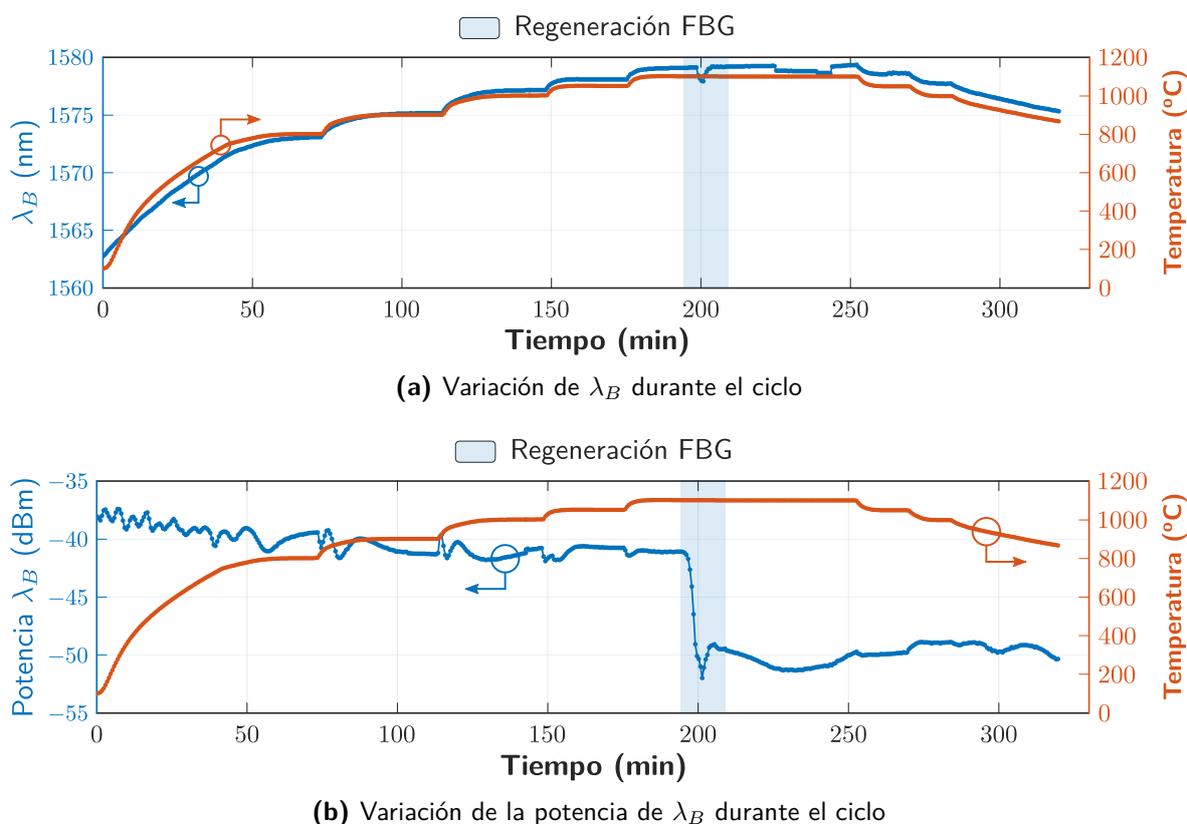
Inicialmente, se realiza sobre la fibra un ciclo de curado (*annealing*) caracterizado por un perfil de temperatura similar al dispuesto en la [Figura 5.3](#). El *annealing* consiste en realizar un tratamiento térmico<sup>2</sup> a la fibra, cuya finalidad es reestructurar la disposición molecular, eliminando por ejemplo el estrés interno y, de forma genérica, alterando las propiedades físicas de la fibra para mejorar su comportamiento desde el punto de vista térmico [46].

Una vez realizado, se acomete un segundo ciclo de temperatura en el que ya se sube la fibra a 1100 °C. El perfil tiempo-temperatura es el que se muestra en la [Figura 5.7](#): se sube a 800 °C directamente, alcanzando dicho valor tras  $\sim 1$  hora, posteriormente tras 10 min a dicha temperatura<sup>3</sup>, se sube a 900 °C, manteniéndose 20 min a dicho valor. Seguidamente, se mantiene la fibra 15 min a 1000 °C, y 20 min a 1050 °C, hasta alcanzar los 1100 °C, permaneciendo estable en dicho valor durante 70 min.

<sup>1</sup>Cabe destacar que, si bien no se recogen resultados en este documento, se está evaluando el comportamiento de FBGs en fibra con recubrimiento de oro, con objeto de tener la capacidad de realizar un sensado híbrido (distribuido y puntual).

<sup>2</sup>Típicamente, los ciclos de *annealing* se realizan en cámaras climáticas (con control de temperatura y humedad), y pueden tener una duración de días.

<sup>3</sup>La fibra se mantiene un periodo de tiempo en puntos de temperatura intermedios con objeto de no someter a la fibra a un choque (o colapso) térmico.



**Figura 5.7.** Ciclo de temperatura realizado sobre el FBG inscrito en una fibra MMF (sin protección)

En la [Figura 5.7](#) se representan las variaciones de  $\lambda_B$  y su potencia asociada, durante el ciclo térmico realizado. Se puede observar que, en contraposición a la [Figura 5.3](#), la potencia presenta fluctuaciones más notables durante el ciclo de subida<sup>1</sup>. No así la longitud de onda de Bragg, que exhibe una correlación elevada.

No obstante, mientras la temperatura está fija a 1100 °C, se puede observar que hay un punto en que la potencia decae hasta situarse en niveles de ruido, para seguidamente recobrar un nivel de potencia que, a partir de dicho punto, mantiene una correspondencia notable con la temperatura<sup>2</sup>. Igualmente, en dicho punto se tiene una pequeña variación en la  $\lambda_B$  asociada. Esto se corresponde con la regeneración del FBG (RFBG, *Regenerated Fiber Bragg Grating*).

La regeneración del FBG se debe a modificaciones estructurales a nivel molecular del material que, como se observa, son consecuencia del historial térmico del mismo. Sin embargo, su explicación teórica se fundamenta en conceptos relativamente complejos [47], por lo que no se incluirá en el presente documento. Únicamente se pretende mostrar la capacidad de inducir la regeneración de FBGs, y lo que es más importante, que estos, a diferencia de los fabricados mediante máscara de fase-UV, se ha demostrado que son capaces de resistir temperaturas de hasta 1100 °C.

<sup>1</sup>Hay que subrayar nuevamente que la fibra ya ha sido sometida previamente a un ciclo de temperatura.

<sup>2</sup>Esto difiere con las fluctuaciones observadas durante el ciclo de subida.

## 5.2. Sensor de curvatura 2D en fibra multinúcleo

La presente sección expone el contenido presente en el paper de conferencia internacional [RPR4], así como en el paper de conferencia nacional [RPR8]. Se presenta el uso del láser de femtosegundo para el desarrollo de un sensor de curvatura bidimensional mediante la inscripción de FBGs en una fibra MCF<sup>1</sup> (Multicore Fiber) compuesta por 4 núcleos (Fibercore SM-4C1500).

El sensor presentado en esta sección puede ser considerado como un primer prototipo sobre el que mejorar la eficiencia de cada uno de los cuatro núcleos desde el punto de vista de aplicación, de forma que pueda ser empleado en el ámbito médico, específicamente en procedimientos de cateterismo. En el siguiente capítulo, relativo a líneas futuras, se aborda esta mejora del sensor.

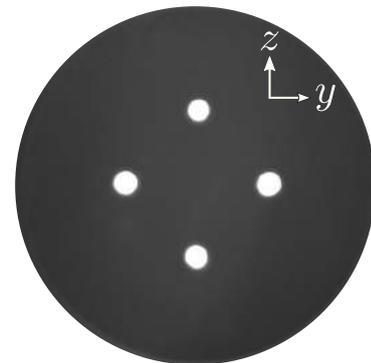
### 5.2.1. Diseño y fabricación del sensor

En primer lugar, es importante destacar que el uso de fibras multinúcleo permite corregir los problemas de sensibilidad cruzada asociados a la discriminación de diferentes parámetros de forma simultánea. En este caso, no se pretende sensor múltiples parámetros, sino detectar la curvatura en dos ejes<sup>2</sup>, aprovechando las características de la fibra.

El sensado de curvatura se ve mejorado con una fibra multinúcleo que incorpora FBGs en sus núcleos, ya que una flexión de la fibra ocasiona un estiramiento en un núcleo (aumento asociado en  $\Lambda$ ) y un acortamiento en el opuesto (reducción asociada en  $\Lambda$ ). De esta forma, con cuatro núcleos dispuestos como indica el *end-face* de la Figura 5.8, es factible discriminar cualquier tipo de flexión producida en el plano  $YZ$ .

La principal desventaja que presentan este tipo de fibras está relacionada con el acoplo óptico en sus núcleos. No obstante, y esta es la gran novedad que presenta el diseño efectuado, no se pretende acoplar de forma óptima la luz en los núcleos, ya que es la propia variación de potencia acoplada (y posteriormente reflejada) la que se aprovecha para determinar el parámetro a medir.

En lo que respecta al diseño del sensor, se tienen cuatro FBGs de longitud 4 mm, siendo inscritos en cada uno de los núcleos de la MCF, los cuales presentan un diámetro de  $8 \mu\text{m}$ , y una separación entre núcleos consecutivos de  $36.25 \mu\text{m}$ . Dicho tramo de MCF procesado, con una longitud de  $\sim 4.1 \text{ mm}$ , ha sido fusionado previamente a una fibra MMF con diámetros de núcleo y cubierta,  $50 \mu\text{m}$  y  $125 \mu\text{m}$ , respectivamente (Figura 5.10). De esta forma, los núcleos de la MCF no están acoplados de forma completa al núcleo de la MMF. El esquema

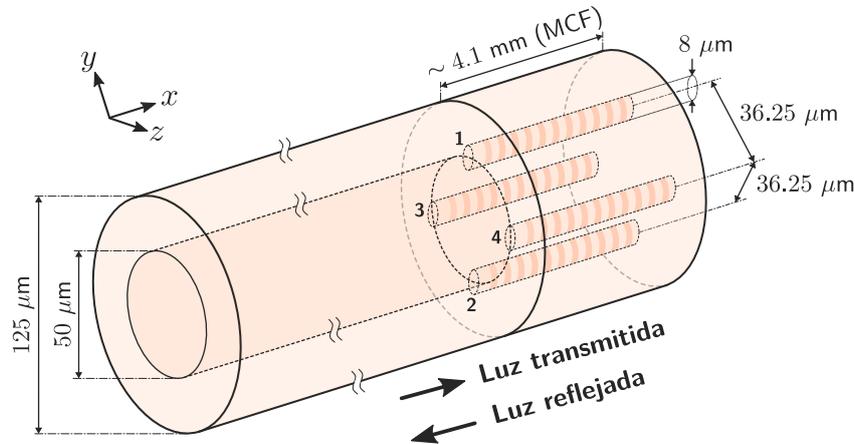


**Figura 5.8.** *End-face* (iluminado) de la Fibercore SM-4C1500 (4 núcleos)

<sup>1</sup>Una fibra MCF es aquella compuesta por múltiples núcleos (2 o más).

<sup>2</sup>Implícitamente, consiste en detectar dos parámetros (aunque se correspondan con la misma magnitud física).

correspondiente al sensor se muestra en la [Figura 5.9](#).

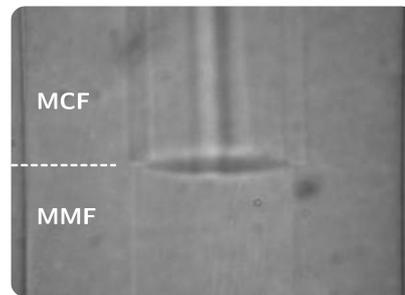


**Figura 5.9.** Diagrama esquemático con dimensiones de la sección del sensor

En cuanto al proceso de grabado, se ha empleado el setup correspondiente a la inscripción de tipo *in-fiber* empleando óptica adaptativa ([Figura 3.10](#)), y los FBGs se han fabricado mediante el método de inscripción *PbP*<sup>1</sup>, con una longitud de los gratings de  $L_g = 4$  mm, una energía de pulso de  $0.47 \mu\text{J}$ , y un PRR de 20 Hz. Con objeto de distinguir la potencia reflejada de cada núcleo, los FBGs se han inscrito con diferente periodo, todos ellos en la 3ª ventana de telecomunicaciones (empleando el 2º orden). El periodo ( $\Lambda$ ), la longitud de onda de Bragg ( $\lambda_B$ ) de los FBGs de cada núcleo<sup>2</sup>, y la velocidad de inscripción ( $v$ ) se muestran en la [Tabla 5.1](#).

