

TESIS DEFENDIDA POR
Jesús Alberto Nuñez Quintero
Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITÉ

Dr. Serguei Stepanov
Director del Comité

Dr. César Cruz Hernández
Miembro del Comité

Dr. Heriberto Márquez Becerra
Miembro del Comité

Dr. Mikhail Shlyagin
Miembro del Comité

Dr. Pedro Negrete Regagnon
*Coordinador del programa de posgrado
en Óptica*

Dr. David Hilario Covarrubias Rosales
Director de Estudios de Posgrado

5 de Noviembre del 2009.

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN SUPERIOR
DE ENSENADA**



**PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS
EN ÓPTICA**

**INTERFERÓMETRO ADAPTATIVO DE FIBRA ÓPTICA DOPADA CON
ITERBIO PARA LA DETECCIÓN DE ONDAS ULTRASÓNICAS**

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
MAESTRO EN CIENCIAS

Presenta:

JESÚS ALBERTO NUÑEZ QUINTERO

Ensenada, Baja California, México, noviembre del 2009.

RESUMEN de la tesis de Jesús Alberto Nuñez Quintero, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRO EN CIENCIAS en ÓPTICA con orientación en OPTOELECTRÓNICA. Ensenada, Baja California. Noviembre del 2009.

Interferómetro adaptativo de fibra óptica dopada con iterbio para la detección de ondas ultrasónicas

Resumen aprobado por:

Dr. Serguei Stepanov
Director de Tesis

Se desarrolló un arreglo experimental de un sistema interferométrico adaptativo basado en el Mezclado de Dos Ondas (MDO) transitorio vía rejillas dinámicas de población en fibras dopadas con iterbio enfocado a la detección de ondas ultrasónicas en un ancho de banda hasta de 17 MHz. El sistema tiene una configuración en línea y funciona a una longitud de onda de 1064 nm con modulación de fase efectuada por un espejo adherido a un transductor piezoeléctrico. La señal del MDO detectada resultó tener una respuesta lineal proporcionada por la alta contribución de las rejillas de fase y relación directa con la densidad óptica de la fibra. Experimentalmente se caracterizó la dependencia de la señal del MDO en función de la potencia de luz de entrada, del factor de acoplamiento con el espejo retro-reflector y de la amplitud de modulación de fase. Se estudiaron las propiedades adaptativas del sistema determinadas por el tiempo de formación de las rejillas dinámicas menor a 1 ms. Se analizó y optimizó el funcionamiento del sistema interferométrico observando la Relación Señal a Ruido (RSR), determinada por el ruido dominante de intensidad del láser de estado sólido utilizado. Se evaluó el desplazamiento mínimo detectable de 1.8 nm en el ancho de banda 17 MHz. Finalmente se detectaron pulsos y ecos ultrasónicos propagándose en una placa sólida de aluminio inducidos por un láser pulsado Q-switched de 6 ns.

Palabras Clave: interferómetro adaptativo, mezclado de dos ondas, fibra dopada con iterbio, rejillas dinámicas de población.

ABSTRACT of the thesis presented by Jesús Alberto Nuñez Quintero as a partial requirement to obtain the MASTER OF SCIENCE degree in OPTICS with orientation in OPTOELECTRONIC. Ensenada, Baja California, México. November 2009.

Experimental set-up of an adaptive interferometric system based on transient Two-Wave Mixing (TWM) by means of dynamic population gratings on ytterbium doped fiber for detection of ultrasonic waves in a bandwidth of 17 MHz was developed. The system has a linear configuration and works at wavelength 1064 nm with phase modulation made by a mirror stuck in a piezoelectric transducer. The TWM signal detected was linear response due for high contribution of phase gratings and direct relation with optic density of the doped fiber. Experimentally was characterized the dependence of the TWM signal as function of the input power, the coupling factor with the back-reflected mirror and the amplitude phase modulation. It was studied the adaptive properties system determinate by the dynamic grating formation time lower to 1 ms. It was analyzed and optimized the interferometric system operation observing the signal-to-noise-ratio (SNR), determinate by the intensity noise from the solid-state laser utilized. The minimum displacement detectable of 1.8 nm was evaluated in the bandwidth 17 MHz. Finally pulses and echoes ultrasonic spreading through of aluminum solid plate induced by Q-switched pulsed laser of 6 ns were detected.

Keywords: adaptive interferometer, two-wave mixing, ytterbium doped fiber, dynamic population gratings.

*Dedicado con mucho cariño a mis padres,
Elizabeth Quintero y Pedro Nuñez
Y a mis hermanas, Amayrani y Elizabeth*

Agradecimientos

A mis padres a quienes siempre les estaré agradecido por haberme guiado por el camino de la vida. Mis éxitos son reflejo de sus luchas.

Un especial agradecimiento al Dr. Serguei Stepanov por la oportunidad de haber colaborado junto a él, por su paciencia, consejos, enseñanza y apoyo firme a lo largo de esta investigación. Muchas gracias.

A mis compañeros y amigos del laboratorio, Daniel, Eliseo y Marcos por su apoyo, críticas, sugerencias y amistad.

A los miembros del comité, Dr. César Cruz, Dr. Heriberto Márquez y Dr. Mikhail Shlyagin por su tiempo y recomendaciones durante el desarrollo de este trabajo.

A mis amigos de generación por haber compartido extraordinarias enseñanzas y momentos a recordar.

Al departamento de Óptica y al CICESE por el gran apoyo que nos brinda a todos los estudiantes.

Al CONACYT por su apoyo económico y la oportunidad que otorga a todos los estudiantes de superarse.

CONTENIDO

	Página
Resumen español.....	i
Abstract.....	ii
Dedicatorias.....	iii
Agradecimientos.....	iv
Contenido.....	v
Lista de Figuras.....	vii
Lista de Tablas.....	xiii
I. Introducción.....	1
I.1 Objetivos.....	3
I.2 Organización.....	3
II. Conceptos básicos.....	5
II.0.1 Introducción.....	5
II.1 Fibras ópticas dopadas con tierras raras.....	5
II.1.1 Fibra dopada con iterbio.....	6
II.1.2 Dinámica de la saturación de absorción en el sistema de dos niveles.....	8
II.1.3 Transmitancia no lineal de una fibra dopada.....	9
II.2 Rejillas dinámicas en fibras dopadas.....	10
II.3 Mezclado de dos ondas transitorio por las rejillas dinámicas en fibras.....	13
II.3.1 Ecuaciones de ondas acopladas del MDO.....	15
II.4 Interferómetros adaptativos con cristales fotorrefractivos.....	17
II.5 Interferómetros adaptativos con fibras dopadas.....	17
II.6 Rejillas dinámicas en fibra dopada con iterbio.....	21
II.7 Conclusiones parciales.....	22
III. Equipo y muestras experimentales.....	23
III.0.1 Introducción.....	23
III.1 Canal de detección.....	23
III.1.1 Analizador de espectros ópticos.....	23
III.1.2 Fotodetector.....	23
III.1.3 Osciloscopio.....	24
III.2 Caracterización del láser de estado sólido de Nd:YAG.....	25
III.2.1 Acoplamiento de la energía emitida por el láser a fibra óptica.....	25
III.2.1.1 Acoplamiento del haz gaussiano a la fibra óptica.....	26
III.2.2 Verificación de la longitud de onda de emisión del láser.....	28
III.2.3 Medición de la potencia de salida del láser.....	29
III.2.4 Evaluación de la longitud de coherencia del láser.....	29
III.2.5 Medición del ruido del láser.....	31

CONTENIDO (continuación)

	Página
III.2.4 Evaluación de la longitud de coherencia del láser.....	29
III.3 Sistema de modulación de fase.....	35
III.3.1 Generador de funciones.....	36
III.4 Fibras dopadas con iterbio.....	35
III.4.1 Fluorescencia transitoria.....	37
III.4.2 Transmitancia no lineal.....	40
III.5 Conclusiones parciales.....	41
IV. Investigación experimental del MDO transitorio en FDY.....	42
IV.0.1 Introducción.....	42
IV.1 Configuración experimental.....	42
IV.2 Caracterización experimental de la respuesta del MDO transitoria.....	45
IV.2.1 Balance general de potencias.....	45
IV.2.2 Evaluación de la contribución de fluorescencia.....	46
IV.2.3 Procesamiento y separación de las contribuciones en las señales MDO...	47
IV.2.4 Caracterización de las componentes en las señales del MDO.....	50
IV.3 Evaluación de las propiedades adaptativas del interferómetro.....	52
IV.4 Evaluación de la relación señal a ruido y sensibilidad del sistema interferométrico.....	55
IV.5 Condiciones óptimas del sistema interferométrico.....	58
IV.6 Conclusiones parciales.....	59
V. Detección de señales ultrasónicas reales.....	61
V.0.1 Introducción.....	61
V.1 Detección de señales rápidas.....	61
V.2 Detección experimental de señales ultrasónicas.....	62
V.3 Conclusiones parciales.....	66
VI. Resultados principales y conclusiones del trabajo.....	67
VI.1 Conclusión general del trabajo.....	69
VI.2 Trabajo futuro.....	69
Bibliografía.....	71

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura</i>		Página
1	Sistema efectivo de tres niveles de los iones Yb^{+3} en la fibra óptica de silicio con bombeo típico a 975 nm (a). Secciones transversales de absorción y emisión de la transición fundamental del Yb^{+3} en sílice (b) (Simpson y Digonnet, 2001).....	7
2	Sistema efectivo de dos niveles simplificado de los iones Yb^{+3} en la fibra óptica de sílice (a). Dependencia del coeficiente de absorción óptica en función de la intensidad aplicada a la FDY (b).....	7
3	Diagrama del arreglo experimental para el grabado de rejillas permanentes en fibra óptica dopada con germanio (Meltz <i>et al.</i> , 1989).....	11
4	Esquema de difracción de Bragg de la rejilla en fibra óptica dopada.....	12
5	Arreglo experimental para grabar y observar rejillas dinámicas de Bragg en fibra dopada con erbio con bombeo óptico (Friskén, 1992).....	12
6	Grabado de la rejilla dinámica y MDO en una fibra óptica dopada con alguna tierra rara.....	13
7	Potencia de salida de un interferómetro como función de $\Delta\phi$. Se muestran los puntos operacionales de la rejilla dinámica de amplitud y de fase.....	14
8	Respuesta de la señal del MDO por la rejilla dinámica en una fibra óptica dopada con alguna tierra rara a una modulación de fase rectangular en la onda “S”.....	15
9	Esquema de un interferómetro en línea utilizado para la investigación del MDO transitorio en fibras dopadas con erbio en (Stepanov y Pérez Cota, 2007) (a). El recuadro (b) muestra la señal MDO transitorio normalizada observada para una modulación rectangular con amplitud $a = V_\pi$ y $b = V_{\pi/4}$ con promediación de 512 trazos en el osciloscopio.....	18

LISTA DE FIGURAS (continuación)

<i>Figura</i>		Página
10	Dependencia experimental de la amplitud relativa en la señal del MDO de la potencia de entrada P_0 observada en 0.5 (cuadros), 2.1 (triángulos) y 8.5 m (círculos) de longitud de fibra (evaluada para coeficientes de acoplamiento $\gamma = 0.4, 0.7$ y 0.2 , respectivamente). Las líneas continuas representan las dependencias teóricas calculadas para $\alpha_0 L = 0.21, 0.86$ y 3.6 para $\gamma = 0.01, 0.2, 0.4$ (sólida, recortada y punteada, respectivamente). Las líneas punteadas muestran la curva teórica de la configuración simétrica calculada para $\alpha_0 L = 0.21$ (Stepanov y Pérez Cota, 2007).....	19
11	Diagrama de la configuración experimental para la excitación y observación del ultrasonido inducido por un láser pulsado (Rodríguez Montero <i>et al.</i> , 2009) (a) y el trazo del osciloscopio de la señal ultrasónica detectada en una placa de aluminio de 10 mm.	20
12	Arreglo experimental utilizado en experimentos del MDO transitorio en fibras dopadas con iterbio en (Stepanov <i>et al.</i> , 2007) (a). En el recuadro (b) se observa la señal típica del MDO transitorio a $\lambda = 1064$ nm.....	21
13	Curva de responsividad (a) y circuito eléctrico interno (b) del fotodetector DET10C de la compañía Thorlabs.....	24
14	Configuración experimental empleado para la caracterización del láser de Nd:YAG.....	25
15	Arreglo experimental para acoplar la energía emitida del láser de Nd:YAG a la fibra óptica.....	26
16	Transmisión del haz gaussiano a través de una lente convergente (Saleh, Fundamentals of Photonics, pág. 95).....	27
17	Ancho espectral y longitud de onda de emisión del láser medido por el espectrofotómetro.....	29
18	Arreglo experimental para la evaluación de la longitud de coherencia y el ruido de fase del láser de Nd:YAG. En el recuadro se muestra la potencia detectada por la interferencia de las señales reflejadas en el interferómetro.....	30