**Tabla 5.1.** Periodo, velocidad de inscripción y longitud de onda de Bragg de cada FBG

#núcleo	$\Lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	$v$ ( $\mu\text{m/s}$ )	$\lambda_B$ (2º orden)
1	1.063	21.26	1531.7 nm
2	1.076	21.52	1550.5 nm
3	1.069	21.38	1540.8 nm
4	1.083	21.66	1560.5 nm



**Figura 5.10.** Fusión entre MCF y MMF (acoplo imperfecto de núcleos)

## 5.2.2. Caracterización de la estructura

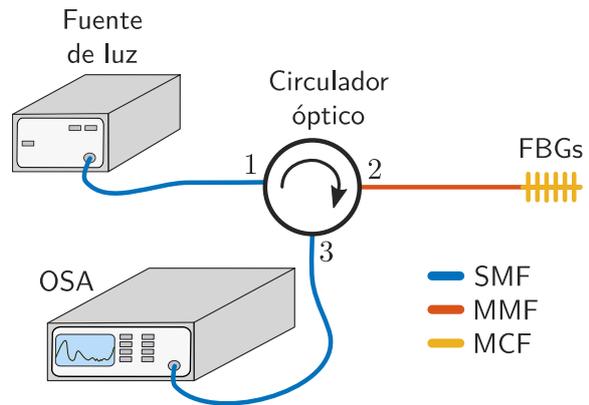
La caracterización de la estructura de FBGs se ha llevado a cabo durante la inscripción. Para ello se utiliza un circulador óptico de banda ancha (1460 – 1620 nm). Al puerto 1 del mismo se conecta una fuente de luz de banda ancha<sup>3</sup> (HP 83437A), al puerto 2 la fibra

<sup>1</sup>El tiempo de inscripción y, por tanto, el tiempo de fabricación del sensor, se reduce frente al empleo de la técnica *LbL*.

<sup>2</sup>Se ha de tener en cuenta que los núcleos 1 y 2, así como los 3 y 4, son aquellos que se encuentran enfrentados, como se muestra en la [Figura 5.9](#). La separación entre los mismos es de  $51.2 \mu\text{m}$ .

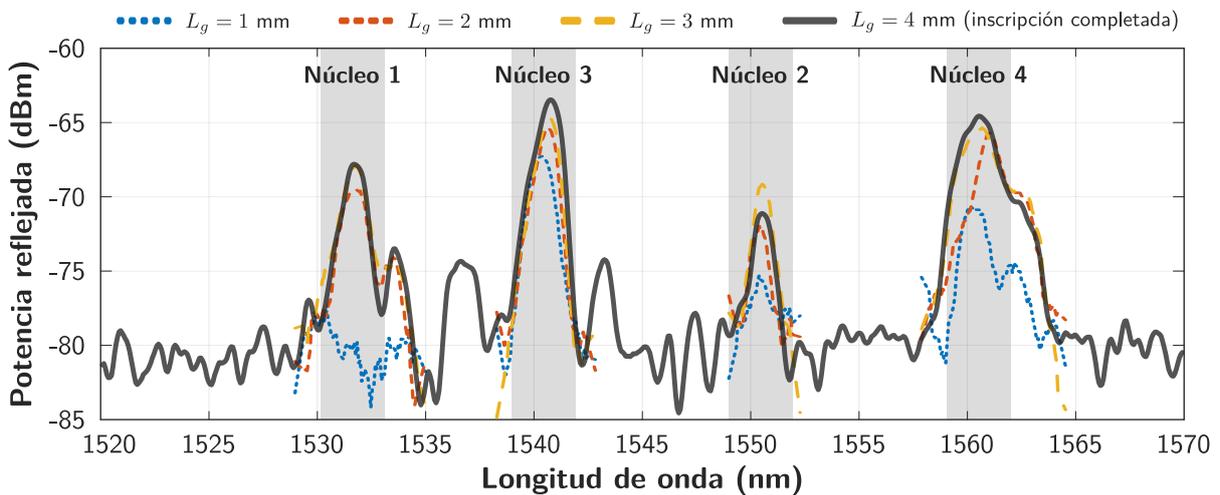
<sup>3</sup>Está formada conjuntamente por 4 fuentes espectralmente más estrechas, centradas en 1310, 1430, 1550 y 1650 nm.

MMF con el tramo final de MCF (sensor), mientras que en el puerto 3 se sitúa un analizador de espectros (OSA, *Optical Spectrum Analyzer*) (Anritsu MS9740A). En la **Figura 5.11** se esquematiza el setup de caracterización, con una configuración en reflexión.

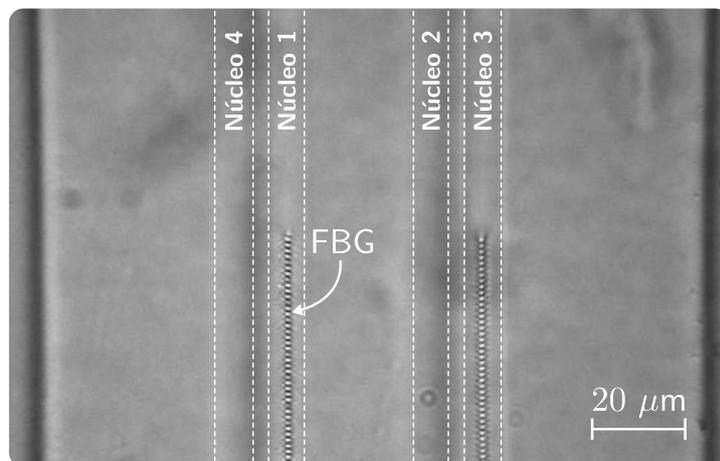


**Figura 5.11.** Setup empleado durante la inscripción para caracterizar la estructura sensora

Teniendo en cuenta que se han recogido espectros cada mm de inscripción de los FBGs, en la **Figura 5.12** y **5.13** se muestran respectivamente los espectros de reflexión en función de la longitud de los gratings, así como una captura de la inscripción realizada con el láser de fs.



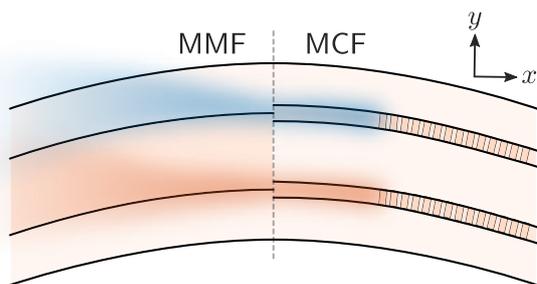
**Figura 5.12.** Espectros de reflexión con las  $\lambda_B$  indicadas en la **Tabla 5.1**. Se muestra la respuesta del sensor para longitudes de los FBGs ( $L_g$ ) de 1, 2, 3 y 4 mm.



**Figura 5.13.** Resultado de la inscripción láser en la fibra MCF. Se muestra la posición de cada núcleo, estando enfocado el FBG del núcleo 1.

### 5.2.3. Sensado de curvatura en 2D

De forma genérica, para modelar la curvatura de una fibra se utiliza lo que se conoce como “transformación conforme” (*conformal mapping*), a través de la cual la acción de la flexión se transforma en una inclinación del perfil del índice de refracción [48,49]. De esta forma, se puede utilizar para tratar pérdidas en fibras curvadas. No obstante, y a diferencia de lo que se hace de forma tradicional (medir desplazamientos de  $\lambda_B$ ), se propone emplear la potencia reflejada

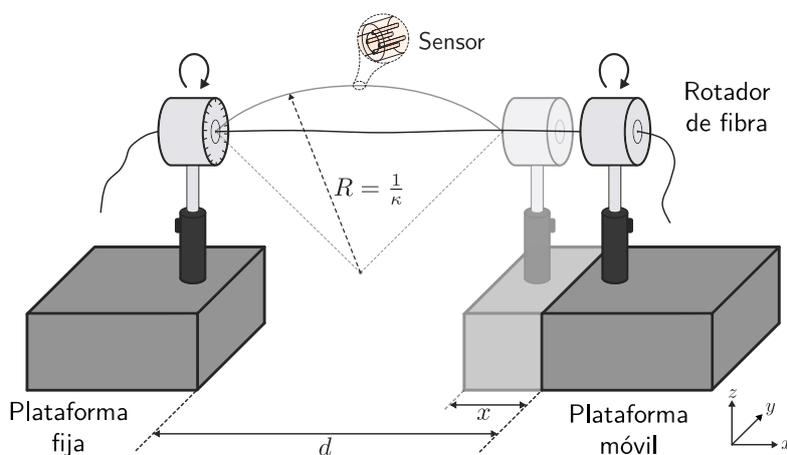


**Figura 5.14.** Representación conceptual de la idea en que se basa el sensor diseñado

para dicho propósito, en concreto el aumento o disminución de las pérdidas de potencia correspondientes a cada núcleo MCF, como consecuencia del acoplamiento incompleto de los núcleos MCF al núcleo MMF.

En la Figura 5.14 se representa de forma sencilla el fundamento de la idea que se pretende desarrollar<sup>1</sup>: el núcleo situado en la parte exterior del radio de curvatura no se ve favorecido por la flexión y, como se aprecia en la figura, gran parte de la potencia reflejada se pierde por la cubierta. En cambio, el núcleo situado en el interior del radio de curvatura, debido a la misma consigue acoplar la práctica totalidad de la potencia reflejada en el núcleo de la fibra multimodo.

La configuración experimental para acometer la medida de curvatura se presenta en la Figura 5.15. Consiste en dos plataformas con capacidad de movimiento tridimensional (*XYZ*), de las cuales una es fija y otra es móvil, y se encuentran separadas inicialmente una distancia  $d$ . Sobre cada plataforma se encuentra un rotador de fibra, con objeto de poder inducir curvatura sobre la fibra en cualquier dirección (ángulo del rotador). Colocando el tramo sensor en el punto medio entre las plataformas, la curvatura se logra moviendo la plataforma móvil en el eje  $X$  (el ángulo se obtiene mediante la rotación sincronizada de la fibra).



**Figura 5.15.** Esquema de la configuración experimental del proceso de medida de flexión

<sup>1</sup>Los colores de la figura no tienen ninguna asociación con la longitud de onda reflejada. Únicamente tienen por objetivo diferenciar las contribuciones de potencia reflejada de cada FBG.

Una estimación de la curvatura se obtiene a través de la siguiente expresión [50]:

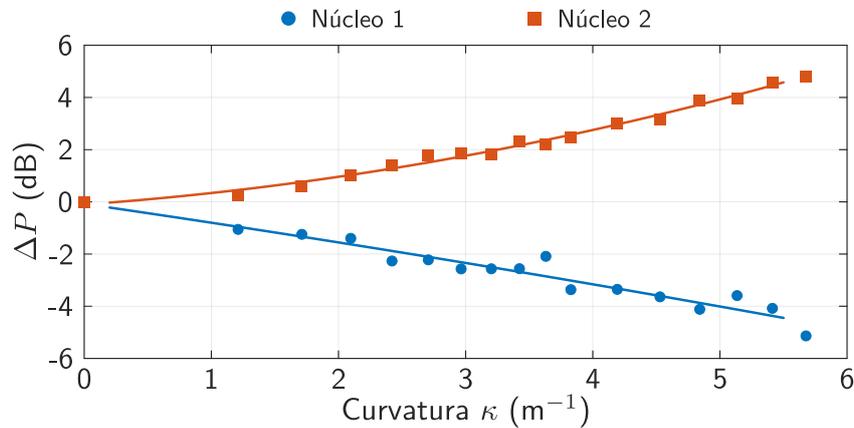
$$d - x = d \cdot \text{sinc}\left(\frac{d \cdot \kappa}{2}\right),$$

donde  $x$  hace referencia al desplazamiento de la plataforma móvil en el eje  $X$ , y  $\kappa = \frac{1}{R}$  se corresponde con la curvatura, el inverso del radio de curvatura (eje de flexión). Puesto que  $R \gg d$ , la función  $\text{sinc}(\cdot)$  se puede desarrollar en serie de potencias. Considerando los dos primeros términos de dicha serie, se puede obtener una estima del valor de  $\kappa$ :

$$\text{sinc}(i) \approx 1 - \frac{i^2}{3!} \quad \rightarrow \quad \kappa \approx \sqrt{\frac{24x}{d^3}} \quad (5.1)$$

Teniendo en cuenta que, en el setup dispuesto,  $d = 16$  cm y  $x$  se ha incrementado hasta 5.5 mm, se tiene un valor máximo de  $\kappa$  hasta  $5.67 \text{ m}^{-1}$ . A continuación se presentan los resultados obtenidos.

En la [Figura 5.16](#) se muestra la variación de potencia reflejada ( $\Delta P$ ) en función de la curvatura ( $\kappa$ ), tomando como referencia  $\kappa = 0 \text{ m}^{-1}$  y  $\theta = 0^\circ$ , siendo  $\theta$  el ángulo de rotación de la fibra (define el eje de flexión en el plano). En dicha gráfica, en la que sólo se representa la potencia reflejada correspondiente a los núcleos 1 y 2<sup>1</sup> (con  $\theta = 0^\circ$ ), se percibe la gran linealidad existente, con pendientes de diferente signo, al tratarse de núcleos enfrentados (separados  $180^\circ$ ). El efecto que subyace de los resultados mostrados en la gráfica se fundamenta en el concepto representado en la [Figura 5.14](#).