LISTA DE FIGURAS (continuación)

<i>Figura</i>		Página
19	Visibilidad del patrón de interferencia en función de la diferencia de caminos ópticos (ΔL_n).....	31
20	Arreglo experimental empleado para la evaluación del ruido de intensidad del láser de Nd:YAG. El recuadro muestra el ruido de intensidad del láser a una potencia promedia de 1 mW detectada...	32
21	Ruido de intensidad del láser (a) y evaluación teórica para el ruido de disparo (b) en función de la potencia de entrada (ancho de banda de 1 MHz).....	33
22	Ruido interferométrico detectado a una diferencia de camino óptico $\Delta L_n \sim 1\text{m}$ (a). Señal de interferencia variante en el tiempo observada en la entrada DC del osciloscopio (b).....	34
23	Dependencia entre las variaciones de longitud de onda de emisión ($\Delta\lambda$) y la intensidad a la salida del láser de Nd:YAG (a). En la figura (b) se muestra el ruido interferométrico como función de la diferencia de camino óptico (ΔL_n) obtenido experimentalmente...	34
24	Arreglo experimental para la caracterización del modulador piezoeléctrico. En el recuadro la línea roja representa la señal sinusoidal aplicada al actuador piezoeléctrico y la línea azul representa la respuesta al voltaje V_π	35
25	Configuración experimental para la observación de la fluorescencia transitoria en las fibras dopadas con iterbio. En el recuadro se observa el perfil de potencia acoplada a la entrada de la fibra (línea punteada) y la señal en forma de aleta representa la fluorescencia.....	37
26	Dependencia de los tiempos de crecimiento y de decaimiento de fluorescencia en función de la potencia de entrada (a). Evaluación de la potencia de saturación en las fibras dopadas empleando el tiempo de crecimiento de la fluorescencia (b) (fibra Yb125 de 94 cm).....	38
27	Dependencia de la amplitud de la señal de fluorescencia contra la potencia de entrada (fibra Yb125 de 94 cm).....	39

LISTA DE FIGURAS (continuación)

<i>Figura</i>		Página
28	Configuración experimental para la medición de la transmitancia no lineal en las fibras dopadas con iterbio. En el recuadro se muestra la transmitancia no lineal de la fibra Yb125.....	40
29	Arreglo experimental del sistema interferométrico.....	43
30	Imagen del acoplador a la salida de la fibra con el modulador piezoeléctrico.....	44
31	Señal detectada para tres distintos ajustes de distancia fibra-espejo. Los trazos muestran la interferencia destructiva (a) y constructiva (c) entre la señal rectangular modulada y la señal del MDO. El trazo (b) muestra la señal MDO prácticamente limpia de señal parásita (es decir, sin componente rectangular).....	44
32	Señal detectada en la entrada E2 en ausencia de ondas reflejadas en función de la potencia de entrada.....	47
33	Respuesta del MDO transitorio en la fibra Yb125 ($P_{in} = 17$ mW, $\gamma \cong 0.05$, $L = 39$ cm) observada a distintas amplitudes de modulación: $V_{\pi/8}$ (a), V_{π} (b), $V_{\pi/2}$ (c) y en la fibra Yb1200 ($P_{in} = 19$ mW, $\gamma \cong 0.23$, $L = 3$ m) a una amplitud de modulación $V_{\pi/2}$ (d)....	48
34	Señal de la respuesta del MDO transitorio (a) restando a la señal inicial desplazada medio período (b) obteniéndose la componente impar (c).....	48
35	Componente impar y par de las respuestas MDO en la fibra Yb125 ($P_{in} = 17$ mW, $\gamma \cong 0.05$, $L = 39$ cm) a distintas amplitudes de modulación: V_{π} (a, b) y $V_{\pi/2}$ (c, d), y en la fibra Yb1200 ($P_{in} = 19$ mW, $\gamma \cong 0.23$, $L = 3$ m) a una amplitud de modulación $V_{\pi/2}$ (e, f), respectivamente.....	49
36	Dependencia experimental de la amplitud normalizada de la componente impar (a) y de la componente par (b) en función del voltaje de modulación. La línea sólida representa el ajuste teórico con $V_{\pi} = 12.74 V_{p-p}$ (Fibra Yb125, $L = 39$ cm, $P_{in} = 17$ mW, $\gamma \cong 0.05$).....	50

LISTA DE FIGURAS (continuación)

<i>Figura</i>		Página
37	Dependencia experimental de la amplitud de la componente impar (a) y de la componente par (b) en función del factor de acoplamiento (Fibra Yb125, $L = 39$ cm, $P_{in} = 17$ mW).....	51
38	Dependencia experimental de la amplitud de la componente impar (a) y par (b) en función de la potencia de entrada al acoplador 50/50 (Fibra Yb125, $L = 39$ cm, $\gamma \cong 0.05$).....	52
39	Evaluación del tiempo de relajación del pulso positivo (a) y negativo (b) en la componente impar obtenido a una amplitud de modulación $V_{\pi/2}$ y del pulso de la componente par (d) obtenido a una amplitud de modulación V_{π} de la respuesta del MDO transitorio detectada en la fibra Yb125 ($L = 39$ cm, $\gamma \cong 0.05$, $P_{in} = 17$ mW).....	53
40	Dependencia experimental del tiempo de relajación inverso de la respuesta del MDO transitorio en función de la potencia de entrada (a) en la Fibra Yb125 ($L = 39$ cm, $P_{sat} = 8$ mW, $\tau_0 = 0.8$ ms) e Yb1200 ($L = 3$ m, $P_{sat} = 16$ mW, $\tau_0 = 0.75$ ms). Las líneas recortadas representan τ_0^{-1} . Amplitud de la respuesta del MDO en función de la fase sinusoidal modulada en la fibra Yb125 (b) (frecuencia de resonancia del piezoeléctrico ~ 16 KHz).....	54
41	Trazo de la respuesta máxima del MDO transitorio obtenida con promediación de 512 trazos a un voltaje de modulación $V_{\pi/2}$ (línea roja). El trazo encimado (azul) representa el nivel estacionario (V_{st}) y el ruido de la señal detectada sin modulación de la onda reflejada “S” y sin promediación.....	55
42	Dependencia entre la amplitud de la señal MDO y el nivel V_{Nrms} del ruido contra la potencia de entrada (a) en la fibra Yb125 ($L = 39$ cm, $P_{in} = 17$ mW, $\gamma \cong 0.05$). La imagen (b) muestra la RSR.....	56
43	Dependencia de la amplitud de la señal MDO y el nivel V_{Nrms} del ruido contra el factor de acoplamiento (a) en las fibras Yb125 ($L = 39$ cm, $P_{in} = 17$ mW, $\alpha_0 L = 0.76$) e Yb1200 ($L = 300$ cm, $P_{in} = 19$ mW, $\alpha_0 L = 1.6$). La imagen (b) muestra la RSR.....	57

LISTA DE FIGURAS (continuación)

<i>Figura</i>		Página
44	Amplitud de la respuesta del MDO contra el desplazamiento de la superficie de prueba (a) observada con las fibras Yb125 ($L = 39$ cm, $P_{in} = 17$ mW, $\gamma \cong 0.05$) e Yb1200 ($L = 3$ m, $P_{in} = 19$ mW, $\gamma \cong 0.2$) en un ancho de banda de 17 MHz. Dependencias similares para la relación RSR (b).....	57
45	Trazos del osciloscopio observados sin promediación en la fibra Yb1200 ($L = 300$ cm, $P_{in} = 19$ mW, $\gamma \cong 0.2$) al aplicar un pulso positivo (a) y negativo (d) de 30 μ s desplazando por $\lambda/8$ (b, e) y por $\lambda/32$ (c, f) el espejo.....	62
46	Arreglo experimental del sistema de excitación y detección de pulsos ultrasónicos.....	63
47	Señales ultrasónicas (en verde) detectadas por el sistema interferométrico adaptativo obtenida en acoplamiento AC con promediación de 512 tramas con la fibra Yb1200 ($\alpha_0 L = 1.4$, $L = 3$ m, $\gamma \sim 0.4$). El pulso emitido por el láser pulsado Q-switched es representado por el trazo en azul.....	64
48	Respuesta del detector PDA10CS a un pulso de 6 ns generado por el laser pulsado (a) y amplitud de la señal sinusoidal detectada por el detector en función de la frecuencia de modulación de intensidad (b).....	65

LISTA DE TABLAS

Tabla		Página
I	Caracterización de las señales reflejadas por las terminales libres clivadas del acoplador 50/50.....	33
II	Voltaje de modulación para distintos piezoeléctricos.....	35
III	Características básicas de las fibras dopadas con iterbio.....	36
IV	Resultados obtenidos en las fibras dopadas con iterbio.....	39
V	Tiempos de relajación del pulso positivo y negativo en las componentes de la señal MDO impar a distintas amplitudes de modulación.....	53
VI	Velocidad longitudinal y transversal ultrasónica en aluminio sólido.....	53

Capítulo I

Introducción

Uno de los más grandes impactos englobados a la óptica surgió con la invención del láser (realizado experimentalmente por Theodore Maiman en 1960) innovando tecnología revolucionaria en la mayoría de las áreas de la ciencia originado por su habilidad al generar luz altamente coherente, intensa y bien colimada a una longitud de onda bastante precisa. Recientemente algunas aplicaciones con láseres han contribuido significativamente al área de pruebas no destructivas mediante el ultrasonido (Scruby y Drain, 1990). El ultrasonido es una onda acústica de presión o de desplazamiento transversal presente por encima al límite superior del rango audible (> 20 KHz) en un individuo hasta frecuencias del orden de GHz. Ciertos sistemas de inspección ultrasónica son normalmente usados en la medicina para visualizar las partes internas del ser humano, o en la industria para realizar pruebas no destructivas en diversos materiales en búsqueda de fallas, grosores del mismo, o calidad de soldadura, entre otras numerosas aplicaciones.

En (Scruby y Drain, 1990) mostraron varias técnicas para generar ultrasonido por medio de pulsos de luz láser y en (Dewhurst y Shan, 1999) se describen métodos de detección interferométrica de señales ultrasónicas mediante la luz reflejada por la superficie bajo prueba. Ambos procedimientos de generación y detección ultrasónica desarrollados mediante sistemas ópticos tienen muy importantes beneficios a la industria, tales como: operación a distancia sin necesidad de estar en contacto con la muestra, alta resolución espacial y temporal.

Para la detección de ultrasonido en objetos reales con superficies rugosas y bajo condiciones industriales (es decir, en presencia de vibraciones mecánicas, cambios de temperatura ambiental, o en objetos en movimiento) los interferómetros basados en las rejillas dinámicas en cristales fotorrefractivos (Brignon y Huignard, 2004) o en semiconductores es una buena alternativa (Dewhurst y Shan, 1999). Para resolver algunas desventajas de estos dispositivos (en particular, baja velocidad de formación de la rejilla o

baja sensibilidad), los interferómetros adaptativos basados en la formación de rejillas dinámicas en fibra óptica dopada con tierras raras fueron propuestos en (Stepanov y Plata, 2004).

Las rejillas dinámicas de este tipo han sido estudiadas ampliamente y observadas por primera vez en fibra óptica dopada con erbio en (Friskén, 1992). Los detalles de mecanismos de formación y propiedades de las rejillas se discuten en el reciente artículo en revisión (Stepanov, 2008). Desde entonces han incursionado en aplicaciones como filtros ópticos de fibra sintonizables de banda angosta (Fischer *et al.*, 1993; Feuer, 1998), generación de una sola frecuencia en láseres de fibra óptica (Horowitz *et al.*, 1993; Paschotta *et al.*, 1999) e interferómetros adaptativos para la detección de vibraciones mecánicas (Stepanov *et al.*, 2004; García *et al.*, 2007) de nuestro particular interés en esta investigación.