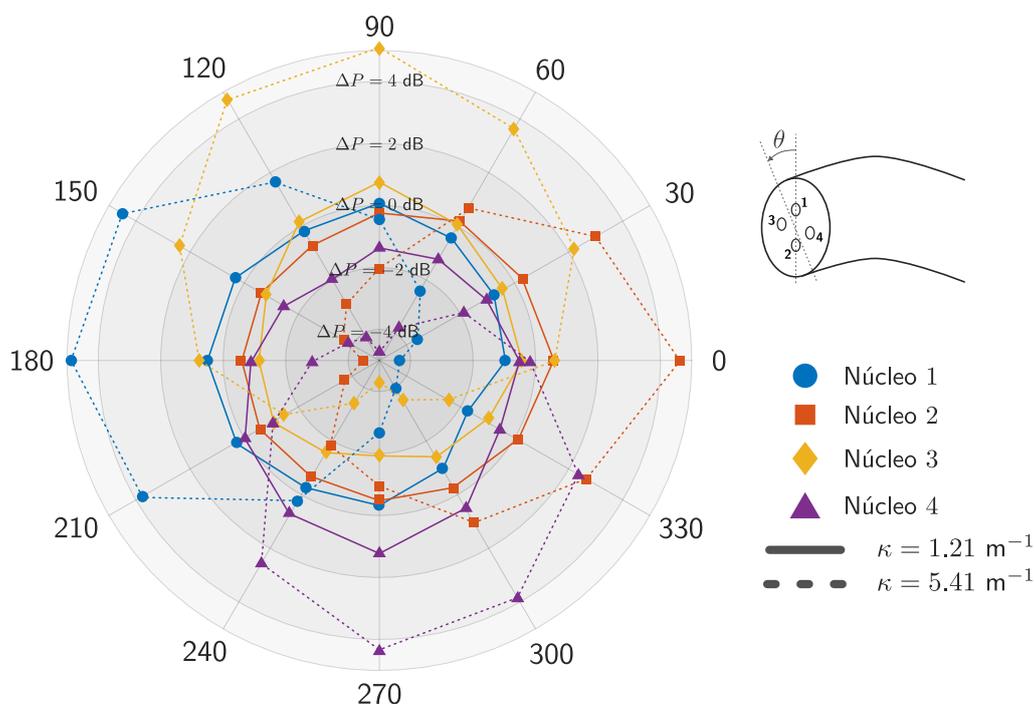


**Figura 5.16.** Variación de la potencia reflejada (FBGs 1 y 2) en función de  $\kappa$  (para  $\theta = 0^\circ$ )

Por otra parte, la [Figura 5.17](#) contiene una representación completa del rendimiento de la estructura óptica fabricada, puesto que queda englobada la información correspondiente a los cuatro núcleos, la curvatura ( $\kappa$ ), y la rotación angular ( $\theta$ ). En definitiva, demuestra la capacidad del sensor para determinar la flexión producida en cualquier dirección ( $2D \rightarrow$  valor de la curvatura y dirección en que se ha producido). Observando la gráfica se percibe que, en ausencia de curvatura, la rotación angular no origina variaciones en la potencia ( $\Delta P = 0$  dB); mientras que, si se incrementa la flexión, también aumentan las pérdidas en

<sup>1</sup>Cabe destacar que, dado que  $\theta = 0^\circ$ , no existe variación de potencia en los FBGs de los núcleos 3 y 4 (no se ven afectados por la curvatura).

la potencia reflejada por cada núcleo para la posición angular en que se encuentra, tomando como referencia la disposición de los núcleos de la MCF indicada en la propia figura. De forma lógica, se incrementa la potencia reflejada (disminuyen las pérdidas) para la rotación angular proporcionada por la dirección opuesta.



**Figura 5.17.** Evolución de la potencia reflejada por cada núcleo en función tanto de la curvatura  $\kappa$  como de la rotación angular  $\theta$

De esta forma, basándose en una fibra MMF comercial, y un pequeño sensor ( $\sim 4.1$  mm) ubicado en una fibra MCF de cuatro núcleos, es posible determinar cualquier flexión bidimensional en la fibra. Aprovechando las propiedades geométricas de ambas fibras, es igualmente factible efectuar la detección a partir de variaciones en la potencia reflejada, dentro de un rango relativamente elevado ( $\Delta P = \pm 6$  dB), y no en el tradicional desplazamiento de longitud de onda, que requeriría un equipamiento más preciso, capaz de detectar variaciones de décimas de nm.

### 5.3. MZI híbrido para sensado multi-parámetro

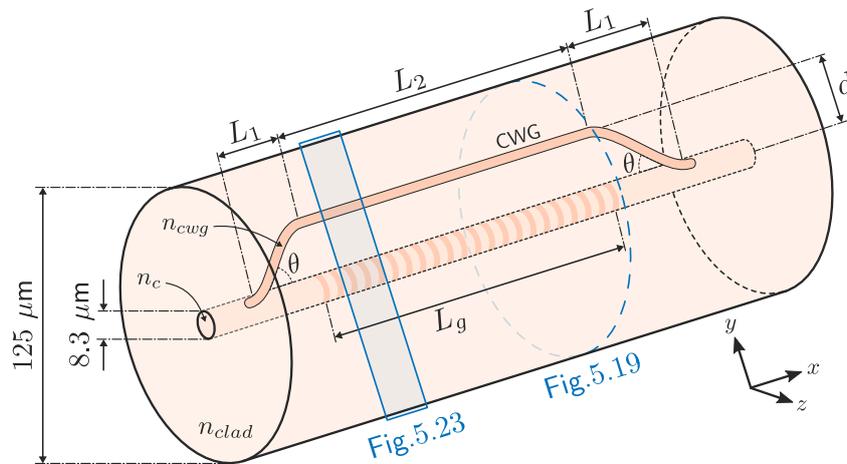
Esta sección, la última del capítulo y del trabajo en general (a excepción de las conclusiones), contiene la contribución más notable, al integrar un MZI y un FBG en fibra simultáneamente, pudiendo discriminar multitud de parámetros (incluso simultáneamente). Lo expuesto se incluye de forma parcial en el paper de conferencia internacional [RPR5], y de forma completa en el artículo de revista [RPR1]. A continuación se detalla el diseño y fabricación del sensor, una caracterización extensa del mismo, así como su aplicación al sensado multi-parámetro.

### 5.3.1. Diseño y fabricación del sensor

En la Figura 5.18 se muestra un esquema ilustrativo de la estructura, efectuada sobre una fibra estándar SMF. El componente *in-fiber* está formado por un MZI cuyo acoplo se realiza de forma directa<sup>1</sup>, esto es, la CWG está en contacto físico con el núcleo ( $L_{coup} = 20 \mu\text{m}$ ,  $d = 0 \mu\text{m}$ ); y con transiciones en S-Bend de longitud  $L_1 = 1 \text{ mm}$  que se separan con un ángulo  $\theta$  del núcleo hacia un tramo en la cubierta paralelo al mismo de longitud  $L_2 = 4 \text{ mm}$ . Puesto que la separación radial entre el núcleo y el tramo de cubierta de la CWG se fija a valor  $d = 40 \mu\text{m}$ , de acuerdo a la Ecuación 4.1 se obtiene un ángulo  $\theta = 2.29^\circ$ . Según la Figura 4.10, se percibe que en el acoplo óptico, para dicho valor de  $\theta$  la S-Bend ofrece mejores prestaciones<sup>2</sup>.

Adicionalmente, es importante destacar que la guía de onda que conforma el MZI ha sido fabricada a través de la técnica multiscan, mediante una serie de 5 inscripciones separadas una distancia radial  $s = 0.2 \mu\text{m}$  entre ellas<sup>3</sup>, dando lugar a una estructura de guía de onda con una anchura  $R \simeq 2.6 \mu\text{m}$ .

Por último, adicionalmente al MZI, se incorpora un FBG en el núcleo de longitud  $L_g = 4 \text{ mm}$ , situado paralelamente al tramo de cubierta de la CWG.



**Figura 5.18.** Estructura geométrica del componente *all-in-fiber* integrado en 6 mm

En lo que respecta al proceso de grabado láser, al igual que en las secciones anteriores, se emplea inscripción *in-fiber* con óptica adaptativa (Figura 3.10). Los parámetros de grabado difieren en función de la estructura óptica: la guía de onda del MZI ha sido inscrita con una energía de pulso  $E_p = 0.19 \mu\text{J}$ , un PRR de 60 kHz y 800 pulsos/ $\mu\text{m}$  ( $v = 75 \mu\text{m/s}$ ); mientras que el FBG se ha fabricado mediante el método *PbP* con  $E_p = 0.47 \mu\text{J}$  y PRR = 10 Hz. Puesto que el periodo se ha fijado a valor  $\Lambda = 1.051 \mu\text{m}$ , la velocidad de inscripción es de  $10.51 \mu\text{m/s}$ .

<sup>1</sup>Como línea futura, surge la opción de realizar acoplos en guía de onda mediante campos evanescentes.

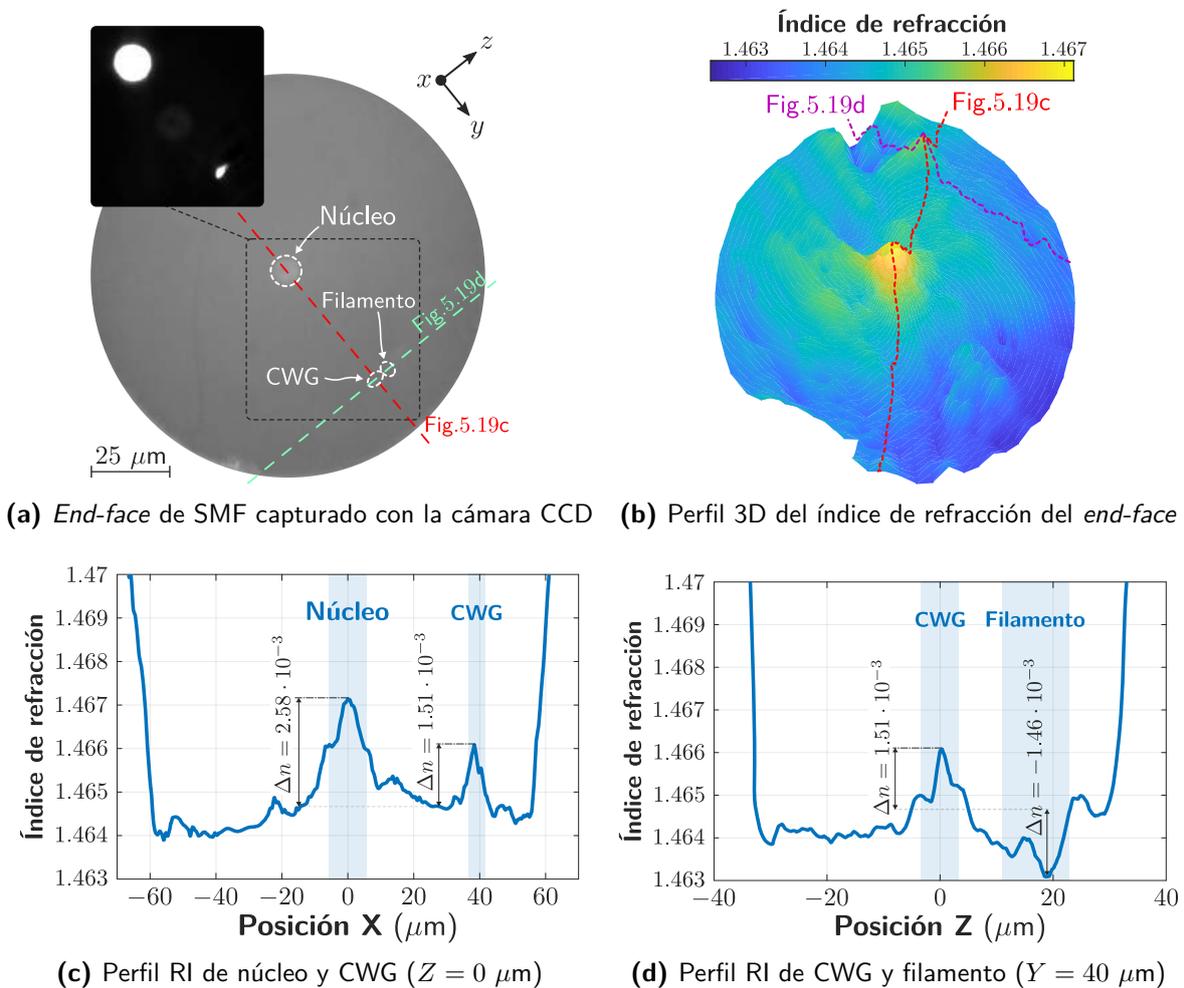
<sup>2</sup>Se podría haber reducido el valor de  $\theta$  con objeto de minimizar las pérdidas. No obstante, ocasionaría un aumento en las dimensiones del dispositivo realizado.

<sup>3</sup>En la inscripción se sigue el proceso conocido como "*inscribe-and-step*", esto es, se inscribe una línea y se traslada perpendicularmente  $s$ , repitiéndose el proceso sucesivamente.

### 5.3.2. Caracterización de la estructura

#### Guías de onda (CWG)

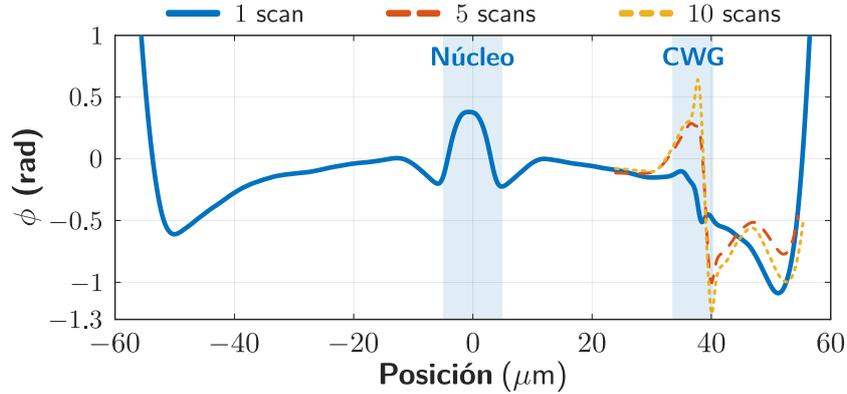
En la [Figura 5.19](#) se muestra el *end-face* de la fibra tras el grabado de la guía de onda. Iluminando el extremo de la fibra mediante una fuente de luz blanca, se pueden observar dos *spots* de luz, correspondientes al núcleo y la CWG ([Figura 5.19a](#)). Se puede inferir que, debido al empleo de la técnica multiscan, la guía de onda presenta una simetría circular remarcable. Por otra parte, la [Figura 5.19b](#) representa el perfil 3D del *end-face*. Sobre dicha sección transversal, con regiones de diferente índice de refracción, se aprecian las zonas correspondientes al núcleo, la CWG y el filamento generado durante el procesado láser. Para realizar la caracterización del *end-face* desde el punto de vista de su índice de refracción se ha empleado la técnica RNF con el perfilómetro *Sira Electro-Optics*.



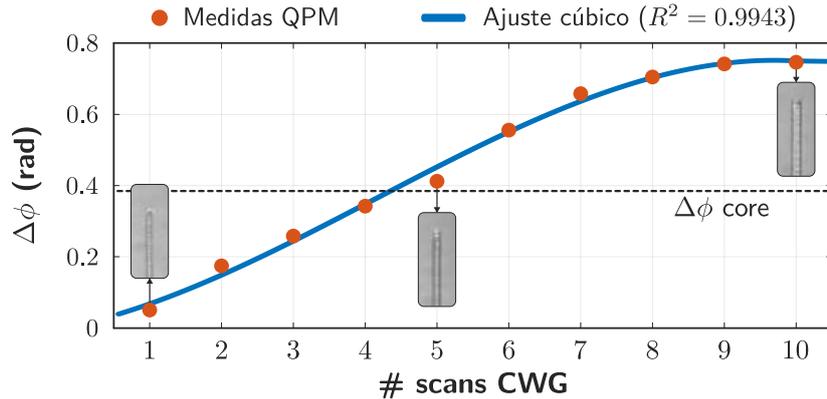
**Figura 5.19.** Caracterización del índice de refracción de la guía de onda mediante RNF

La [Figura 5.19c](#) muestra el perfil de RI en el núcleo y la CWG (eje  $Y$ ), presentando esta última un cambio respecto a la cubierta  $(\Delta n)_{cwg} = 1.51 \cdot 10^{-3}$ . Si el perfil se efectúa sobre el eje  $Z$  en la zona de la CWG ( $Y = d = 40 \mu\text{m}$ ), se pueden distinguir las regiones correspondientes al volumen focal (cambio positivo) y al filamento generado en la inscripción (cambio negativo  $\rightarrow (\Delta n)_{fil} = -1.46 \cdot 10^{-3}$ ).

Por otra parte, también se han caracterizado las guías de onda mediante QPM. Con objeto de realizar un estudio exhaustivo de las guías de onda generadas mediante la técnica multiscan, se ha cuantificado el cambio de fase existente en las mismas cuando estas están formadas por entre 1 y 10 scans. Para ello se ha empleado un *defocusing* de  $3 \mu\text{m}$  ( $\delta z = \pm 3 \mu\text{m}$ ), así como la lente objetivo utilizada en el setup para enfocar los pulsos láser ( $\times 100$ ,  $\text{NA} = 0.5$ ).



(a) Perfil de fase medido con QPM para CWGs formadas por 1, 5 y 10 scans



(b) Cambio de fase CWG-cubierta en función del número de scans efectuados para fabricar la guía

**Figura 5.20.** Estudio de las guías de onda fabricadas mediante la técnica multiscan

Los resultados experimentales presentados en la [Figura 5.20](#) indican que las líneas de material modificado inducidas por cada scan causan un incremento en el cambio de fase asociado a la guía<sup>1</sup>, hasta alcanzar un punto en que dicho cambio se estabiliza (9 scans). En promedio, con  $s = 0.2 \mu\text{m}$ , el solapamiento entre scans consecutivos es del  $\sim 72.24\%$ , esto es, se inducen cambios adicionales en el material modificado por inscripciones previas. El incremento de fase se debe a la densificación causada por el aumento en la temperatura ficticia durante la inscripción multiscan. De forma simplificada, en la curva correspondiente a la [Figura 5.20b](#) se pueden establecer dos tramos con las pendientes que se indican a continuación:

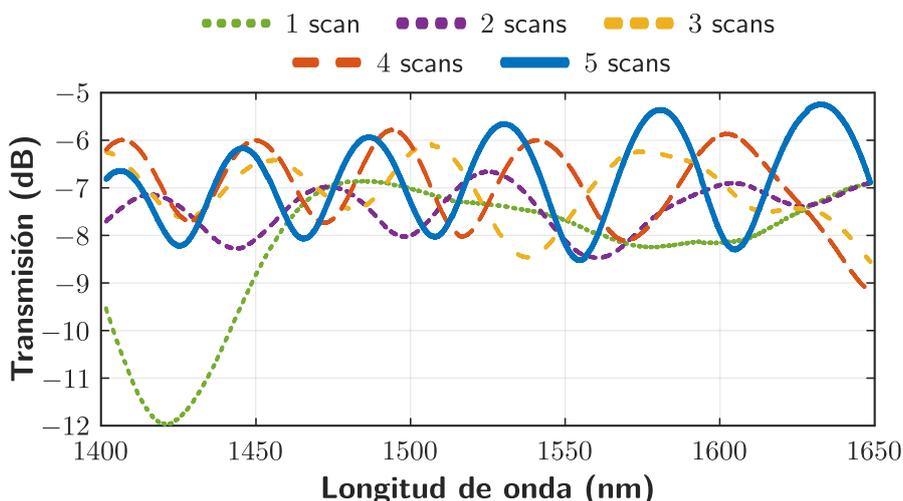
$$m = \frac{\Delta(\Delta\phi)}{\Delta(\#\text{scans})} = \begin{cases} 94.71 \frac{\text{mrad}}{\text{scan}}, & \forall \#\text{scans} \in \mathbb{N} \cap [1, 8] \\ 0 \frac{\text{rad}}{\text{scan}}, & \forall \#\text{scans} \in \mathbb{N} \cap [9, \infty) \end{cases}$$

<sup>1</sup>Como se definió en la [Ecuación 3.4](#), un incremento en la fase constituye un aumento en el índice de refracción.

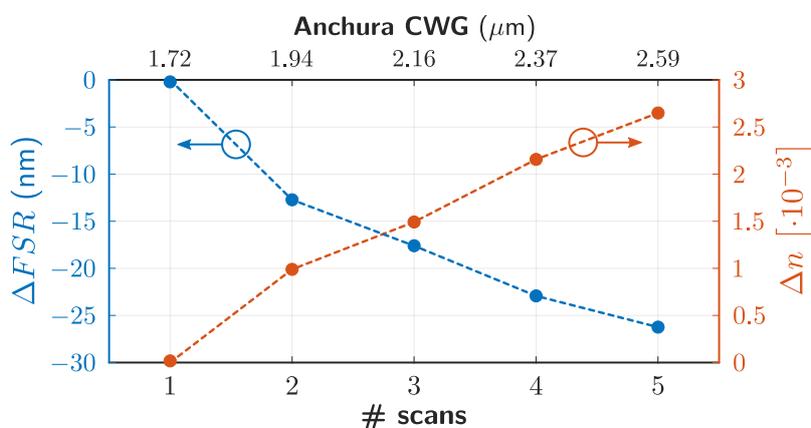
Hay que mencionar que la inscripción de guía de onda realizada en la Figura 5.19 tiene su fin  $\sim 10 \mu\text{m}$  antes de la sección transversal del final de la fibra, correctamente cortada. Es por eso que los resultados derivados de la aplicación de RNF indican un cambio de RI menor en la CWG que en el núcleo, mientras que QPM indica un cambio de fase superior en la guía que en el núcleo (para 5 scans).

### Interferómetro Mach-Zehnder

Una vez acometido el estudio de las guías de onda con técnica multiscan, se caracteriza el Mach-Zehnder inscrito en la fibra, el cual, como se detalló en el diseño del sensor, se fundamenta en una guía de onda (camino secundario) formada por 5 scans<sup>1</sup>. El MZI ha sido caracterizado tras cada scan, empleando para ello una configuración en transmisión (sin circulador intermedio), con la fuente de luz HP 83437A y el OSA Anritsu MS9740A. Los patrones de interferencia resultantes se muestran en la Figura 5.21a



(a) Espectros de transmisión del MZI para CWGs compuestas por 1 – 5 scans



(b) FSR y  $(\Delta n)_{cwg}$  en función del # scans. Se elige la región 1400 – 1550 nm para determinar el FSR

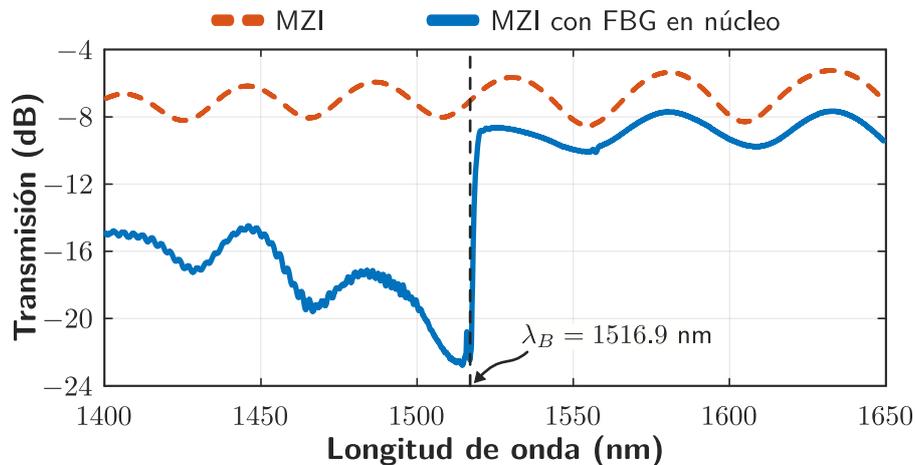
**Figura 5.21.** Caracterización espectral del MZI inscrito

<sup>1</sup>El cambio en el índice de refracción es similar al del núcleo y, adicionalmente, se forma una simetría transversal circular que favorece el guiado de la luz.

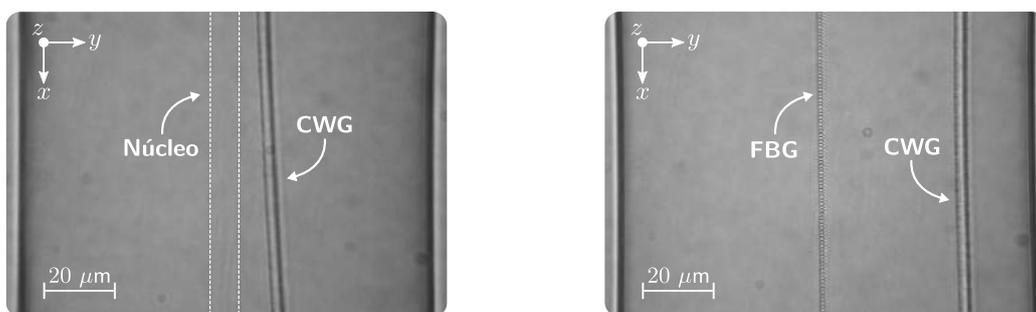
A partir de los resultados, se tienen unas pérdidas de  $\sim 6$  dB, que siendo relativamente reducidas, podrían ser significativamente inferiores en caso de realizar acoplo evanescente. Por otra parte, la [Figura 5.21b](#) muestra la evolución del FSR con el número de scans. Se acentúa la idea de que la técnica multiscan es una potencial forma de controlar las propiedades del MZI en inscripción, específicamente el acoplo de luz y el FSR. Como se indicó gráficamente en la simulación realizada en la [Figura 4.12c](#), un incremento en  $\Delta n$  tiene asociado implícitamente una reducción en el FSR, hecho que queda demostrado de forma empírica. Asimismo, para una CWG formada por 5 scans, se obtiene un  $\Delta n$  cercano a  $3 \cdot 10^{-3}$ , que equivale aproximadamente al cambio de RI que presenta el núcleo, validando así los resultados obtenidos con QPM.