Recientemente se publicó un artículo sobre estudios de rejillas dinámicas en fibras ópticas dopadas con diferentes concentraciones de erbio (Stepanov y Pérez Cota, 2007), obteniendo información experimental para el desarrollo de un interferómetro adaptativo. Las pruebas detalladas de dicho interferómetro adaptativo operando a longitud de onda alrededor de 1492 nm en configuración lineal, proporcionaron favorables características como sensor de ondas ultrasónicas (Stepanov *et al.*, 2008) aunque con la desventaja para algunas aplicaciones de que la respuesta del interferómetro resultó ser en general de respuesta cuadrática, con propiedades adaptativas y sensibilidad no suficiente.

En (Stepanov *et al.*, 2007) se reportó la formación de rejillas dinámicas empleando fibras dopadas con iterbio con absorción saturable a una longitud de onda de 1064 nm, observaron una respuesta lineal y con mayor velocidad en comparación al desarrollado con fibra dopada con erbio. Por estas razones se ha propuesto el desarrollo de un interferómetro adaptativo mediante fibra dopada con iterbio iluminándola con un láser de estado sólido de Nd:YAG de bajo ruido con el fin de mejorar la: relación señal a ruido, linealidad de repuesta, sensibilidad y propiedades adaptativas.

I.1 Objetivos

Los principales objetivos de esta investigación son los siguientes:

- 1.- Desarrollar un sistema experimental del interferómetro adaptativo basado en el mezclado de dos ondas transitorio en fibras ópticas dopadas con iterbio para una longitud de onda de grabado de 1064 nm. Caracterizar los elementos principales del sistema: láser de estado sólido de Nd:YAG de onda continua, fibras dopadas con iterbio y modulador piezoeléctrico.
- 2.- Investigar experimentalmente el mezclado de dos ondas transitorio a una longitud de onda 1064 nm en fibras ópticas dopadas con iterbio sin bombeo óptico y su dependencia como función de la potencia de entrada, la amplitud de modulación y el factor de acoplamiento.
- 3.- Analizar el sistema desarrollado como un sensor para la detección de señales ultrasónicas en el rango de frecuencias de hasta 20 MHz, así como evaluar sus parámetros más importantes: fuente de ruido dominante, sensibilidad del sensor, propiedades adaptativas, etc.
- 4.- Realizar pruebas de detección con señales de ultrasonido real inducidas por un láser de Nd:YAG pulsado Q-switched en una placa metálica mediante el interferómetro adaptativo desarrollado y en base a los resultados obtenidos, generar recomendaciones para el desarrollo de un prototipo para aplicaciones reales.

I.2 Organización

El presente trabajo de tesis está estructurado de forma general en los siguientes capítulos:

El capítulo 2 constituye el fundamento teórico del mezclado de dos ondas transitorio vía rejillas dinámicas en fibras ópticas dopadas con iterbio basado en el sistema de dos niveles.

En el capítulo 3 se ha añadido la caracterización descriptiva de los dispositivos y componentes más importantes del interferómetro adaptativo desarrollado mediante sistemas experimentales.

El capítulo 4 muestra una serie de experimentos del mezclado de dos ondas transitorio en fibras dopadas con iterbio a la longitud de onda de 1064 nm que conduce a una discusión de las condiciones óptimas de operación del sistema interferométrico.

En el capítulo 5 se pone a prueba el sistema interferométrico adaptativo detectando desplazamientos nanométricos con duración de fracciones de microsegundos y ondas ultrasónicas propagándose a través de una placa de aluminio e inducidas por un láser de Nd:YAG pulsado Q-switched.

Finalmente, se muestran los resultados principales del trabajo en el capítulo 6, la conclusión general del mismo y el trabajo futuro.

Capítulo II

Conceptos básicos

II.0.1 Introducción

Para comprender la investigación desarrollada en este trabajo es necesario definir y aclarar algunos conceptos básicos que justifiquen el estudio realizado. Por esto, el enfoque del capítulo presente es explicar algunos términos fundamentales concernientes a fibras dopadas con iterbio, mezclado de dos ondas e interferometría adaptativa. Asimismo, se comenta detalladamente el proceso de formación de rejillas dinámicas a través de la fibra óptica dopada con alguna tierra rara.

II.1 Fibras ópticas dopadas con tierras raras

Una fibra óptica (Saleh y Teich, 1991) es una guía de onda dieléctrica cilíndrica compuesta de materiales con bajas pérdidas como el vidrio de sílice. Está conformada por un núcleo central en el cual la luz es guiada por reflexión total interna, envuelto en un revestimiento exterior con índice de refracción ligeramente menor. En términos de óptica electromagnética la luz se propaga en la fibra en forma de modos transversales, los cuales tienen sus propias constantes de propagación y un perfil fijo de distribución transversal del campo electromagnético. En una fibra monomodo (con el diámetro del núcleo D_n y diferencia entre índices de refracción Δn mínima) existe solo un modo fundamental con el perfil casi gaussiano, el cual está caracterizado por el diámetro modal D_M .

Las fibras ópticas son dispositivos sensibles a ciertas cantidades físicas como temperatura, estrés mecánico, presión, vibraciones, etc., por lo cual han innovado en el área de sensores ópticos (Kersey, 1996). Existe también una gran variedad de fibras ópticas comerciales dopadas con diferentes tierras raras (Yb, Er, Nb, por mencionar algunas) enfocadas a distintas aplicaciones tecnológicas como amplificadores (Becker *et al.*, 1999) o láseres (Simpson, 2001). La fabricación de las fibras dopadas a grandes escalas se realiza

mediante técnicas tradicionales como deposición química por vapor modificado (Poole *et al.*, 1985) y más recientes, como deposición directa de nano-partículas (Hotoleanu *et al.*, 2002). Los experimentos en este trabajo se efectuaron con la fibra dopada con iterbio (FDY), por lo cual se concentra a continuación en las características esenciales de ésta.

II.1.1 Fibra dopada con iterbio

El iterbio (Yb) es un elemento químico perteneciente al grupo de las tierras raras usado como dopante en las fibras ópticas de silicio en forma de ión trivalente Yb^{3+} . Un modelo simplificado pero bastante realístico de los iones de Yb^{3+} incrustados en sílice es mostrado en la figura 1a como un sistema láser de tres niveles de energía (Siegman, 1986): el estado base, el estado metaestable y el estado excitado.

Desde el punto de vista espectroscópico, el Yb^{3+} en sílice tiene una banda de absorción desde 850 nm hasta 1070 nm (Digonnet, 2001; Pask 1995) – véase figura 1b. En ausencia de bombeo óptico todos los iones de iterbio se encuentran en el estado base. Al iluminar la FDY a una longitud de onda dentro de su banda de absorción (por ejemplo, a 975 nm), los iones absorben energía y son llevados al estado excitado. Del estado excitado los iones decaen al estado metaestable casi instantáneamente (con un tiempo característico de $\sim 6 \mu\text{s}$) a través de una transición no radiativa (por ejemplo, la emisión de un fonón).

Del estado metaestable los iones decaen al estado base en aproximadamente $\tau_0 \approx 0.7 \sim 1 \text{ ms}$ (Paschota *et al.*, 1997), liberando un fotón en el rango espectral $\lambda \approx 900 \sim 1400 \text{ nm}$ con energía igual a la diferencia energética entre el estado metaestable y el estado base. Ésta radiación incoherente resultante por el proceso de emisión espontánea está conformada por fotones que se desplazan a distintas direcciones, fase y estado de polarización. A estas emisiones se les conoce como fluorescencia.

Al igual, si un ión del estado metaestable es liberado mediante un fotón, otro fotón es generado con las mismas características de longitud de onda, fase y dirección de propagación. A este fenómeno se le conoce como emisión estimulada. Durante el proceso de bombeo, después de un lapso de tiempo se acumulan en el estado metaestable más iones de iterbio que en el estado base, lográndose una inversión de población, formando de esta manera, un medio óptico activo o con ganancia.

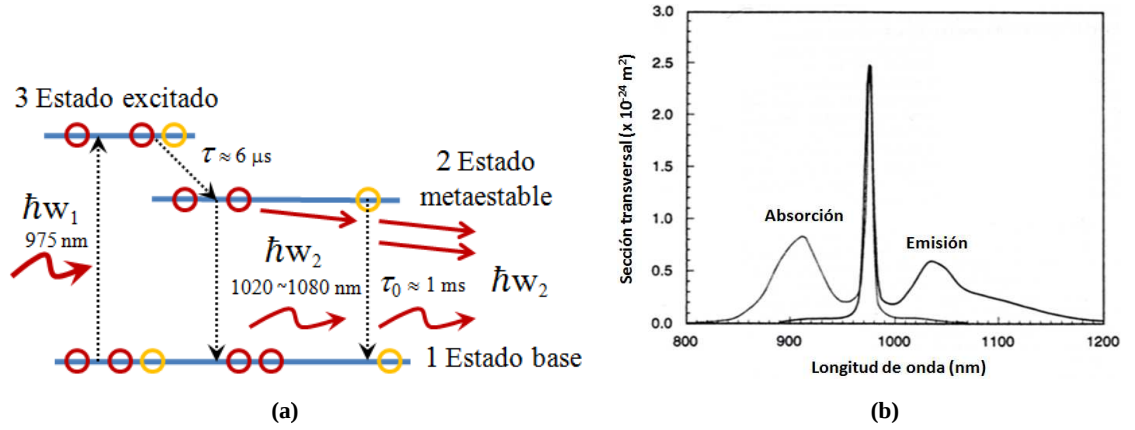


Figura 1. Sistema efectivo de tres niveles de los iones Yb^{+3} en la fibra óptica de silicio con bombeo típico a 975 nm (a). Secciones transversales de absorción y emisión de la transición fundamental del Yb^{+3} en sílice (b) (Simpson y Digonnet, 2001).

A longitudes de onda por debajo a ~ 990 nm (Simpson y Digonnet, 2001), la FDY se comporta como un sistema de tres niveles donde es posible alcanzar la inversión de población. Al contrario, a longitudes de onda incidentes mayores a ésta dentro de la banda de absorción, se simplifica a un sistema de dos niveles como se observa en la figura 2a. Iluminando a estas longitudes de onda no se puede lograr inversión de población, pero al incrementar la población en el nivel 2 pueden saturar significativamente la transición fundamental entre el nivel 1 y el nivel 2.

Si no entra en consideración las transiciones del estado excitado al estado metaestable inducidos por la longitud de onda de bombeo (alrededor de 975nm), el sistema de dos niveles efectivos también es válido para iluminar con esta longitud de onda (ver figura 2a). Es claro que en esta aproximación también podemos observar la inversión de población.

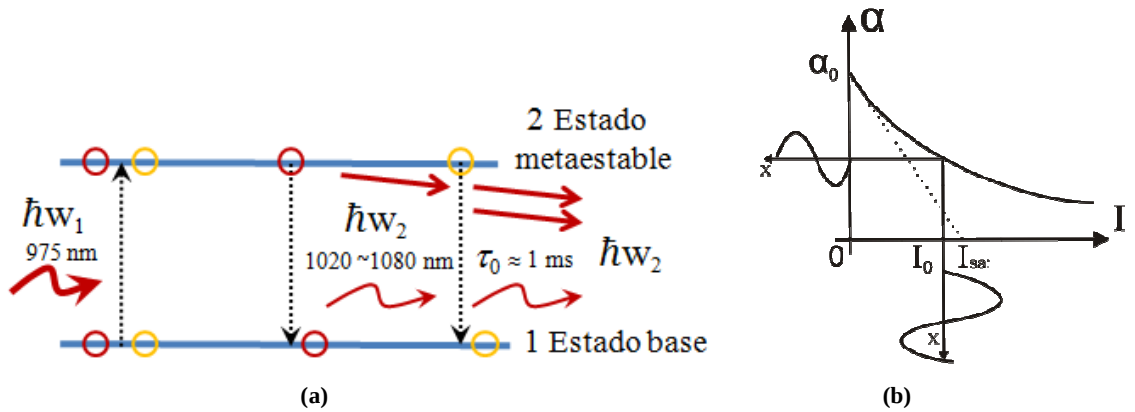


Figura 2. Sistema efectivo de dos niveles simplificado de los iones Yb^{+3} en la fibra óptica de sílice (a). Dependencia del coeficiente de absorción óptica en función de la intensidad aplicada a la FDY (b).