### Mach-Zehnder con FBG

A continuación, una vez inscrito el FBG en el núcleo ( $\Lambda = 1.051 \mu\text{m}$ ) mediante el método *PbP*, se muestra en la [Figura 5.22](#) el espectro en transmisión resultante de la estructura completa. La longitud de onda reflejada ( $\lambda_B$ ) se sitúa en 1516.9 nm, correspondiente al 2º armónico, y presenta un FWHM de  $\sim 1.59$  nm. En la [Figura 5.23](#) se presentan dos imágenes capturadas con la cámara CCD del setup, en las cuales se pueden observar determinadas partes de la estructura, como puede el tramo de acoplo (guía en S-Bend separándose del núcleo) o la parte central, en la que está ya presente el FBG en el núcleo.



**Figura 5.22.** Espectro de transmisión del MZI completo sin y con el FBG en el núcleo



**(a)** Tramo correspondiente a la S-Bend del MZI      **(b)** Tramo de cubierta del MZI, y FBG en núcleo

**Figura 5.23.** Vista longitudinal de dos tramos del componente *in-fiber* fabricado

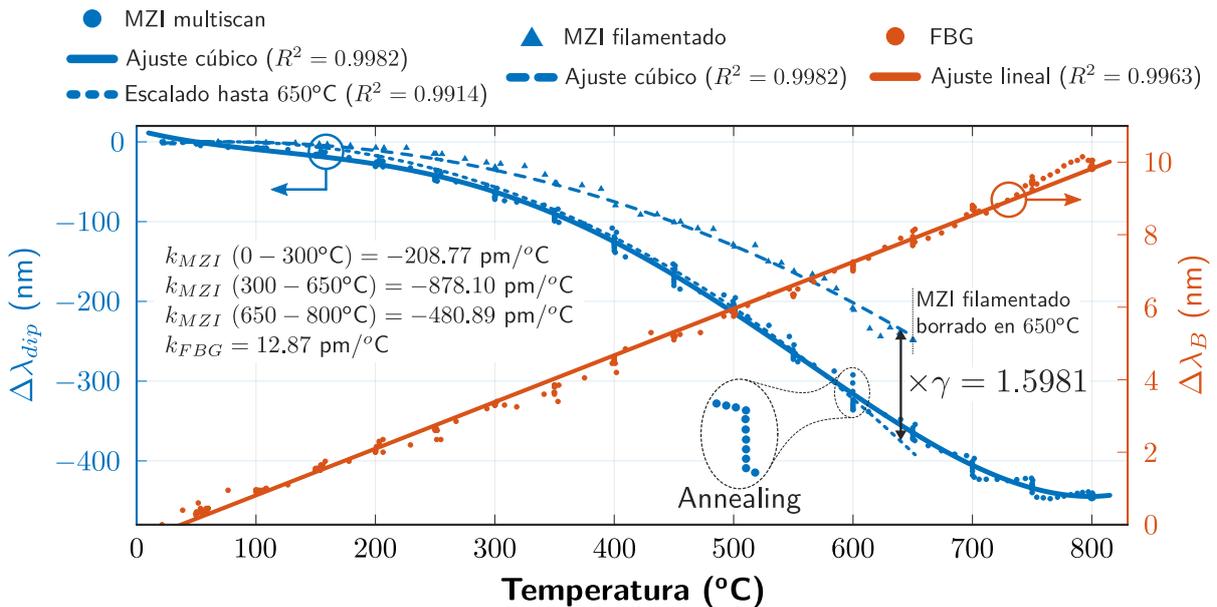
### 5.3.3. Sensado multi-parámetro

A continuación, se utiliza la estructura diseñada para realizar el sensado de diferentes parámetros. Concretamente, se ha demostrada la capacidad del mismo para discriminar temperatura (hasta 800°C), índice de refracción exterior (SRI), curvatura y strain<sup>1</sup>.

#### Análisis en temperatura (MZI multiscan y MZI filamentado)

Inicialmente, se acomete un estudio del rendimiento del sensor ante cambios en la temperatura. Del mismo modo, también se aborda un análisis comparativo con el MZI desarrollado por Pallarés-Aldeiturriaga *et al.* [51], con objeto de poseer una caracterización completa del comportamiento de la guía de onda inscrita. El MZI citado presenta una propagación filamentosa (1 scan, Tipo I) y un RIC birrefringente (Tipo II  $\rightarrow \Delta n < 0$ ), con una guía óptica secundaria (brazo sensor) de longitud  $L = 300 \mu\text{m}$  (frente a los 6 mm del MZI fabricado).

En ambos casos, se somete al sensor a un ciclo de temperatura idéntico: se sube en pasos de 50°C hasta 800°C, permaneciendo 10 minutos en cada paso. Cabe destacar que el MZI filamentado (Tipo II) únicamente es evaluado hasta 650°C, temperatura a la cuál la guía de onda se borra.



**Figura 5.24. (Eje Y izdo.)** Desplazamiento de  $\lambda_{dip}$  del MZI fabricado en este trabajo para temperaturas entre 23°C y 800°C (línea continua), y desplazamiento de  $\lambda_{dip}$  del MZI desarrollado en [51] para temperaturas entre 23°C y 650°C, con el ajuste y la traslación, mediante un factor de escala  $\gamma$ , a las medidas del presente trabajo (líneas punteadas). **(Eje Y dcho.)** Desplazamiento de  $\lambda_B$  para temperaturas entre 23°C y 800°C. Se indican también las sensibilidades ( $k_T$ ), así como el efecto del *annealing*.

Los resultados experimentales, así como los recogidos del estudio realizado en [51], se muestran en la Figura 5.24. Se muestra el desplazamiento de los *dips* ( $\Delta\lambda_{dip}$ ) para ambos

<sup>1</sup>Deformación por unidad de longitud de la fibra (Strain( $\varepsilon$ ) =  $\frac{\Delta L}{L}$ ). Puede ser compresión (strain -) o tensión (strain +).

MZIs, así como el desplazamiento de la longitud de onda de *Bragg* para el FBG del presente trabajo ( $\Delta\lambda_B$ ). Se observa el proceso de *annealing* en cada paso de temperatura, ya que estando la temperatura estable durante 10 minutos, se produce un desplazamiento de  $\lambda_{dip}$ . Esto es consecuencia de la relajación de estrés que tiene lugar en la guía de onda. Como el estrés causa una distribución inhomogénea y anisotrópica del índice de refracción en la guía de onda, el *annealing* provoca un mejor comportamiento del MZI, ya que el índice de refracción es suavizado. Si bien el *annealing* se produce en ambos MZIs, el fenómeno es más pronunciado en el fabricado en este trabajo, presentando por tanto una mayor sensibilidad.

El ajuste cúbico de las medidas correspondientes al MZI filamentado presenta una coincidencia notable ( $R^2 = 0.9914$ ) con el ajuste cúbico de las medidas del MZI multiscan cuando se aplica un factor de escala  $\gamma = 1.5981$ . Este hecho tienen una connotación muy importante, la cual se desarrolla a continuación.

Con objeto de establecer un punto de partida común, se considera  $(\lambda_{dip})_1(T) = (\lambda_{dip})_2(T)$  a una temperatura  $T$ , haciendo referencia el 1 al MZI multiscan, y el 2 al MZI filamentado. De acuerdo a la [Ecuación 4.3](#):

$$(\Delta n)_1(T) \cdot \alpha_1 = (\Delta n)_2(T) \cdot \alpha_2, \quad (5.2)$$

$$\text{con } \alpha_i = \frac{2\pi L_i(T)}{\pi(2m_i + 1) - \phi_0} \overset{L_i(T) \approx L_i}{\approx} \frac{2\pi L_i}{\pi(2m_i + 1) - \phi_0}, \quad \text{siendo } L_i = \begin{cases} 6 \text{ mm}, & i = 1 \\ 300 \text{ } \mu\text{m}, & i = 2 \end{cases}$$

Definiendo  $(\Delta\lambda_{dip})_i(T)$  como

$$(\Delta\lambda_{dip})_i(T) = (\lambda_{dip})_i(T) - (\lambda_{dip})_i(23^\circ\text{C}) = f_i(T), \quad (5.3)$$

$$\begin{cases} f_1(T) = \gamma \cdot f_2(T) \rightarrow \text{Ajuste cúbico MZI multiscan} \\ f_2(T) \rightarrow \text{Ajuste cúbico MZI filamentado} \end{cases} \quad (5.4)$$

Tomando incrementos sobre la [Ecuación 4.3](#), y aplicando la igualdad de la [Ecuación 5.3](#), se tiene

$$(\Delta\lambda_{dip})_i(T) = [\Delta(\Delta n)]_i(T) \cdot \alpha_i = f_i(T).$$

Finalmente, a consecuencia de la relación indicada en (5.4), se obtiene la igualdad que se indica seguidamente:

$$\boxed{[\Delta(\Delta n)]_1(T) = \alpha \cdot [\Delta(\Delta n)]_2(T), \quad \alpha = \gamma \frac{\alpha_2}{\alpha_1}.}$$

Por consiguiente, se demuestra que las variaciones del índice de refracción con la temperatura para las guías de onda de ambos MZIs (filamentado Tipo II, y multiscan Tipo I) están relacionadas a partir de una constante de proporcionalidad  $\alpha$ . Empleando los datos obtenidos mediante el perfilómetro RNF, se han realizado simulaciones aplicando FEM con el objetivo de obtener la diferencia del índice de refracción efectivo entre ambos modos. Así, es posible estimar  $\alpha$  a partir de la [Ecuación 5.2](#), tomando  $T = 23^\circ\text{C}$ , temperatura a la cuál se han efectuado las medidas RNF del índice de refracción de la CWG:

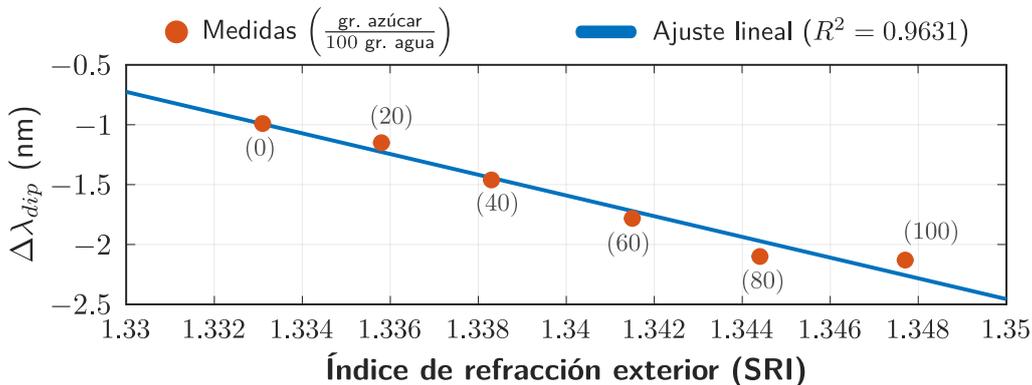
$$\alpha = \gamma \frac{\alpha_2}{\alpha_1} = \gamma \frac{(\Delta n)_1(23^\circ\text{C})}{(\Delta n)_2(23^\circ\text{C})} \approx 1.598 \cdot \frac{0.0013}{0.0054} = 0.38(17)$$

El resultado alcanzado es coherente, en tanto en cuanto la guía de onda del MZI filamentado presenta un cambio de índice de refracción muy superior (un orden de magnitud mayor) al MZI fabricado mediante la técnica multiscan, presentando por tanto una degradación  $\alpha^{-1} = 2.6129$  veces mayor. De ahí que el MZI filamentado se borra en  $\sim 650^\circ\text{C}$ , mientras que el MZI multiscan desarrollado en este trabajo todavía se mantiene a partir de  $800^\circ\text{C}$ .

### Índice de refracción

Las  $40\ \mu\text{m}$  de separación entre la CWG del MZI y el núcleo derivan en una sensibilidad significativamente elevada al índice de refracción del exterior (SRI). Debido a ello, el MZI ha sido sumergido en seis líquidos diferentes, con variaciones del índice de refracción del orden de  $10^{-3}$ . Específicamente, dichos líquidos son disoluciones con concentraciones de azúcar (soluto) de 0, 20, 40, 60, 80 y 100 gramos por cada 100 gramos de agua (disolvente).

En la [Figura 5.25](#) se presenta el desplazamiento de la longitud de onda  $dip$  ( $\lambda_{dip}$ ) para los diferentes líquidos, tomando el aire como punto de referencia ( $RI = 1 \rightarrow \Delta\lambda_{dip} = 0$ ). El MZI fabricado presenta una sensibilidad de  $k_{RI} = -86.52\ \text{nm}/\text{RIU}$  (*Refractive Index Unit*), siendo apto por tanto para detectar variaciones mínimas en el medio que rodea la fibra.



**Figura 5.25.** Desplazamiento de  $\lambda_{dip}$  del MZI al sumergir la fibra en líquidos con diferente RI

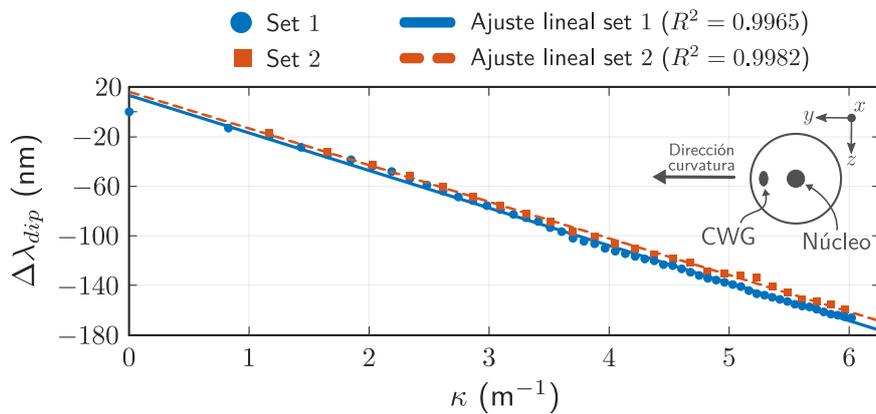
### Sensibilidad cruzada

Finalmente, una vez realizado el sensado de temperatura e índice de refracción, se estudia la sensibilidad cruzada de dos parámetros diferentes. Con el fin de explotar las ventajas que proporciona un componente con dos estructuras sensoras, como son el MZI y el FBG, se realiza la discriminación conjunta (*cross-sensitivity*) de strain ( $\varepsilon$ ) y curvatura ( $\kappa$ ). Conociendo la variación de dichos parámetros, así como sus sensibilidades, los desplazamientos de  $\lambda_{dip}$  y  $\lambda_B$  vienen dados por la siguiente relación:

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_B \\ \Delta\lambda_{dip} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{\kappa_B} & k_{\varepsilon_B} \\ k_{\kappa_{dip}} & k_{\varepsilon_{dip}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\kappa \\ \Delta\varepsilon \end{bmatrix}, \quad (5.5)$$

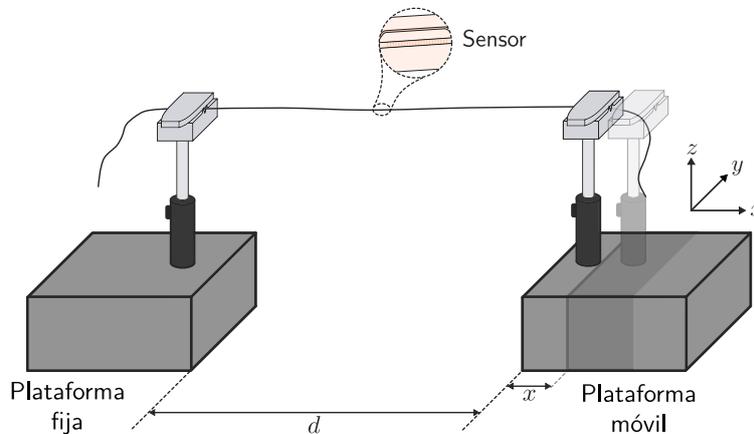
siendo  $k_{\kappa}$  y  $k_{\varepsilon}$  las sensibilidades de curvatura y strain, respectivamente, estando especificadas ambas para el FBG ( $k_{-B}$ ) y el MZI ( $k_{-dip}$ ).

En lo que respecta a la curvatura, se han llevado a cabo dos sets de medida, tal y como se presenta en la [Figura 5.26](#). El proceso de medida es el detallado en la anterior sección, con el setup experimental esquematizado en la [Figura 5.15](#), y considerando una estima de la curvatura según lo expuesto en la [Ecuación 5.1](#) (con  $d = 15.2$  cm). Un aspecto importante a destacar es que, teniendo en cuenta que la plataforma móvil se desplaza sobre el eje  $X$  y que la posición del MZI es la dispuesta en la propia [Figura 5.26](#), la curvatura ha de realizarse en la dirección del eje  $Y$ , ya que es la que proporciona la sensibilidad máxima. Las sensibilidades obtenidas para el FBG y el MZI son  $k_{\kappa_B} = -0.0914$  nm/m<sup>-1</sup> y  $k_{\kappa_{dip}} = -30.2578$  nm/m<sup>-1</sup>, respectivamente; presentando  $k_{\kappa_{dip}}$  una variación del 2.4% entre ambos sets de medida.



**Figura 5.26.** Desplazamiento de  $\lambda_{dip}$  al realizar dos sets de curvatura

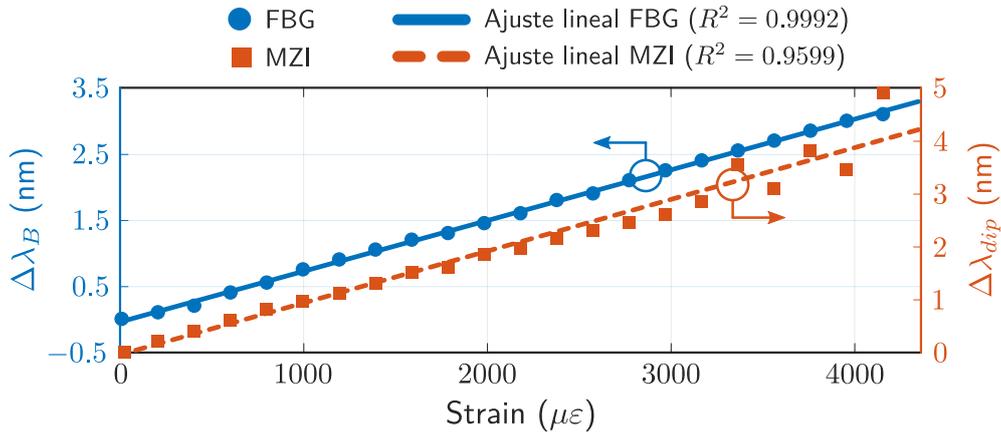
En lo relativo al strain, el esquema experimental para su medida se representa en la [Figura 5.27](#) de forma esquemática. La fibra se fija entre dos sujetaciones situadas sobre dos plataformas, una fija y otra móvil, estando el tramo sensor idealmente en el punto medio. Teniendo en cuenta que la distancia de la fibra entre ambas sujetaciones es  $d$  (fibra sin curvatura, y sin tensión), si se separa la plataforma móvil de la fija en la dirección dada por el eje  $X^1$  una distancia  $x$ , se obtiene un strain ( $\varepsilon$ ) de valor  $\frac{x}{d}$  en unidades de  $\frac{m}{m}$ . En la práctica, la magnitud de medida de strain es muy pequeña por lo que usualmente se expresa como microstrain ( $\mu\varepsilon$ ), que se corresponde con  $\varepsilon \cdot 10^{-6}$  (p. ej.  $1 \mu\varepsilon$  sería  $x = 1 \mu m$  con  $d = 1$  m).



**Figura 5.27.** Esquema de la configuración experimental del proceso de medida de strain

<sup>1</sup>En el setup de medida de curvatura, la plataforma móvil se desplaza sobre el eje  $X$  acercándose a la plataforma fija.

En la práctica, fijando la fibra en las plataformas con una separación inicial  $d = 15.2 \text{ cm}^1$ , se estira la misma en pasos de  $x = 0.03 \text{ mm}$  hasta alcanzar  $x = 0.63 \text{ mm}$ , lo cual resulta en un strain aplicado máximo de  $\sim 4150 \mu\epsilon$ . Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 5.28, con unas sensibilidades para el FBG y el MZI de  $k_{\epsilon_B} = 0.7683 \text{ pm}/\mu\epsilon$  y  $k_{\epsilon_{dip}} = 0.9839 \text{ pm}/\mu\epsilon$ , respectivamente.



**Figura 5.28.** Desplazamiento de  $\lambda_B$  y  $\lambda_{dip}$  al inducir strain sobre el tramo sensor de la fibra

En este punto, una vez determinadas las sensibilidades del FBG y el MZI para ambos parámetros, partiendo de la Ecuación 5.5 se puede calcular el valor de strain y curvatura existentes a partir del desplazamiento que presentan  $\lambda_B$  y  $\lambda_{dip}$ :

$$\begin{bmatrix} \Delta\kappa \\ \Delta\epsilon \end{bmatrix} = \frac{1}{D} \begin{bmatrix} k_{\epsilon_{dip}} & -k_{\epsilon_B} \\ -k_{\kappa_{dip}} & k_{\kappa_B} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_B \\ \Delta\lambda_{dip} \end{bmatrix}, \quad (5.6)$$

donde  $D = k_{\kappa_B} k_{\epsilon_{dip}} - k_{\kappa_{dip}} k_{\epsilon_B}$  se corresponde con el determinante de la matriz.

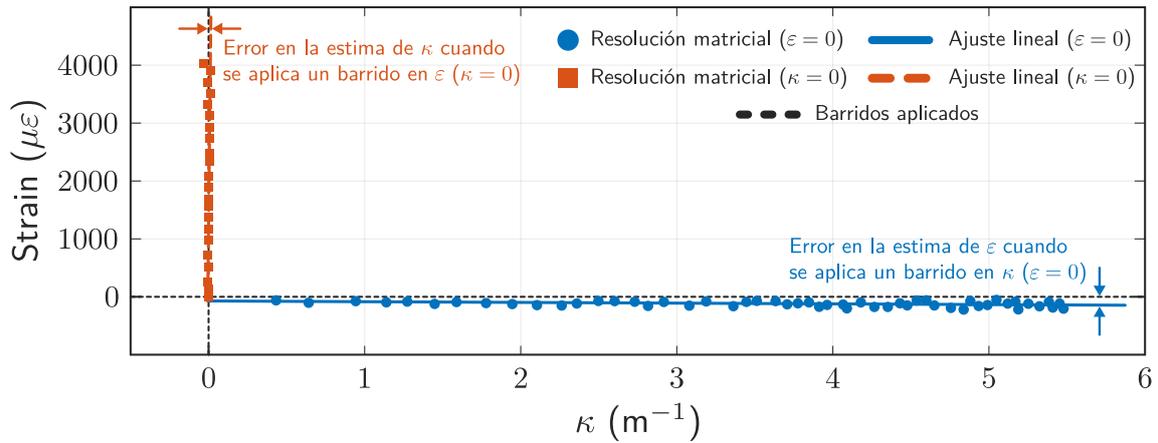
En la Figura 5.29 se presentan los resultados obtenidos correspondientes a la sensibilidad cruzada de strain y curvatura. El gráfico se obtiene variando un parámetro mientras el otro permanece fijo. De esta forma, se representan tanto los barridos aplicados (strain y curvatura) con líneas negras punteadas, como los valores estimados a partir de la Ecuación 5.6, con puntos de color.

Asimismo, se indica el ajuste lineal realizado (líneas de color) sobre los valores estimados, con objeto de determinar el error cometido en la estima. Cuando se aplica un barrido en curvatura (azul), se comete un error del  $\sim 7.8\%$  entre el valor de  $\kappa$  real y el estimado. Igualmente, el strain estimado, que debería ser nulo, varía con la curvatura a razón de  $-13.4 \mu\epsilon/\text{m}^{-1}$ .

Por otra parte, cuando se realiza un barrido de strain sobre el sensor (naranja), el error entre el valor real y el estimado es del  $\sim 1.1\%$ . En este caso, la curvatura estimada (debería ser nula) varía con el strain de acuerdo a  $0.00476 \text{ m}^{-1}/\mu\epsilon$ .

Los resultados obtenidos son sobresalientes desde el punto de vista de precisión en la estima, con una desviación prácticamente nula respecto a los barridos aplicados.

<sup>1</sup>Para dicho valor de  $d$ ,  $1 \mu\epsilon$  se corresponde con  $x = 0.152 \mu\text{m}$ .



**Figura 5.29.** Sensibilidad cruzada de curvatura y strain

En consecuencia, a partir del estudio de caracterización y la capacidad de sensado de múltiples parámetros del sensor realizado, se pone de manifiesto la gran aplicabilidad que dicho sensor, de dimensiones reducidas (6 mm), presenta en multitud de aplicaciones. Contiene novedades destacadas respecto al estado del arte existente en tecnología *in-fiber*, así como una caracterización más extensa respecto a la realizada en la literatura asociada a este tipo de sensores. Igualmente, se ha demostrado que existe una relación proporcional en las variaciones del índice de refracción con la temperatura para guías de onda fundamentadas en propagación filamentosa o en propagación por el cambio generado en el volumen focal.

# 6

## Conclusiones y líneas futuras

---

6.1	Líneas de trabajo futuras . . . . .	78
6.2	Mejoras del setup experimental . . . . .	80

---

**E**ste Trabajo de Fin de Máster ha tratado de aunar, con éxito, diversas temáticas concernientes al ámbito fotónico. De forma más específica, se aborda el desarrollo de sensores en fibra óptica mediante el post-procesado con láseres de femtosegundo.

Inicialmente se han introducido los conceptos, nociones teóricas y fundamentos físico-químicos relacionados con el estado del arte del micromecanizado de materiales ópticos transparentes, así como dos técnicas útiles para caracterizar los cambios inducidos en las estructuras ópticas inscritas. En consecuencia, se ha realizado el estudio sobre la modificación en el setup de grabado introducida: el empleo de óptico adaptativa, lo cual genera un haz estigmático que aumenta la fluencia en el volumen focal, ocasionando cambios más precisos y uniformes en el material.