II.1.2 Dinámica de la saturación de absorción en el sistema de dos niveles

La ecuación de razón de un sistema de dos niveles se presenta a continuación de forma muy sencilla y general (Siegman, 1986) en función de la intensidad de entrada (I), la diferencia de población ($\Delta N(t)$) y la diferencia de población en equilibrio térmico (ΔN_0)

$$\frac{d}{dt} \Delta N(t) = -2 I \Delta N(t) - \frac{\Delta N(t) - \Delta N_0}{\tau}, \quad (1)$$

con el tiempo de relajación (τ_g) del ión de iterbio excitado

$$\tau_g^{-1} = \tau_0^{-1} \left(\frac{I}{I_{sat}} + 1 \right). \quad (2)$$

La diferencia de población en estado estacionario (ΔN_{st}) es obtenida mediante

$$\Delta N_{st} = \frac{\Delta N_0}{1 + I/I_{sat}}, \quad (3)$$

y la intensidad de saturación (I_{sat}) es

$$I_{sat} = \frac{\hbar \omega}{\tau_0 (\sigma_a + \sigma_e)}, \quad (4)$$

donde τ_0 es el tiempo de relajación del estado metaestable al estado básico (~ 1 ms para FDY), σ_a y σ_e son las secciones transversales de absorción y emisión respectivamente, y $\hbar \omega$ es la energía del fotón incidente a la fibra dopada.

El coeficiente de absorción óptica (α_z) está dado por (Siegman, 1986)

$$\alpha_z = \frac{\alpha_0}{1 + I/I_{sat}}, \quad (5)$$

donde α_0 es la absorción inicial no saturada de la fibra definida como

$$\alpha_0 = N_0 \sigma_a, \quad (6)$$

y N_0 es la concentración total de iones activos.

Al analizar la ecuación (5) podemos ver que la absorción óptica varía inversamente con la intensidad de luz aplicada a la fibra y directamente con la intensidad de saturación característica de la misma – véase figura 2b. Estas variaciones en el perfil de absorción (es

decir, “fusión de huecos espaciales” (Siegman, 1986)) son vitales en la formación de rejillas dinámicas de población como se explica en la sección II.2.

La potencia de saturación (P_{sat}) - parámetro específico de cada fibra dopada - depende del área modal de la fibra y de las características de los iones activos (de iterbio en nuestro caso), y es definida como

$$P_{sat} = \frac{\pi}{4} D_M^2 I_{sat}. \quad (7)$$

Obsérvese que el valor de la potencia de saturación es directamente proporcional a la intensidad de saturación, por ello, se puede substituir fácilmente el término I/I_{sat} por el valor de P/P_{sat} en las ecuaciones (2), (3) y (5).

II.1.3 Transmitancia no lineal de una fibra dopada

Empleando el análisis de la sección anterior podemos considerar como la potencia de luz se propaga a través de una fibra con saturación de absorción óptica. Es posible describir la potencia de luz en estado estacionario de propagación en cada punto (con una coordenada z) a lo largo de la fibra dopada mediante la ecuación (Saleh y Teich, 2001):

$$\frac{\delta P(z)}{\delta(z)} = -\alpha_z P(z), \quad (8)$$

donde α_z es el coeficiente de absorción óptica (ecuación (5)) y $P(z)$ es la potencia en esta sección transversal de la fibra. Por lo tanto, substituyendo la ecuación (5) en la ecuación anterior y aplicando la potencia normalizada $P_n = P/P_{sat}$ y la coordenada normalizada $\alpha_0 z \rightarrow z_n$, se obtiene:

$$\frac{\delta P_n(z_n)}{\delta(z_n)} = -\frac{P_n(z_n)}{1 + P_n(z_n)}. \quad (9)$$

Al resolver la ecuación (9) y considerando $P_n(0) = P_{ent}/P_{sat}$ obtenemos:

$$P_n(z_n) = W[e^{-z_n}(P_{ent}/P_{sat})e^{P_{ent}/P_{sat}}], \quad (10)$$

donde $W(x)$ es la función especial de Lambert, la cual representa una solución analítica de la ecuación $x = y(x) \cdot \exp[y(x)]$. Ésta solución general nos aporta la distribución de potencia a través de la longitud de la fibra.

Con ayuda de la solución de la ecuación (10) es posible obtener la transmitancia no lineal (Stepanov *et al.*, 2004) de una fibra en función de la potencia de entrada normalizada P_{ent}/P_{sat}

$$T = \frac{P_n(z_n)}{P_{ent}/P_{sat}} = \frac{W[e^{-z_n}(P_{ent}/P_{sat})e^{P_{ent}/P_{sat}}]}{P_{ent}/P_{sat}}. \quad (11)$$

En esta ecuación también es necesario introducir un parámetro experimental auxiliar para compensar las pérdidas entre los contactos de fibra convencional y la fibra dopada denominado transmitancia por contacto (T_C). De esta manera resulta la ecuación final:

$$T = T_C \frac{W[T_C \cdot e^{-z_n}(P_{ent}/P_{sat})e^{T_C(P_{ent}/P_{sat})}]}{P_{ent}/P_{sat}}. \quad (12)$$

II.2 Rejillas dinámicas en fibras dopadas

Una rejilla grabada en una fibra óptica se define como la sección donde el índice de refracción ó la absorción óptica varía periódicamente a lo largo de su longitud. Las rejillas formadas por variaciones de índice de refracción se denominan *rejillas de fase* y por cambio de absorción óptica se llaman *rejillas de amplitud*.

Se pueden manufacturar rejillas en fibras ópticas de sílice mediante varios métodos como la técnica holográfica transversal (Meltz *et al.*, 1989), donde dos haces coherentes de un láser ultravioleta interfieren para producir variaciones de intensidad sinusoidales a lo largo de la sección expuesta de la fibra, por intervalos de tiempo cortos – vea la figura 3.

Debido a la fotosensibilidad de la fibra de sílice dopada con germanio, el patrón ultravioleta produce una variación periódica permanente en el índice de refracción a lo largo de la sección expuesta al núcleo. Estas rejillas son permanentes porque una vez grabadas por la luz ultravioleta no se destruyen al ser iluminadas por una haz para observar su difracción.

Subsecuentemente, si luz de una fuente de longitud de onda (llamada longitud de onda de Bragg) $\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda$ es transmitida a través de la fibra óptica con índice de refracción efectivo n_{eff} , corresponde al período espacial Λ de la rejilla grabada, una fracción de luz λ_B será reflejada por la rejilla en cada variación de índice de refracción ó absorción óptica –

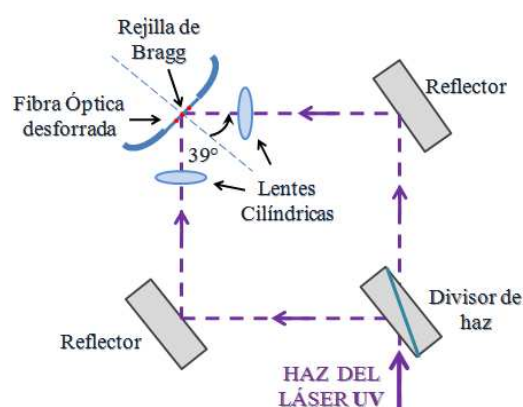


Figura 3. Diagrama del arreglo experimental para el grabado de rejillas permanentes en fibra óptica dopada con germanio (Meltz *et al.*, 1989).

ver figura 4. En el caso de la longitud de onda de Bragg, las reflexiones parciales en cada variación óptica de la rejilla interferirán constructivamente en la entrada de la fibra y de esta manera se observa la difracción de Bragg. Por consiguiente, se observa una disminución en la potencia de la luz transmitida. A dichas rejillas grabadas en esta manera se les conoce como rejilla de Bragg, para la longitud de onda λ_B con el período espacial $\Lambda = \lambda/2n_{eff}$ del patrón de interferencia de grabado.

En nuestro trabajo se emplea otro tipo de rejillas de Bragg, llamadas dinámicas. Se forman mediante la contrapropagación de dos haces coherentes con la misma polarización a través de una fibra dopada con alguna tierra rara generando un patrón de interferencia a lo largo de su longitud. En los máximos de este patrón de interferencia se observa la saturación local de la absorción óptica (ver figura 2b) generando cambios periódicos en el perfil de absorción óptica de la fibra, es decir, la formación de la rejilla de absorción. La formación de estas rejillas está asociada con la redistribución de los iones entre el nivel base y el nivel metaestable, por esto podemos llamar a estas rejillas también “rejillas de población”.

Por medio de la relación Kramers-Kronig (Saleh y Teich, 2001), al observarse cambios de absorción óptica inherentemente produce cambios en el índice de refracción. Por ésta razón, siempre es posible observar la formación de una rejilla de fase (o de índice de refracción) con el mismo período espacial.

En (Friskén, 1992) se realizaron los primeros experimentos de ésta índole empleando fibra dopada con erbio de 12 metros bombeada ópticamente $\lambda = 532 \text{ nm}$ ($P_{ent} = 40 \text{ mW}$) y

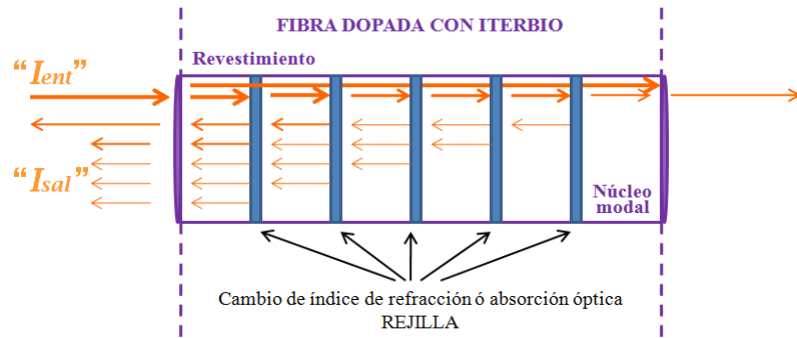


Figura 4. Esquema de difracción de Bragg de la rejilla en fibra óptica dopada.

formando/caracterizando la rejilla con longitud de onda de 1536 nm. La configuración experimental del mezclado de cuatro ondas es presentada en la figura 5.

Al proceso de formación de rejillas por saturación local de la absorción o ganancia óptica en las franjas brillantes del patrón de interferencia se le conoce también como “fusión de huecos espaciales” (Siegman, 1986). A las rejillas generadas mediante éste método se les conoce como rejillas dinámicas debido a que aparecen con un tiempo de formación τ_g

$$\tau_g = \frac{\tau_0}{1 + \frac{P_{ent}}{P_{sat}}}, \quad (13)$$

solo y cuando la fibra es iluminada por el patrón de interferencia (con potencia promedio P_{ent}) y desaparecen al retirar la fuente de iluminación con un tiempo característico alrededor del tiempo de vida del estado meta-estable del ión de tierra rara activo τ_0 .

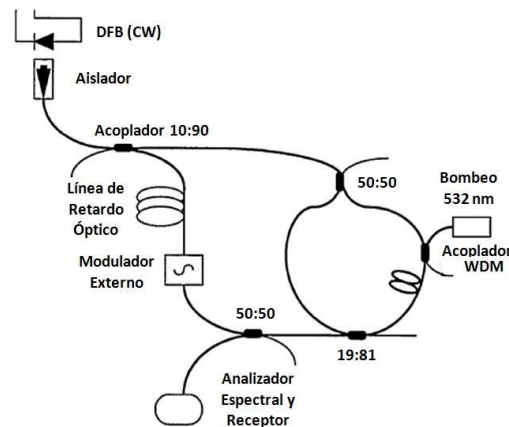


Figura 5. Arreglo experimental para grabar y observar rejillas dinámicas de Bragg en fibra dopada con erbio con bombeo óptico (Friskén, 1992).

II.3 Mezclado de dos ondas transitorio por las rejillas dinámicas en fibras

Las rejillas dinámicas de población son usualmente formadas por dos ondas láser de onda continua coherentes con la misma polarización en contra-propagación a través de una fibra óptica monomodal dopada con alguna tierra rara – véase figura 6. La longitud de onda de grabado se selecciona dentro del rango espectral de absorción/ganancia del ión activo.

En el experimento del mezclado de dos ondas (MDO) transitorio (no estacionario) una de las ondas mantiene la fase fija (onda de referencia “*R*”), mientras la otra onda “*S*” atribuye los cambios de fase relativa ocasionados por el modulador de fase o parámetro físico que se desee detectar, por ejemplo, temperatura, presión ambiental, vibraciones, etc. En ausencia de modulación de la fase en la onda “*S*”, el patrón de interferencia resultante conforma la rejilla dinámica de Bragg (de amplitud y/o de fase). Como resultado, a la salida de la fibra se observa la intensidad (I_{sal}) de la interferencia por la onda transmitida “*S*” a través de la fibra y la onda difractada (ó reflejada) por la rejilla “*R*”. Este efecto se conoce como MDO.

Claro que podemos considerar esta configuración como un interferómetro donde la rejilla dinámica juega el papel de un divisor de luz. Si intensidades de dos ondas a la salida de la fibra son constantes, la intensidad detectada (I_{sal}) dependerá de la diferencia $\Delta\phi$ entre las fases de ellas. En el caso de la rejilla de absorción, la interferencia a la salida de la fibra es constructiva ($\Delta\phi = 0$). Sin embargo, en el caso de la rejilla de fase dominante la interferencia es neutral ($\Delta\phi = \pm\pi/2$) y la intensidad detectada $I_{sal} = I_S + I_R$ – ver figura 7.

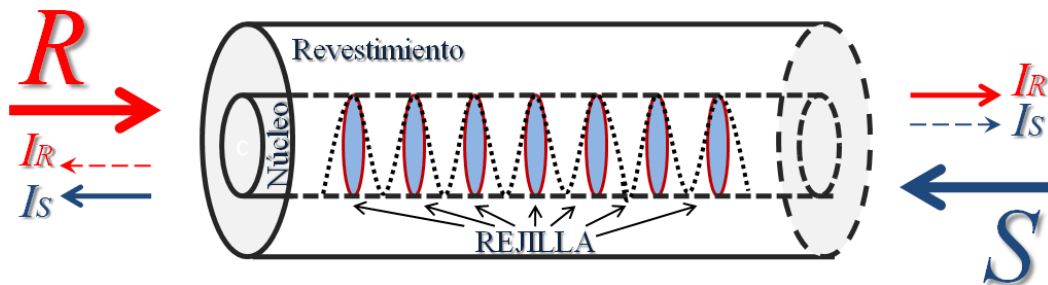


Figura 6. Grabado de la rejilla dinámica y MDO en una fibra óptica dopada con alguna tierra rara.

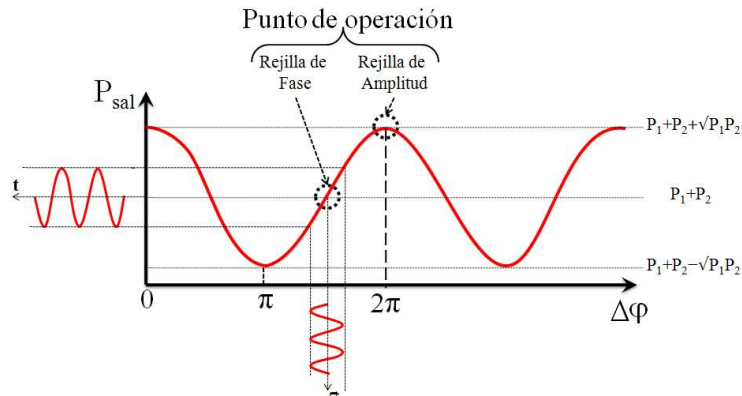


Figura 7. Potencia de salida de un interferómetro como función de $\Delta\phi$. Se muestran los puntos operacionales de la rejilla dinámica de amplitud y de fase.

Una vez formada la rejilla dinámica en estado estacionario, si eventualmente por alguna razón diversa (por ejemplo, alguna vibración ultrasónica) varía su fase la onda “S”, incitará al patrón de interferencia (onda “R” y “S”) a surgir en una nueva posición a lo largo de la fibra dopada, desvaneciendo la rejilla dinámica de su posición inicial en un tiempo τ_g y reformándose en un nuevo punto situado en los máximos del nuevo patrón de interferencia. Ahora que el patrón de interferencia está fluctuando de posición a través de la fibra dopada, a la señal observada (I_{sal}) se le conoce como MDO transitorio.

El tiempo de formación τ_g de la rejilla dinámica es el parámetro más importante asociado a las propiedades adaptativas del interferómetro. El término adaptativo corresponde al hecho de que el interferómetro compensa las variaciones de fase en los haces de grabado desplazando la rejilla a distinta posición del patrón de interferencia, y de esta manera, fijando el punto de operación lineal del interferómetro – véase figura 7. Entre menor sea el tiempo τ_g mayor será la velocidad de formación de la rejilla y el interferómetro adaptativo detectará con mayor efectividad las vibraciones ultrasónicas (las cuales son mucho mayores que τ_g , y por esta razón no se compensan por la rejilla dinámica).

En la figura 8 se muestran las ondas típicas de la señal del MDO transitorio con respuesta: lineal, cuadrática y compuesta por ambas. La respuesta lineal (componente tipo impar, cada segundo pico es de signo opuesto) está asociada a las rejillas de fase (es decir, de índice de refracción). En las fibras dopadas con erbio (FDE) estas componentes se presentan en los extremos del espectro de absorción de la sección transversal del ión Er^{+3}

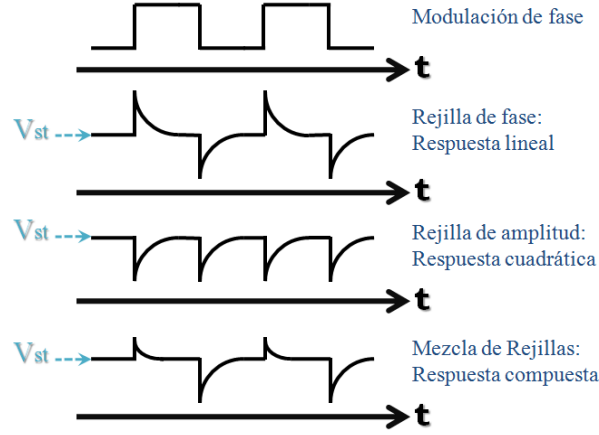


Figura 8. Respuesta de la señal del MDO por la rejilla dinámica en una fibra óptica dopada con alguna tierra rara a una modulación de fase rectangular en la onda “S”.

(Stepanov y Hernández Hernández, 2007). Por otro lado, las rejillas puramente de amplitud (generadas por variación en la absorción óptica) muestran una respuesta cuadrática (componente tipo par, con todos los picos transitorios iguales de signo negativo) en la señal del MDO transitorio. Por último, la respuesta compuesta (Stepanov y Hernández Hernández, 2006) posee ambas rejillas de fase y amplitud, caracterizada por la suma de ambas respuestas antes mencionadas.

II.3.1 Ecuaciones de ondas acopladas del MDO

En (Collier *et al.*, 1971) exponen que la amplitud de la rejilla por las variaciones periódicas espaciales del medio óptico de absorción es

$$\alpha(z) = \alpha + \delta\alpha \cdot \cos(Kz), \quad (14)$$

donde $\delta\alpha$ es la amplitud de la rejilla y $K = 2\pi/\Lambda$ es la frecuencia espacial de la misma (rejilla pregrabada). Una difracción mutua de dos ondas ($R(z)$ y $S(z)$) en contra-propagación a través de la fibra se presenta por las ecuaciones lineales de las ondas acopladas (Collier *et al.*, 1971):

$$\begin{aligned} \frac{\delta R(z)}{\delta z} &= -\frac{\alpha}{2} R(z) - \frac{\delta\alpha}{4} S(z), \\ \frac{\delta S(z)}{\delta z} &= \frac{\alpha}{2} S(z) + \frac{\delta\alpha}{4} R(z). \end{aligned} \quad (15)$$

En el caso de una rejilla dinámica, se forma por estas dos ondas. De hecho, al ser iluminada por dos haces coherentes en contra-propagación la fibra dopada, generará un patrón de interferencia dado por las ondas R y S constituyendo una distribución de intensidad a lo largo de ésta:

$$I(z) = I_0[1 + m \cdot \cos(Kz)]. \quad (16)$$

Esto provoca variaciones en la absorción óptica de la fibra dopada presentada en la ecuación (5), obteniéndose el siguiente perfil de absorción estacionario

$$\alpha_z = \frac{\alpha_0}{1 + (I_0/I_{sat})[1 + m \cdot \cos(Kz)]}, \quad (17)$$

donde el contraste del patrón de interferencia m viene dado por

$$m(z) = \frac{2\sqrt{I_R(z)I_S(z)}}{I_R(z) + I_S(z)}. \quad (18)$$

Dado que la amplitud del armónico fundamental de la rejilla de Bragg puede ser evaluada mediante la aproximación de bajo contraste ($m \ll 1$) del patrón de interferencia, la ecuación (17) resulta ahora:

$$\alpha_z \approx \frac{\alpha_0}{1 + (I_0/I_{sat})} \left[1 - m \frac{I_0/I_{sat}}{1 + I_0/I_{sat}} \cos(Kz) \right]. \quad (19)$$

Substituyendo la ecuación (18) en la ecuación (19) y tomando en cuenta que $I_0 = I_R(z) + I_S(z)$, se obtiene:

$$\alpha_z \approx \frac{\alpha_0}{1 + [I_R(z) + I_S(z)]/I_{sat}} - \frac{2\alpha_0\sqrt{I_R(z)I_S(z)}}{I_{sat}\{1 + [I_R(z) + I_S(z)]/I_{sat}\}^2} \cos(Kz), \quad (20)$$

donde el primer término representa la absorción óptica promedio α de la fibra y el segundo término a la amplitud de la rejilla $\delta\alpha$ (véase la ecuación (14)). Al substituir los términos de la ecuación (20) correspondientes en las ecuaciones (15) acopladas (las cuales son modificadas en no lineales en este caso) que involucran las intensidades de las ondas que interactúan (Stepanov y Núñez, 2006) resulta:

$$\frac{\delta R(z)}{\delta z} = - \frac{\alpha_0 I_R(z)}{1 + [I_R(z) + I_S(z)]/I_{sat}} + \frac{\alpha_0 I_R(z) I_S(z)}{I_{sat}\{1 + [I_R(z) + I_S(z)]/I_{sat}\}^2},$$

$$\frac{\delta S(z)}{\delta z} = \frac{\alpha_0 I_S(z)}{1 + [I_R(z) + I_S(z)]/I_{sat}} - \frac{\alpha_0 I_R(z) I_S(z)}{I_{sat} \{1 + [I_R(z) + I_S(z)]/I_{sat}\}^2}. \quad (21)$$

En conclusión a esta sección mencionamos que el análisis teórico presentado en la literatura existente estuvo desarrollado solo para las rejillas de amplitud y no hay consideraciones similares para las rejillas de fase. En realidad, para el caso del MDO se describe por las mismas ecuaciones no lineales de ondas acopladas (ecuación (21)) donde en lugar de la amplitud de la rejilla (de fase en este caso) es necesario substituir el valor imaginario. Esto modifica el tipo de respuesta (par por impar), pero esperamos que (si la amplitud de la componente de fase depende en la misma manera de intensidad de luz) las dependencias de amplitud impar de MDO de la potencia de entrada deben ser parecidas.

II.4 Interferómetros adaptativos con cristales fotorrefractivos

Como se mencionó en la introducción, el ultrasonido no solamente puede ser excitado a distancia por un láser pulsado (Scruby y Drain, 1990), sino que también debe ser detectado a distancia sin contacto físico con el objeto vibrante. En (Dewhurst, 1990) muestran configuraciones interferométricas adaptativas basadas en rejillas dinámicas bastante atractivas. La rejilla dinámica en este sistema sirve como un divisor de luz “inteligente” el cual compensa todos los cambios ambientales del frente de onda y de fase en la onda detectada. La mayoría de estos sistemas están basados en cristales fotorrefractivos. Sin embargo, los sistemas de detección de este tipo son bastante complicados (están basados en elementos ópticos de volumen), son caros (con el precio alrededor de 50 mil dólares), y, lo más importante, las rejillas fotorrefractivas son lentas.

II.5 Interferómetros adaptativos con fibras dopadas

En el artículo original (Stepanov *et al.*, 2004), el MDO transitorio en FDE fue propuesto para aplicaciones de interferometría adaptativa. Potencialmente, los sistemas adaptativos basados en las fibras dopadas con tierras raras pueden ser muy sencillos (no contienen elementos de óptica de volumen), robustos, económicos (porque tienen solo elementos

comerciales desarrolladas para los sistemas de las comunicaciones ópticas) y bastante adaptativos.

Recientemente en (Stepanov y Pérez Cota, 2007; ver también Pérez Cota, 2007), se reportaron resultados del MDO transitorio en FDE con distintas longitudes en una configuración en línea como el de la figura 9a adecuada para el desarrollo de un interferómetro adaptativo para la detección de vibraciones mecánicas. La señal MDO detectada (figura 9b) en la terminal #3 del circulador resultó de la interferencia entre la onda reflejada “S” modulada en fase por la superficie vibratoria y la onda directa “R” difractada por la rejilla grabada. La modulación de la fase se realizó mediante un espejo acoplado a un actuador piezoeléctrico.