Con ello, se han presentado las estructuras ópticas empleadas en los sensores desarrollados: FBGs, guías de onda e interferómetro Mach-Zehnder, detallando su comportamiento desde el punto de vista de su implementación en fibra óptica. Adicionalmente, se han presentado recomendaciones y usos prácticos aplicables en el proceso de grabado láser, y se han efectuado simulaciones con objeto de determinar tendencias derivadas de variar determinados parámetros o geometrías de diseño.

Finalmente, además de realizar un estudio acerca del comportamiento de FBGs en alta temperatura, se ha acometido el diseño y fabricación de dos sensores *in-fiber* capaces de discriminar múltiples parámetros y que, teniendo en cuenta que se trata de prototipos con una gran capacidad de mejora tanto en el diseño como en los parámetros de grabado láser aplicados, han ofrecido resultados realmente destacables y un rendimiento notable en lo que respecta al estado del arte, hecho por el cual se ha contribuido con las publicaciones científicas detalladas en el primer capítulo del documento.

## 6.1. Líneas de trabajo futuras

Seguidamente, se muestran algunas mejoras que se pueden introducir próximamente en los dos sensores fabricados, así como nuevas aplicaciones que surgen del uso de láseres de fs.

### Sensor de curvatura 2D en fibra multinúcleo

Como se ha mencionado, los sensores desarrollados son prototipos cuya capacidad de mejora es apreciable. El hecho de emplear una fibra con cuatro núcleos posibilita su empleo para aplicaciones que van más allá de un sensor de curvatura bidimensional. Si uno atiende a la estructura diseñada para el sensor, se puede inferir que, idealmente, sólo son necesarios dos núcleos para llevar a cabo el sensado de la flexión en ambos ejes. El hecho de emplear cuatro se argumenta en poder tener una mayor precisión en la medida, ya que debido a las limitaciones que presentan los FBGs llevados a cabo con *PbP*, dos FBGs pueden ofrecer una medida fiable para un eje. Sin embargo, inscribiendo FBGs con mejores prestaciones (mediante *LbL* o *PI-b-PI*), únicamente sería necesario un núcleo por eje (dos en total) para lograr la funcionalidad requerida.

De esta forma, los dos núcleos restantes podrían ser utilizados para otro tipo de aplicaciones. Una primera tentativa de aplicación se puede enmarcar dentro del ámbito médico. Concretamente, una aplicación de utilidad extraordinaria sería el empleo de esta fibra como catéter<sup>1</sup>. Para ello, dos de los núcleos, como se ha comentado, incluirían sendos FBGs para la detección de la curvatura bidimensional (valor de la flexión y dirección en que se produce); otro de los núcleos sería el asociado al tratamiento con luz<sup>2</sup>, esto es, no se realizaría ningún tipo de post-procesado sobre él. Por último, el núcleo restante podría ser empleado como elemento de visión. De acuerdo al estudio realizado por Plöschner *et al.* [52], mediante el empleo de matrices de transformación (*TM*, *Transformation Matrix*) en combinación con SLMs, se puede obtener el patrón de salida ante la excitación de modos individuales de la fibra. De esta forma, una vez caracterizado el comportamiento del núcleo en términos de propagación de luz, se pueden obtener imágenes de alta calidad del interior del organismo.

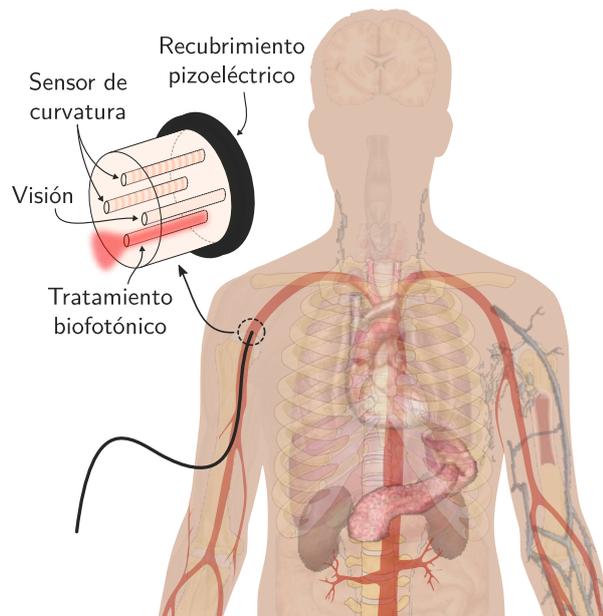


Figura 6.1. Esquema del sensor en MCF

<sup>1</sup>Se trataría de un dispositivo biofotónico de tratamiento médico, es decir, se utiliza la fibra como medio para tratar con luz determinados tejidos. El uso de fibras microestructuradas, como una *PCF* (*Photonic-Crystal Fiber*), posibilitaría otros usos propios de un catéter genérico, como puede ser la inyección de fármacos mediante técnicas microfluídicas.

<sup>2</sup>Se podrían utilizar fuentes de cualquier longitud de onda, según sean los requerimientos del tejido.

Igualmente, con el objetivo de confeccionar un producto totalmente funcional en entornos clínicos, se podrían emplear recubrimientos o fibras pizoeléctricas, como las creadas en el MIT por Egusa *et al.* años atrás [53]. De esta forma, se podrían inducir pequeños movimientos en el extremo de la fibra que, conjuntamente con el sensor de curvatura, permitirían situar el extremo de la fibra en la zona requerida del interior del cuerpo. En la Figura 6.1 se esquematiza el posible sensor a desarrollar en el futuro.

### MZI híbrido para sensado multi-parámetro

En lo que respecta al sensor híbrido MZI-FBG con capacidad para sensar múltiples parámetros, las mejoras que se pueden establecer vienen dadas por inscripciones más eficientes de las estructuras, tanto en el FBG (emplear *PI-b-PI*), como en la guía de onda del MZI, existiendo amplias expectativas de mejora en relación a la disminución de pérdidas de la misma y al acoplo óptico por campos evanescentes. Otra innovación que se puede establecer en el diseño reside en situar el FBG en la CWG (y no en el núcleo), estableciendo así una WBG como la indicada en la Figura 4.5 [39]. De esta forma, se consigue aumentar la sensibilidad de los parámetros medidos o, por ejemplo, emplear el FBG para dotar de mayor exactitud la estima proporcionada por el MZI en curvatura<sup>1</sup>. También se puede utilizar el mismo para medir otros parámetros como la humedad, o inscribir otra estructura (p. ej. una cavidad *Fabry-Perot*) para medir así tres parámetros de forma simultánea.

### Otras líneas de investigación

Estableciendo una visión más general, existen muchas otras aplicaciones más allá de la fibra óptica en las cuales el láser de fs puede ser de gran utilidad. Por ejemplo, existe un amplio campo de trabajo en relación a los biosensores<sup>2</sup>. Enlazando estructuras desarrolladas en este trabajo, es posible utilizar MZIs inscritos sobre placas de SiO<sub>2</sub> con objeto de detectar bajas concentraciones moleculares, como patógenos, hebras de ADN o proteínas a nivel femtomolar (Figura 6.2) [54]. Por otra parte, de cara al futuro se pueden presentar también contribuciones en temáticas relacionadas con LOC<sup>3</sup> (*Lab-On-Chip*) y optofluídica<sup>4</sup>. A partir de guías de onda inscritas mediante el láser de fs, si se realiza *etching* químico sobre las mismas, es posible establecer canales 3D microfluídicos, con las posibilidades que se inician con ello [55]. Esta técnica, conocida como FLICE (*Femtosecond Laser Irradiation followed by Chemical Etching*), puede ser aplicada no sólo *in-fiber*, sino también sobre el *end-face* de fibra, con objeto de conseguir formas determinadas de la misma, o simplemente de mejorar las estructuras creadas con el láser (p. ej. redes de difracción más eficientes). En definitiva, el micromecanizado con láser de fs en combinación con aplicaciones optofluídicas se presenta como uno de los grandes retos que resultan del trabajo realizado.

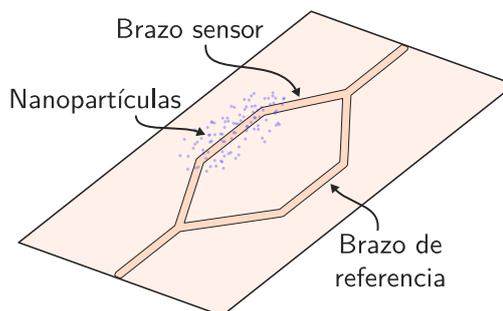


Figura 6.2. Biosensor basado en MZI

<sup>1</sup>El FBG del núcleo es prácticamente insensible a flexiones en la fibra.

<sup>2</sup>Sensor aplicado a un ser viviente para obtener información de un proceso.

<sup>3</sup>Dispositivo que integra una o varias funciones propias de un laboratorio en un único chip, permitiendo el manejo de volúmenes de fluidos extremadamente pequeños ( $\sim$  nL).

<sup>4</sup>Área de investigación y tecnología que combina las ventajas de la microfluídica y la óptica.

## 6.2. Mejoras del setup experimental

Con objeto de mejorar los resultados obtenidos en este trabajo, o con la intención de iniciar nuevas líneas de investigación en el marco del procesado de materiales ópticos mediante láseres de fs, se presentan a continuación diversas mejoras que se pueden desplegar en el setup experimental:

- Los sensores realizados en el trabajo se fundamentan en FBGs inscritos mediante el método *PbP*, por la rapidez de inscripción y, fundamentalmente, por la sencillez de su implementación. Los resultados obtenidos pueden ser mejorados mediante el empleo del método *LbL* y del *PI-b-PI*. Cabe destacar que a lo largo del último mes del proyecto ya se ha conseguido la inscripción de FBGs basados en la técnica *LbL*, aumentando la potencia reflejada y disminuyendo la presencia de modos de cubierta. Además, y también se han realizado pruebas al respecto, esta técnica permite la fabricación de FBGs *tilteados*. No obstante, el gran paso sería generar FBGs mediante *PI-b-PI*, lo cual mejoraría la eficiencia de dichas estructuras notablemente. Para ello, se hace necesaria la **presencia de una lente cilíndrica antes del objetivo microscópico**. De esta forma, se generarían modificaciones planares en el material con cada pulso láser.
- El láser, como se ha detallado en la exposición del setup experimental, permite operar con un PRR de 120 kHz y divisores de dicho valor. No obstante, también tiene capacidad de operar a 4 MHz, aunque, eso sí, sin poder modificar dicho valor. Tener la capacidad de disponer de PRRs configurables en el orden de centenas de kHz, o incluso MHz, resulta apropiado para la fabricación de guías de onda con reducidas pérdidas. Por consiguiente, un **controlador de PRR** que permita trabajar por encima de 120 kHz sería adecuado en el setup.
- Asimismo, aunque no se ha prestado atención a la polarización en este trabajo, es un parámetro que influye sobre las modificaciones inducidas en el material (especialmente en los *nanogratings* asociados al Tipo II). De ahí que su estudio mediante la disposición de un **controlador de polarización** el setup puede ser un aspecto a valorar de cara al futuro.
- Si bien los resultados obtenidos con QPM son correctos, de acuerdo a la literatura existente, la técnica de medida podría mejorarse significativamente simplemente **perfeccionando el sistema de iluminación de la muestra**. Actualmente, la iluminación se basa en fuentes LED de color blanco. Según indica la bibliografía consultada, fuentes monocromáticas situadas en el rango espectral correspondiente al azul pueden ser óptimas para QPM.
- Si bien este último punto no tiene una gran trascendencia, la presencia de distintos objetivos en un cabezal rotatorio podría dotar al láser de una gran flexibilidad de cara al desarrollo de nuevos dispositivos. Adicionalmente a la lente objetivo ya presente en el setup, podría incluirse una con un aumento superior, útil para QPM o simplemente para una mejor caracterización gráfica de las inscripciones; o incluso una con una gran apertura numérica ( $NA > 1$ ) preparada para afrontar **grabados mediante oil immersion**, esto es, la lente se sumerge en líquido adaptador de índice, evitando cualquier tipo de aberración en el haz láser incidente (no hay interfases en la propagación).