Para el grabado efectivo de la rejilla se empleó un láser semiconductor de onda continua a $\lambda = 1492$ nm con potencia máxima de 20 mW. En general, las rejillas de amplitud dominaron en la señal del MDO transitorio en las FDE observándose una respuesta cuadrática – véase figura 9b, para el caso de modulación con amplitud V_π . Sin embargo, como se mostró anteriormente (Stepanov y Hernández Hernández, 2007), la componente de fase es fuerte a longitudes de onda 1480-1495 nm dando como resultando una respuesta compuesta en la señal para amplitudes de modulación menores – véase figura 9b para el caso de modulación con amplitud $V_{\pi/4}$.

La configuración en línea usada en nuestro trabajo de tesis se considero en (Stepanov y Pérez Cota 2007). Este último caso no es simétrico, porque la potencia de la onda de señal

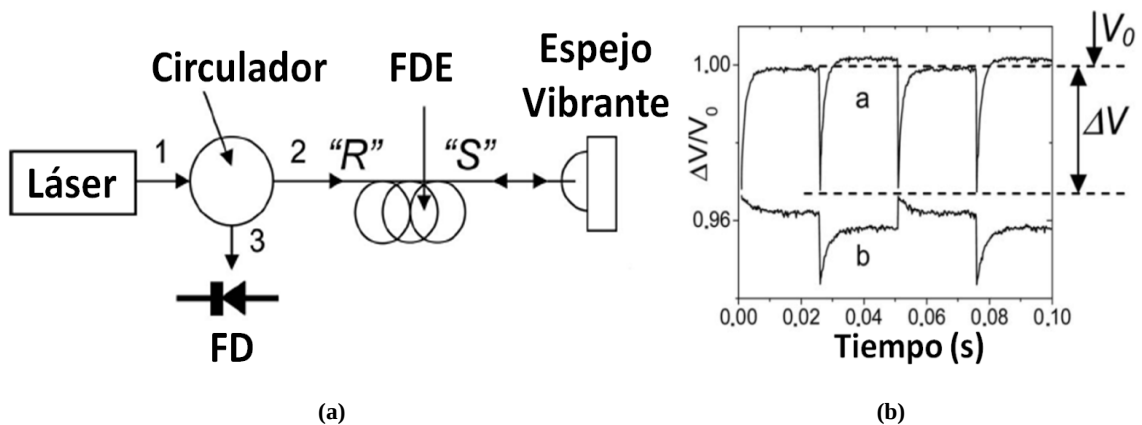


Figura 9. Esquema de un interferómetro en línea utilizado para la investigación del MDO transitorio en fibras dopadas con erbio en (Stepanov y Pérez Cota, 2007) (a). El recuadro (b) muestra la señal MDO transitorio normalizada observada para una modulación rectangular con amplitud $a = V_\pi$ y $b = V_{\pi/4}$ con promediación de 512 trazos en el osciloscopio.

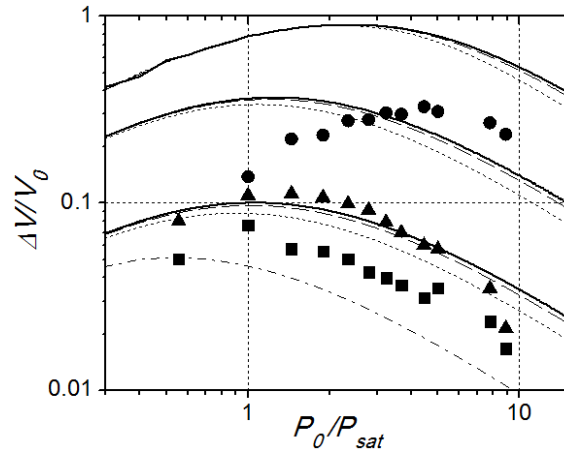


Figura 10. Dependencia experimental de la amplitud relativa en la señal del MDO de la potencia de entrada P_0 observada en 0.5 (cuadros), 2.1 (triángulos) y 8.5 m (círculos) de longitud de fibra (evaluada para coeficientes de acoplamiento $\gamma = 0.4, 0.7$ y 0.2 , respectivamente). Las líneas continuas representan las dependencias teóricas calculadas para $\alpha_0 L = 0.21, 0.86$ y 3.6 para $\gamma = 0.01, 0.2, 0.4$ (sólida, recortada y punteada, respectivamente). Las líneas punteadas muestran la curva teórica de la configuración simétrica calculada para $\alpha_0 L = 0.21$ (Stepanov y Pérez Cota, 2007).

reflejada por el espejo (figura 9) es mucho menor que la potencia de entrada de la onda directa. El caso de la configuración simétrica, es decir cuando las potencias de entrada de dos ondas coherentes son iguales se analizó en (Stepanov y Núñez, 2006). Los cálculos numéricos muestran que la amplitud relativa de la señal de respuesta del MDO detectada en la onda reflejada es casi dos veces más grande que en la configuración simétrica (Stepanov y Núñez, 2006). Prácticamente no depende del coeficiente de acoplamiento y es presentada por las dependencias de potencia de entrada mostradas en la siguiente figura 10.

Por lo tanto, las dependencias tienen una forma característica con un máximo alrededor de la potencia de entrada igual a la potencia de saturación de la fibra. La máxima amplitud teórica de la señal del MDO detectada es igual a $\alpha_0 L/2$. Las dependencias experimentales obtenidas en la FDE a 1492 nm (también presentadas en la figura 10) siguen cualitativamente las predicciones teóricas, pero, como siempre [ver por ejemplo (Stepanov *et al.*, 2004)] la amplitud experimental detectada es un poco menor a la teoría.

Además analizaron experimentalmente que la profundidad de modulación ($\Delta V/V_0$) de la señal del MDO por la componente de amplitud crece con la densidad óptica ($\alpha_0 L$) de la fibra dopada y su máximo (con valor $\alpha_0 L/2$ para un factor de acoplamiento bajo) es alcanzado para potencias de entrada cercanas, o un poco mayores para densidades ópticas grandes a la potencia de saturación de la fibra. En (Stepanov y Pérez Cota, 2007)

observaron amplitudes de repuesta normalizada bastante grandes (hasta 0.5) y además, que el tiempo de formación de la rejilla ($\tau_g \leq 10$ ms) disminuye con la potencia de entrada y decrece con la densidad óptica $\alpha_0 L$ de la fibra dopada.

Además en (Pérez Cota, 2007) estudiaron la relación señal a ruido (RSR) en función de la potencia de entrada y el nivel de potencia en la señal reflejada “S” denominado factor de acoplamiento obteniendo hasta una $RSR \leq 100$. El ruido dominante del sistema de detección provino del ruido de fase del láser semiconductor, e incrementaba con la longitud de la fibra usada en esta configuración del interferómetro.

El mínimo desplazamiento del espejo detectado por el interferómetro adaptativo basado en la fibra Er123, con $L = 1$ m, $\alpha_0 L = 4.3$ fue a ~ 5 nm en un ancho de banda de 10 MHz. En (Pérez Cota, 2007) se reportaron resultados de detección ultrasónica excitada por un transductor piezoeléctrico en un bloque de aluminio. Posteriormente, en (Rodríguez Montero *et al.*, 2009) para este interferómetro adaptativo se reportaron también los primeros resultados de detección de pulsos ultrasónicos excitados por pulsos de un láser de Nd:YAG pulsado (con energía de 0.5 J) en una placa de aluminio. La configuración experimental usada y el trazo típico de la respuesta están mostrados en la figura 11.

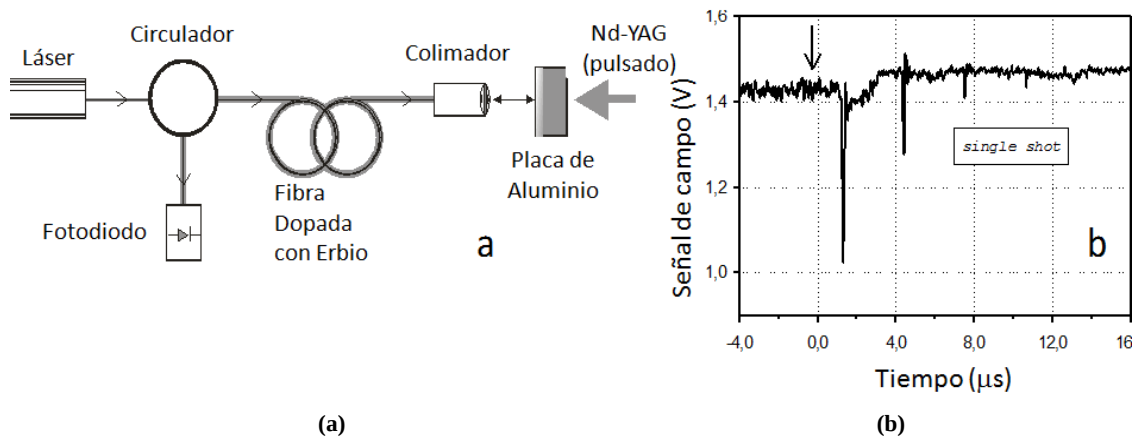


Figura 11. Diagrama de la configuración experimental para la excitación y observación del ultrasonido inducido por un láser pulsado (Rodríguez Montero *et al.*, 2009) (a) y el trazo del osciloscopio (b) de la señal ultrasónica detectada en una placa de aluminio de 10 mm.

II.6 Rejillas dinámicas en fibra dopada con iterbio

Estudios realizados en (Stepanov *et al.*, 2007) demuestran que al emplear fibras dopadas con iterbio con una longitud de onda de grabado de 1064 nm pueden llegar a obtener una respuesta del MDO más lineal (por una mayor contribución de la rejilla de fase) y con mayor velocidad (casi diez veces más rápidas) de formación de las rejillas dinámicas $\tau_g \leq 1$ ms que en las FDE (Stepanov y Pérez Cota, 2007). Los experimentos fueron desarrollados usando la configuración de un interferómetro lineal (figura 12) similar a los reportados anteriormente en las FDE (Stepanov y Pérez Cota, 2007). Utilizaron un láser semiconductor de onda continua con potencia máxima de salida alrededor de 50 mW a 1064 nm y de igual manera, usaron un transductor piezoeléctrico adherido a un espejo para la modulación rectangular de fase de la onda reflejada "S".

En los experimentos utilizaron las FDY monomodales comerciales de la compañía INO: Yb103 ($L = 1$ m, $\alpha_0 L \approx 0.05$, $P_{sat} \approx 3.7$ mW) y la fibra con doble recubrimiento ($L = 1.9$ m, $\alpha_0 L \approx 0.8$). Las rejillas dinámicas encontradas en la señal del MDO fueron predominantemente del tipo de fase con respuesta lineal considerable (figura 12b) y la rejilla de amplitud era significativamente débil. La componente impar era casi 3 y 10 veces mayor a la componente par en la fibra Yb103 y en la fibra con doble recubrimiento, respectivamente.

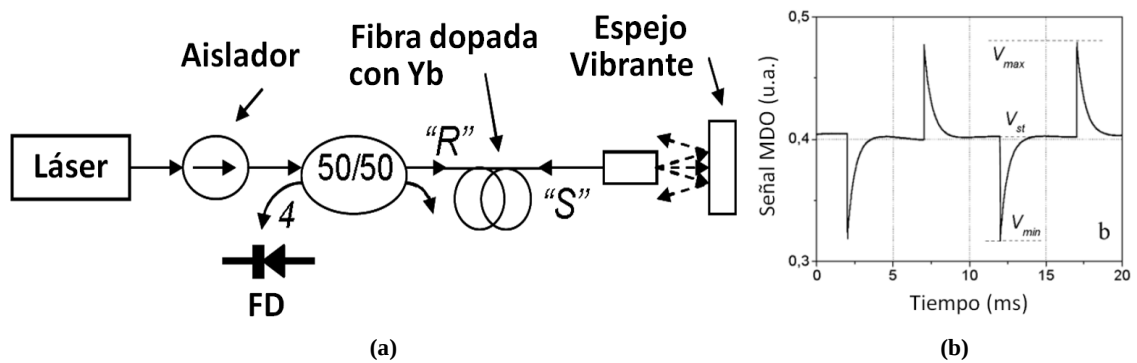


Figura 12. Arreglo experimental utilizado en experimentos del MDO transitorio en fibras dopadas con iterbio en (Stepanov *et al.*, 2007) (a). En el recuadro (b) se observa la señal típica del MDO transitorio a $\lambda = 1064$ nm.

A su vez, la amplitud relativa de la señal MDO por la componente de fase fue bastante fuerte, hasta 0.4 en la fibra más densa. Para alcanzar el máximo de respuesta se usó potencia de grabado en el rango 5-10mW. El tiempo característico de formación de la rejillas disminuyó linealmente con la potencia de entrada en el rango de 0.95 - 0.3 ms.

Tomando en cuenta todos los resultados (y en particular, la rápida y efectiva respuesta del tipo lineal) los autores concluyeron que el MDO transitorio en FDY a 1064nm puede ser muy prometedor para el desarrollo de interferómetros adaptativos para aplicaciones industriales.

II.7 Conclusiones parciales

1. Los experimentos con el interferómetro adaptativo basado en FDE mostraron, que rejillas dinámicas de este tipo pueden ser atractivas para aplicaciones industriales en la detección del ultrasonido inducido por un láser. Sin embargo, la rejilla dinámica en esta fibra tiene un componente de amplitud bastante grande que genera no-linealidad en la respuesta; además, los láseres semiconductores necesarios para iluminar la FDE (de 1480-1500nm) tienen un ruido de fase grande, que disminuye la sensibilidad del sistema de detección.
2. Los datos existentes muestran que las rejillas de población en FDY pueden ser muy atractivas para esta aplicación: las rejillas tienen una componente de fase dominante (proporcionando una respuesta más lineal), el tiempo de formación de estas rejillas es casi diez veces más corto (el cual mejora las propiedades adaptativas del sistema) y permiten usar láseres comerciales de onda continua de Nd:YAG (más potentes y menos ruidosos) a 1064nm como fuente de luz de grabado.
3. Las conclusiones anteriores justifican el tema seleccionado para la presente tesis.

Capítulo III

Equipo y muestras experimentales

III.0.1 Introducción

Para caracterizar la formación de la rejilla dinámica en fibra óptica dopada con iterbio experimentalmente fue necesario emplear distintos componentes de fibra óptica, así como dispositivos electrónicos. Por ello, se muestra en este capítulo una breve descripción de las características principales del equipo y material manejado.

III.1 Canal de detección

En esta sección se exponen las características esenciales del equipo electrónico empleado para la detección y caracterización de las señales ópticas.

III.1.1 Analizador de espectros ópticos

Un analizador de espectro es un equipo de medición electrónica que permite visualizar en una pantalla las componentes espectrales de una señal óptica de entrada contra la longitud de onda. El analizador de espectros usado es de la marca Hewlett Packard – modelo HP70951A, basado en rejillas de difracción, tiene un rango espectral de 600 a 1700 nm, resolución espectral de hasta 0.1 nm, sensibilidad máxima hasta -85 dBm, rango dinámico de 60 dB, memoria de 1 Mb. El equipo tiene conectores FC/PC en cada una de las dos entradas y dos salidas para fibra óptica (monomodo/multimodo).

III.1.2 Fotodetector

En general, los datos adquiridos experimentalmente se obtuvieron mediante un fotodetector, el cual funciona como transductor de luz proporcionando una señal eléctrica al osciloscopio como respuesta a una radiación óptica incidente sobre la superficie sensible. Para esto, se emplearon el detector de alta velocidad DET10C y el detector con

preamplificador de transimpedancia PDA10CS. Ambos dispositivos, de la compañía Thorlabs, contienen un conector FC/PC a la entrada y un fotodiodo PIN de InGaAs con responsividad de 0.7 A/W correspondiente a la longitud de onda de trabajo de 1064 nm como se muestra en la figura 13a.

El detector DET10C da un tiempo de repuesta de 7 ns, corriente de oscuridad de 25 nA. Para el caso donde su señal eléctrica de salida es transmitida hacia un osciloscopio mediante un cable de 50 Ω de longitud de 1 m (con capacitancia alrededor de 100 pF) conectado en paralelo a una resistencia de carga de 1 K Ω - ver figura 13b, se asegura un ancho de banda alrededor de 1 MHz. El detector PDA10CS tiene ganancia de hasta 1.51×10^3 V/A ($\pm 2\%$), un ancho de banda de 17 MHz, ruido de 600 μ V (rms), resistencia de salida de 50 Ω y offset de 10 mV.

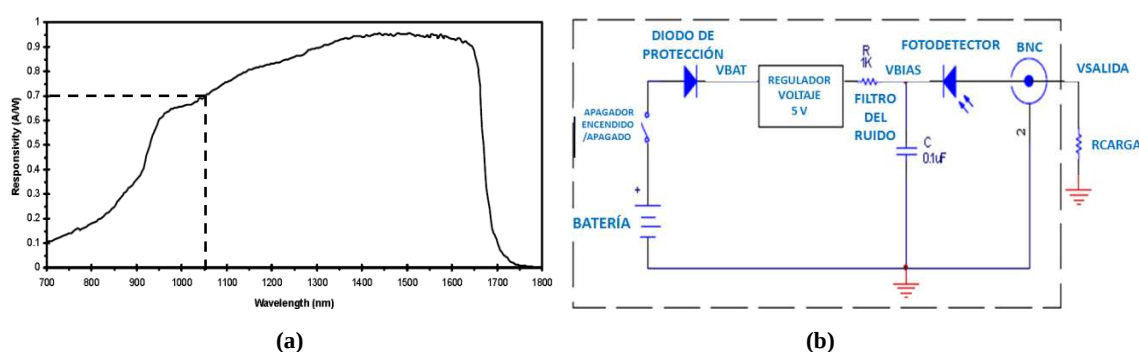


Figura 13. Curva de responsividad (a) y circuito eléctrico interno (b) del fotodetector DET10C de la compañía Thorlabs.

III.1.3 Osciloscopio

Para la visualización de las señales detectadas, el análisis de sus parámetros como amplitud, voltaje rms, voltaje promedio, tiempo de duración, etc., se utilizó el osciloscopio TDS3012B de la empresa Tektronix. Las principales características son: dos canales de entrada, ancho de banda de 100 MHz (con habilidad de reducirla hasta 20 MHz), muestrea hasta una velocidad de 1.25GS/s, sensibilidad desde 1 mV/div hasta 10 V/div y adquisición de datos promediando hasta 512 trazos. El dispositivo cuenta con interfaz floppy de 3.5'' y puerto Ethernet para guardar e impartir las señales de entrada, con el fin de poder procesar dicha información posteriormente en la computadora.

III.2 Caracterización del láser de estado sólido de Nd:YAG

Durante el desarrollo de este trabajo se utilizó un láser de estado sólido de Nd:YAG IRCL-300-1064-S CL-2000 de onda continua de bajo ruido de la compañía CrystaLaser. Según los datos del fabricante, el láser tiene las siguientes características: emite a sólo una frecuencia (longitud de onda de 1064 nm), con potencia de salida continua de 300 mW, ancho de línea espectral menor a 10 fm, longitud de coherencia de 300 m, ruido de amplitud menor al 0.5% de 10 Hz a 20 MHz, diámetro del haz de 0.45 mm y divergencia del haz de 3.6 mrad.

Las características de nuestro mayor interés sobre este láser son la longitud de coherencia y el ruido proveniente del láser. Para la caracterización de dichas propiedades del láser de Nd:YAG se empleó el arreglo experimental mostrado en la figura 14.

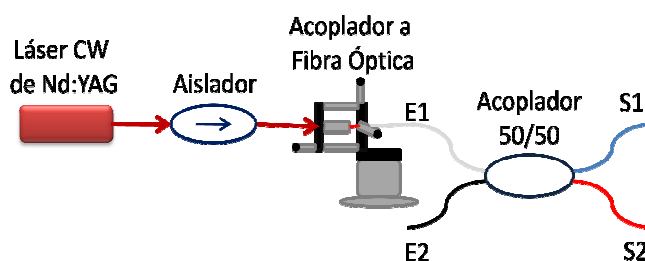


Figura 14. Configuración experimental empleado para la caracterización del láser de Nd:YAG.

III.2.1 Acoplamiento de la energía emitida por el láser a fibra óptica

Para el acoplamiento controlado de la potencia del láser a la fibra óptica se usó una montura ST1XY-D con desplazamiento en tres dimensiones de Thorlabs con tornillos micrométricos de 0.4 mm por revolución y 25 μm por revolución fina (0.5 μm por división). La montura posee además un tornillo de traslación en el eje z de 50 μm (1 μm por división) para enfocar una lente positiva C220TME-C Thorlabs de distancia focal efectiva de 11 mm.

La energía proveniente del láser se acopló hacia una entrada del acoplador 50/50 de fibra óptica FOSC-2-64-50-L-1-F-1 para 1064 nm de la compañía Australian Fiber Works con salidas FC-PC. El acoplador fue previamente caracterizado con una relación de 49.7% y 50.3% entre cada salida (S1 y S2 respectivamente). A la salida del láser se incorporó un

aislador 2BIG1064 de la compañía Electro-Optics Technology, con el fin de prevenir inestabilidad en la emisión láser, atenuando el 99% de reflexiones hacia la fuente como se muestra en la figura 15.

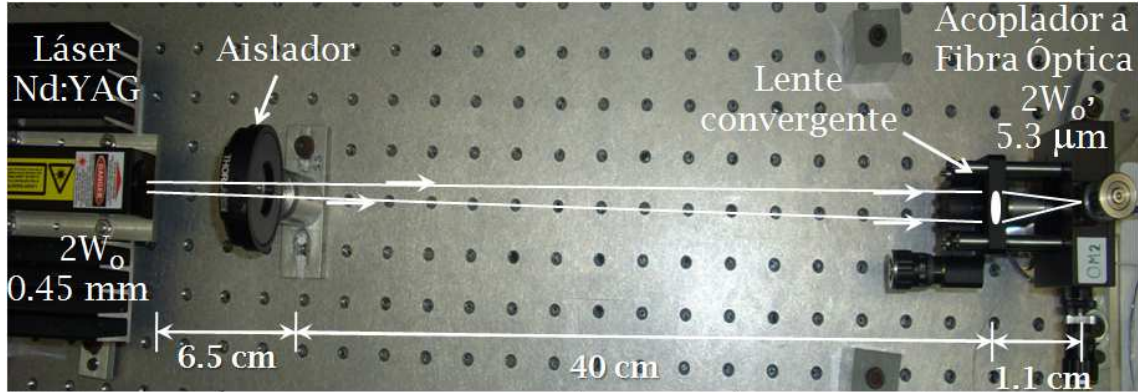


Figura 15. Arreglo experimental para acoplar la energía emitida del láser de Nd:YAG a la fibra óptica.

III.2.1.1 Acoplamiento del haz gaussiano a la fibra óptica

El diámetro modal del haz gaussiano a la salida del láser es igual a 0.45mm, a su vez, el diámetro modal de la fibra HI 1060 FLEX - Corning contenida en el acoplador 50/50 es de $\sim 5.3 \mu\text{m}$. Por lo tanto, para acoplar adecuadamente la potencia del láser a la fibra, necesitamos un sistema óptico que reduzca el diámetro del haz inicial casi 10 veces. Para lograr esto se empleó la configuración con una lente mostrada en la figura 15.

Supongamos que la cintura del haz gaussiano (con el radio W_0) proveniente del láser de Nd:YAG está localizado en el plano espejo a la salida del láser. El parámetro complejo q (Svelto, 1998) del haz gaussiano a la salida del láser es:

$$q_0 = i \left(\frac{\pi \cdot W_0^2}{\lambda} \right) = iW_{01}, \quad (22)$$

donde W_{01} es la distancia de Rayleigh del radio de la cintura inicial. Al propagarse a lo largo de la dirección z en espacio libre – véase figura 16 – en la entrada de la lente el parámetro complejo es:

$$q_1 = q_0 + z. \quad (23)$$

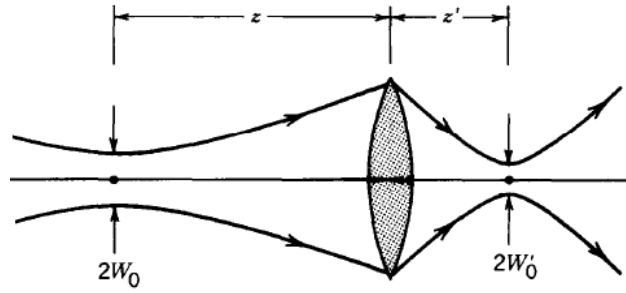


Figura 16. Transmisión del haz gaussiano a través de una lente convergente (Saleh, *Fundamentals of Photonics*, pág. 95).