# Bibliografía

- [1] Koji Sugioka and Ya Cheng. Ultrafast lasers—reliable tools for advanced materials processing. *Light: Science & Applications*, 3(4):e149, apr 2014.
- [2] Rafael R Gattass and Eric Mazur. Femtosecond laser micromachining in transparent materials. *Nature photonics*, 2(4):219–225, 2008.
- [3] B. Delobelle, R. Salut, F. Courvoisier, and P. Delobelle. A detailed study through the focal region of near-threshold single-shot femtosecond laser ablation nano-holes in borosilicate glass. *Optics Communications*, 284(24):5746–5757, dec 2011.
- [4] B. Poumellec, M. Lancry, A. Chahid-Erraji, and P. G. Kazansky. Modification thresholds in femtosecond laser processing of pure silica: review of dependencies on laser parameters [invited]. *Optical Materials Express*, 1(4):766, jul 2011.
- [5] José Miguel López-Higuera. Biomedical Optical Sensors: Currents and Trends (Invited Paper). In *Advanced Photonics 2016 (IPR, NOMA, Sensors, Networks, SPPCom, SOF)*. OSA, 2016.
- [6] K Miura Davis, Kiyotaka Miura, Naoki Sugimoto, and Kazuyuki Hirao. Writing waveguides in glass with a femtosecond laser. *Optics letters*, 21(21):1729–1731, 1996.
- [7] B. C. Stuart, M. D. Feit, S. Herman, A. M. Rubenchik, B. W. Shore, and M. D. Perry. Nanosecond-to-femtosecond laser-induced breakdown in dielectrics. *Physical Review B*, 53(4):1749–1761, jan 1996.
- [8] Chris B Schaffer, Andre Brodeur, and Eric Mazur. Laser-induced breakdown and damage in bulk transparent materials induced by tightly focused femtosecond laser pulses. *Measurement Science and Technology*, 12(11):1784–1794, 2001.
- [9] LV Keldysh et al. Ionization in the field of a strong electromagnetic wave. *Sov. Phys. JETP*, 20(5):1307–1314, 1965.
- [10] D. Du, X. Liu, G. Korn, J. Squier, and G. Mourou. Laser-induced breakdown by impact ionization in SiO<sub>2</sub> with pulse widths from 7 ns to 150 fs. *Applied Physics Letters*, 64(23):3071–3073, jun 1994.
- [11] Martin Ams, Graham D Marshall, Peter Dekker, Mykhaylo Dubov, Vladimir K Mezentsev, Ian Bennion, and Michael J Withford. Investigation of ultrafast laser–photonic material interactions: challenges for directly written glass photonics. *IEEE journal of selected topics in quantum electronics*, 14(5):1370–1381, 2008.
- [12] Matthias Lenzner, Jörg Krüger, S Sartania, Z Cheng, Ch Spielmann, G Mourou, Wolfgang Kautek, and Ferenc Krausz. Femtosecond optical breakdown in dielectrics. *Physical review letters*, 80(18):4076–4079, 1998.

- [13] K Miura, Jianrong Qiu, H Inouye, T Mitsuyu, and K Hirao. Photowritten optical waveguides in various glasses with ultrashort pulse laser. *Applied Physics Letters*, 71(23):3329–3331, 1997.
- [14] Yasuhiko Shimotsuma, Peter G Kazansky, Jiarong Qiu, and Kazuoki Hirao. Self-organized nanogratings in glass irradiated by ultrashort light pulses. *Physical review letters*, 91(24):247405, 2003.
- [15] C Hnatovsky, RS Taylor, PP Rajeev, E Simova, VR Bhardwaj, DM Rayner, and PB Corkum. Pulse duration dependence of femtosecond-laser-fabricated nanogratings in fused silica. *Applied Physics Letters*, 87(1):014104, 2005.
- [16] Saulius Juodkazis, K Nishimura, S Tanaka, Hiroaki Misawa, Eugene G Gamaly, Barry Luther-Davies, Ludovic Hallo, Philippe Nicolai, and Vladimir T Tikhonchuk. Laser-induced microexplosion confined in the bulk of a sapphire crystal: evidence of multimegabar pressures. *Physical review letters*, 96(16):166101, 2006.
- [17] Kazuyoshi Itoh, Wataru Watanabe, Stefan Nolte, and Chris B Schaffer. Ultrafast processes for bulk modification of transparent materials. *MRS bulletin*, 31(8):620–625, 2006.
- [18] John Canning, Matthieu Lancry, Kevin Cook, and Bertrand Poumellec. New theory of femtosecond induced changes and nanopore formation. In John Canning and Gangding Peng, editors, *Third Asia Pacific Optical Sensors Conference*. SPIE, jan 2012.
- [19] James W. Chan, Thomas Huser, S. Risbud, and D.M. Krol. Structural changes in fused silica after exposure to focused femtosecond laser pulses. *Optics letters*, 26(21):1726–1728, 2001.
- [20] Derong Li, Xiaohua Lv, Shaoqun Zeng, and Qingming Luo. Beam spot size evolution of Gaussian femtosecond pulses after angular dispersion. *Optics Letters*, 33(2):128, jan 2008.
- [21] David Pallares-Aldeiturriaga, Luis Rodriguez-Cobo, Antonio Quintela, and Jose M. Lopez-Higuera. Curvature Sensor Based on In-Fiber Mach–Zehnder Interferometer Inscribed With Femtosecond Laser. *Journal of Lightwave Technology*, 35(21):4624–4628, nov 2017.
- [22] Haibin Zhang, Shane M Eaton, and Peter R Herman. Low-loss Type II waveguide writing in fused silica with single picosecond laser pulses. *Optics Express*, 14(11):4826–4834, 2006.
- [23] Chris B. Schaffer, José F. García, and Eric Mazur. Bulk heating of transparent materials using a high-repetition-rate femtosecond laser. *Applied Physics A*, 76(3):351–354, 2003.
- [24] Weijia Yang, Peter G Kazansky, Yasuhiko Shimotsuma, Masaaki Sakakura, Kiyotaka Miura, and Kazuyuki Hirao. Ultrashort-pulse laser calligraphy. *Applied Physics Letters*, 93(17):171109, 2008.

- [25] Kazuhiro Yamada, Wataru Watanabe, Tadamasa Toma, Kazuyoshi Itoh, and Junji Nishii. In situ observation of photoinduced refractive-index changes in filaments formed in glasses by femtosecond laser pulses. *Optics letters*, 26(1):19–21, 2001.
- [26] Roberto Osellame, Giulio Cerullo, and Roberta Ramponi, editors. *Femtosecond Laser Micromachining*. Springer Berlin Heidelberg, 2012.
- [27] K. I. White. Practical application of the refracted near-field technique for the measurement of optical fibre refractive index profiles. *Optical and Quantum Electronics*, 11(2):185–196, mar 1979.
- [28] A. Barty, K. A. Nugent, D. Paganin, and A. Roberts. Quantitative optical phase microscopy. *Optics Letters*, 23(11):817–819, jun 1998.
- [29] C. J. Bellair, C. L. Curl, B. E. Allman, P. J. Harris, A. Roberts, L. M. D. Delbridge, and K. A. Nugent. Quantitative phase amplitude microscopy IV: imaging thick specimens. *Journal of Microscopy*, 214(1):62–69, apr 2004.
- [30] Kaiming Zhou, Fangcheng Shen, Guolu Yin, and Lin Zhang. Optical fiber micro-devices made with femtosecond laser. In *Advanced Photonics 2016 (IPR, NOMA, Sensors, Networks, SPPCom, SOF)*. OSA, 2016.
- [31] J. Thomas, C. Voigtländer, R.G. Becker, D. Richter, A. Tünnermann, and S. Nolte. Femtosecond pulse written fiber gratings: a new avenue to integrated fiber technology. *Laser & Photonics Reviews*, 6(6):709–723, feb 2012.
- [32] Evgenia Kochkina. *Stigmatic and Astigmatic Gaussian Beams in Fundamental Mode: Impact of Beam Model Choice on Interferometric Pathlength Signal Estimates*. PhD thesis, Technische Informationsbibliothek und Universitätsbibliothek Hannover, 2013.
- [33] Daniele Tosi. Review of chirped fiber bragg grating (CFBG) fiber-optic sensors and their applications. *Sensors*, 18(7):2147, jul 2018.
- [34] Andreas Ioannou, Antreas Theodosiou, Christophe Caucheteur, and Kyriacos Kalli. Direct writing of plane-by-plane tilted fiber Bragg gratings using a femtosecond laser. *Optics Letters*, 42(24):5198, dec 2017.
- [35] Kaiming Zhou, Mykhaylo Dubov, Chengbo Mou, Lin Zhang, Vladimir K. Mezentsev, and Ian Bennion. Line-by-Line Fiber Bragg Grating Made by Femtosecond Laser. *IEEE Photonics Technology Letters*, 22(16):1190–1192, aug 2010.
- [36] A S Chernikov, K S Khorkov, D A Kochuev, R V Chkalov, V G Prokoshev, and N N Davydov. Line-by-line fiber Bragg grating fabrication by femtosecond laser radiation. *Journal of Physics: Conference Series*, 1164:012015, feb 2019.
- [37] Antreas Theodosiou, Amedee Lacraz, Michael Polis, Kyriacos Kalli, Maria Tsangari, Andreas Stassis, and Michael Komodromos. Modified fs-laser inscribed FBG array for rapid mode shape capture of free-free vibrating beams. *IEEE Photonics Technology Letters*, 28(14):1509–1512, jul 2016.

- [38] Ping Lu, Stephen J. Mihailov, Huimin Ding, Dan Grobnic, Robert B. Walker, David Coulas, Cyril Hnatovsky, and Andrei Yu Naumov. Plane-by-Plane Inscription of Grating Structures in Optical Fibers. *Journal of Lightwave Technology*, 36(4):926–931, feb 2018.
- [39] Antreas Theodosiou, Andreas Ioannou, and Kyriacos Kalli. All-in-fibre cladding interferometric and Bragg grating components made via plane by plane femtosecond laser inscription. *Journal of Lightwave Technology*, pages 1–1, 2019.
- [40] Christian Waltermann, Alexander Doering, Michael Köhring, Martin Angelmahr, and Wolfgang Schade. Cladding waveguide gratings in standard single-mode fiber for 3D shape sensing. *Optics Letters*, 40(13):3109, jun 2015.
- [41] A. G. Okhrimchuk, A. V. Shestakov, I. Khrushchev, and J. Mitchell. Depressed cladding, buried waveguide laser formed in a YAG:Nd<sup>3+</sup> crystal by femtosecond laser writing. *Optics Letters*, 30(17):2248, sep 2005.
- [42] R. Scarmozzino, A. Gopinath, R. Pregla, and S. Helfert. Numerical techniques for modeling guided-wave photonic devices. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 6(1):150–162, jan 2000.
- [43] W. W. Li, W. P. Chen, D. N. Wang, Z. K. Wang, and Ben Xu. Fiber inline Mach–Zehnder interferometer based on femtosecond laser inscribed waveguides. *Optics Letters*, 42(21):4438, oct 2017.
- [44] Jason C. Ng, Chengbo Li, Peter R. Herman, and Li Qian. Femtosecond laser writing of a flat-top interleaver via cascaded Mach-Zehnder interferometers. *Optics Express*, 20(16):17894, jul 2012.
- [45] Ismail Laarossi, María Ángeles Quintela-Incera, and José Miguel López-Higuera. Comparative Experimental Study of a High-Temperature Raman-Based Distributed Optical Fiber Sensor with Different Special Fibers. *Sensors*, 19(3):574, jan 2019.
- [46] Stephen Mihailov, Dan Grobnic, Cyril Hnatovsky, Robert Walker, Ping Lu, David Coulas, and Huimin Ding. Extreme Environment Sensing Using Femtosecond Laser-Inscribed Fiber Bragg Gratings. *Sensors*, 17(12):2909, dec 2017.
- [47] K. Cook, C. Smelser, J. Canning, G. le Garff, M. Lancry, and S. Mihailov. Regenerated femtosecond fibre Bragg gratings. In John Canning and Gangding Peng, editors, *Third Asia Pacific Optical Sensors Conference*. SPIE, jan 2012.
- [48] Christian Schulze, Adrian Lorenz, Daniel Flamm, Alexander Hartung, Siegmund Schröter, Hartmut Bartelt, and Michael Duparré. Mode resolved bend loss in few-mode optical fibers. *Optics Express*, 21(3):3170, feb 2013.
- [49] Dietrich Marcuse. Field deformation and loss caused by curvature of optical fibers. *Journal of the Optical Society of America*, 66(4):311, apr 1976.
- [50] Shanshan Zhang, Weigang Zhang, Shecheng Gao, Pengcheng Geng, and Xiaolin Xue. Fiber-optic bending vector sensor based on Mach–Zehnder interferometer exploiting lateral-offset and up-taper. *Optics Letters*, 37(21):4480, oct 2012.

- [51] D. Pallarés-Aldeiturriaga, L. Rodríguez-Cobo, A. Quintela, and J. M. Lopez-Higuera. In-fiber Mach-Zehnder interferometer inscribed with femtosecond laser for high temperature sensing. In Youngjoo Chung, Wei Jin, Byounggho Lee, John Canning, Kentaro Nakamura, and Libo Yuan, editors, *25th International Conference on Optical Fiber Sensors*. SPIE, apr 2017.
- [52] Martin Plöschner, Tomáš Tyc, and Tomáš Čižmár. Seeing through chaos in multimode fibres. *Nature Photonics*, 9(8):529–535, jul 2015.
- [53] S. Egusa, Z. Wang, N. Chocat, Z. M. Ruff, A. M. Stolyarov, D. Shemuly, F. Sorin, P. T. Rakich, J. D. Joannopoulos, and Y. Fink. Multimaterial piezoelectric fibres. *Nature Materials*, 9(8):643–648, jul 2010.
- [54] B Sepúlveda, J Sánchez del Río, M Moreno, F J Blanco, K Mayora, C Domínguez, and L M Lechuga. Optical biosensor microsystems based on the integration of highly sensitive Mach–Zehnder interferometer devices. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 8(7):S561–S566, jun 2006.
- [55] Yves Bellouard, Ali Said, Mark Dugan, and Philippe Bado. Fabrication of high-aspect ratio, micro-fluidic channels and tunnels using femtosecond laser pulses and chemical etching. *Optics Express*, 12(10):2120, 2004.