La lente convergente con distancia focal f modifica este parámetro como:

$$\frac{1}{q_2} = \frac{1}{q_1} + \frac{1}{f} \quad \therefore \quad q_2 = \frac{f \cdot q_1}{f + q_1}. \quad (24)$$

Y finalmente, después de propagarse hasta la distancia z' (igual a f), tenemos:

$$\begin{aligned} q_3 &= q_2 + z' = \frac{f \cdot q_1}{f + q_1} + f \\ \therefore \quad q_3 &= \frac{f + 2q_1}{1 + (q_1/f)} = z'' + iW_{02} \end{aligned} \quad (25)$$

donde W_{02} es la distancia de Rayleigh (Svelto, 1998) del radio de la nueva cintura del haz enfocado W_0 , y z'' es la distancia del plano de salida a la posición de ésta cintura.

Substituyendo la ecuación (22) y (23) en la ecuación (25), y multiplicando por su complejo conjugado para eliminar la parte imaginaria del denominador se obtiene

$$z'' + iW_{02} = \frac{(f^3 + 3f^2z + 2fz^2 + 2fW_{01}) + if^2W_{01}}{(f + z)^2 + (W_{01})^2}, \quad (26)$$

e igualando los términos imaginarios de la ecuación (26), resulta:

$$W_{02} = \frac{f^2W_{01}}{(f + z)^2 + (W_{01})^2}. \quad (27)$$

Al substituir los parámetros relacionados a las distancias de Rayleigh en la ecuación (27):

$$\frac{\pi \cdot W_{01}^2}{\lambda} = \frac{f^2 \cdot \left(\frac{\pi \cdot W_0^2}{\lambda} \right)}{(f + z)^2 + \left(\frac{\pi \cdot W_0^2}{\lambda} \right)^2}$$

$$\therefore W_{0'} = f \cdot W_0 \cdot \lambda \sqrt{\frac{1}{\lambda^2 \cdot (f + z)^2 + (\pi \cdot W_0^2)^2}}, \quad (28)$$

donde $W_{0'}$ es el radio modal de la fibra óptica en la entrada del acoplador 50/50 y λ es la longitud de onda del láser de Nd:YAG.

El diámetro modal de la fibra óptica (HI 1060 FLEX - Corning) contenida en el acoplador 50/50 es de $D_M \sim 5.3 \mu\text{m}$. Substituyendo los valores correspondientes $W_0 = 0.225\text{mm}$ y $f = 1.1\text{cm}$ en la ecuación (28) podemos obtener el acoplamiento óptico (es decir cuando $W_{0'} = D_M/2$) a observarse para $z = 91 \text{ cm}$.

Por otro lado, para nuestro valor $z = 46.5\text{cm}$ (limitado por la longitud de nuestra mesa óptica), de la misma ecuación se obtiene un radio de haz gaussiano después de la lente $W_{0'} \approx 4.9 \mu\text{m}$. En realidad, se obtuvo una eficiencia de acoplamiento η del 16%

$$\eta = \frac{P_{\text{acoplada}}}{P_{\text{salida del láser}}} = \frac{40 \text{ mW}}{250 \text{ mW}} \approx 0.16, \quad (29)$$

donde P_{sal} es la potencia de salida del láser y P_{ac} es la potencia acoplada a la fibra óptica. Además la baja eficiencia de acoplamiento puede ser explicada por aberraciones de la lente sencilla (C220TME-C de Thorlabs) empleada para enfocar la luz en la fibra.

III.2.2 Verificación de la longitud de onda de emisión del láser

Se verificó la longitud de onda del láser mediante un espectrofotómetro posicionándolo en la salida S1 del acoplador mostrado en la figura 14. En la figura 17 se presentan la longitud de onda central de emisión, así como su ancho espectral medido (FWHM, Full Width Half Maximum por sus siglas en inglés). Se puede observar que el ancho espectral mostrado es el correspondiente a la resolución máxima del analizador de espectros empleado $\sim 0.1 \text{ nm}$ a una longitud de onda centrada 1065.33 nm . Esto significa que el ancho espectral real emitido por el láser es menor al medido en este experimento, al igual, hay un desplazamiento en la longitud de onda mostrada en la figura 17 con respecto a la longitud de onda de emisión característica del láser de Nd:YAG a 1064 nm debido a la falta de calibración del espectrofotómetro. Por esta razón podemos considerar ésta última medición en el sentido de prueba en la evaluación del espectrofotómetro empleado.

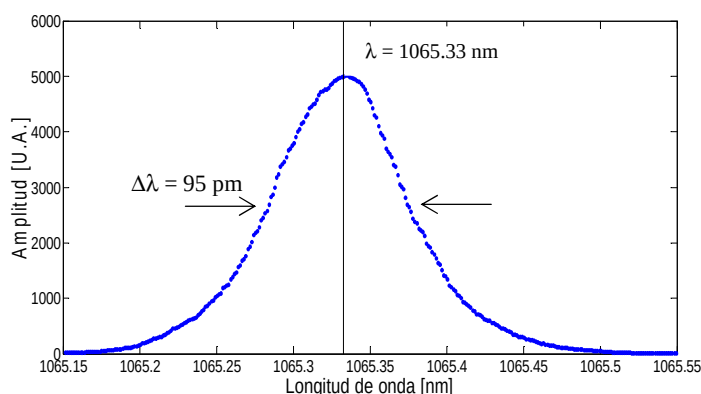


Figura 17. Ancho espectral y longitud de onda de emisión del láser medido por el espectrofotómetro.

III.2.3 Medición de la potencia de salida del láser

La potencia emitida por el láser se registró mediante un medidor digital de potencia 2832-C Newport incorporado a un fotodetector 818-SL/CM. Posicionado en la apertura de salida del láser el dispositivo detectó la potencia máxima de 250 mW. El fotodetector empleado en este experimento tiene un espectro de operación de 400 a 1100 nm, tiempo de respuesta de 2 μs , responsividad de 0.5 A/W correspondiente a la longitud de onda de trabajo de 1064 nm.

III.2.4 Evaluación de la longitud de coherencia del láser

La longitud de coherencia se define como la máxima diferencia de camino óptico a la cual se puede presentar interferencia efectiva. Para la evaluación de esta propiedad del láser se colocó el fotodiodo PIN DET10C Thorlabs en la entrada E2 del arreglo experimental mostrado en la figura 18 y se observó su señal de salida usando el osciloscopio TDS3012B Tektronix en acoplamiento DC con un ancho de banda del circuito de entrada de 1 MHz.

De este modo el acoplador 50/50 de fibra óptica sería empleado como un interferómetro de Michelson (Hecht, 2000). En la entrada E2 se detectaría la interferencia (constructiva y destructiva o, en general, variando según la temperatura ambiental aleatoria – ver recuadro de la figura 18) de las señales reflejadas proveniente de las terminales libres del acoplador (S1 y S2). Cada terminal libre del acoplador tiene una reflexión de $\sim 3 \%$, debido a la diferencia de índice de refracción en la frontera vidrio-aire.

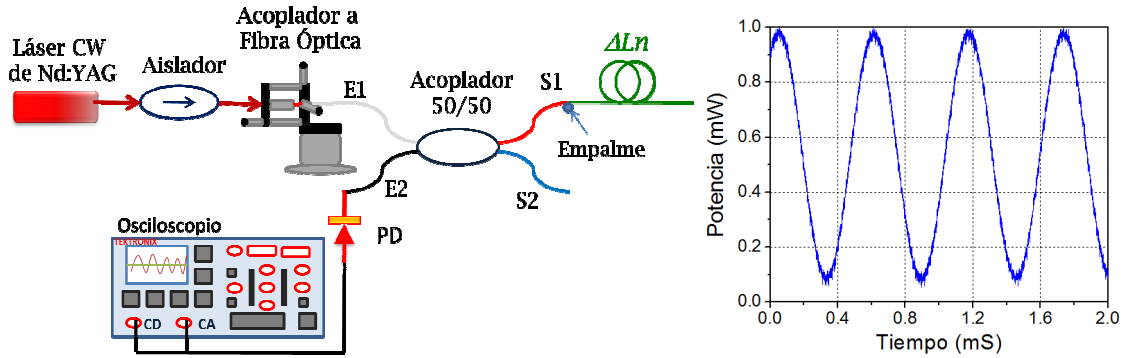


Figura 18. Arreglo experimental para la evaluación de la longitud de coherencia y el ruido de fase del láser de Nd:YAG. En el recuadro se muestra la potencia detectada por la interferencia de las señales reflejadas en el interferómetro.

Para la evaluación de la longitud de coherencia del láser se empalmó un tramo de fibra óptica de 7 m a una de las salidas del acoplador 50/50 – ver figura 18, y se fue seccionando en segmentos variando la diferencia de caminos ópticos (D.C.O.). La expresión para distintas diferencias de camino óptico (ΔL_n) está dado por

$$\Delta L_n = 2 \cdot n_{eff} \cdot L_f, \quad (30)$$

donde n_{eff} es el índice de refracción efectivo de la fibra óptica y L_f es la longitud física de la misma. Así, las distintas longitudes de fibra óptica $L_f = 1 \times 10^{-3}$, 1, 2, 5 y 7 m, corresponden a distintas diferencias de caminos ópticos $\Delta L_n = 3 \times 10^{-3}$, 3, 6, 15 y 21 m, donde n_{eff} es 1.5 según los datos del fabricante Nufern de la fibra óptica 1060-XP monomodal usada en este experimento.

Al haber variado la DCO se obtienen fluctuaciones entre máximos y mínimos (interferencia constructiva y destructiva respectivamente) en la entrada E2 del acoplador 50/50. De estos valores es posible evaluar la visibilidad (por definición (Hariharan, 2007), $V_{max} - V_{min} / V_{max}$) del patrón de interferencia como se muestra en la figura 19. En esta figura se puede apreciar una buena visibilidad (~ 1) a distintos DCO, asegurando suficiente longitud de coherencia (al menos 21 metros) en la emisión láser necesario para el desarrollo de este trabajo.

Notemos, que la longitud de coherencia obtenida en este experimento también nos permite evaluar el ancho espectral $\Delta\lambda$ de emisión del láser como

$$\Delta\lambda = \lambda^2 / L_C, \quad (31)$$

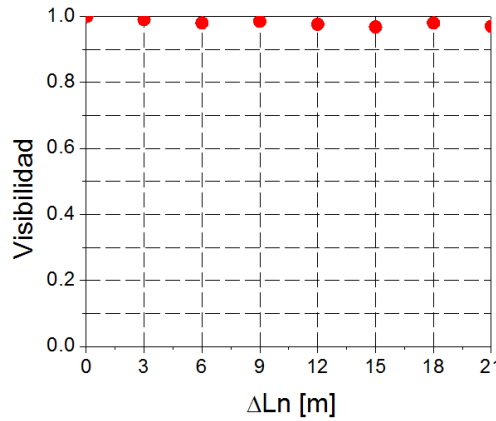


Figura 19. Visibilidad del patrón de interferencia en función de la diferencia de caminos ópticos (ΔL_n).

donde L_C es la longitud de coherencia y λ es la longitud de onda emitida por el láser. Por lo tanto, el ancho espectral determinado mediante nuestro experimento es por lo menos $\Delta\lambda \cong 54$ fm (para $L_C \sim 21$ m).

III.2.5 Medición del ruido del láser

De manera general el láser está limitado por dos tipos principales de ruido: el ruido de intensidad y el ruido de fase (Derickson, 1997). El ruido de intensidad se interpreta como fluctuaciones variantes en el tiempo del nivel de potencia emitida por el láser, mientras el ruido de fase se entiende como variaciones en el tiempo de la fase o de la longitud de onda de luz emitido por el láser. Es claro que en un interferómetro, estas variaciones provocan alteraciones de intensidad en el patrón de interferencia - ver figura 23a.

En general, todas las mediciones relacionadas al ruido del láser en este capítulo (más las contribuciones del ruido provenientes del: fotodiodo + preamplificador + osciloscopio) se obtuvieron a través del fotodetector de alta velocidad DET10C posicionado a la salida S1 del acoplador de fibra óptica – ver figura 20. Mediante una resistencia de carga de 1 K Ω el sistema tiene un ancho de banda de ~ 1 MHz y está acoplado en régimen AC con el osciloscopio TDS3012B limitado en el ancho de banda a 20 MHz.

La amplitud efectiva del ruido, ya sea ruido de amplitud o de fase, fue evaluada mediante la expresión

$$V_{Nrms} = \sqrt{V_{rms}^2 - V_{prom}^2} , \quad (32)$$

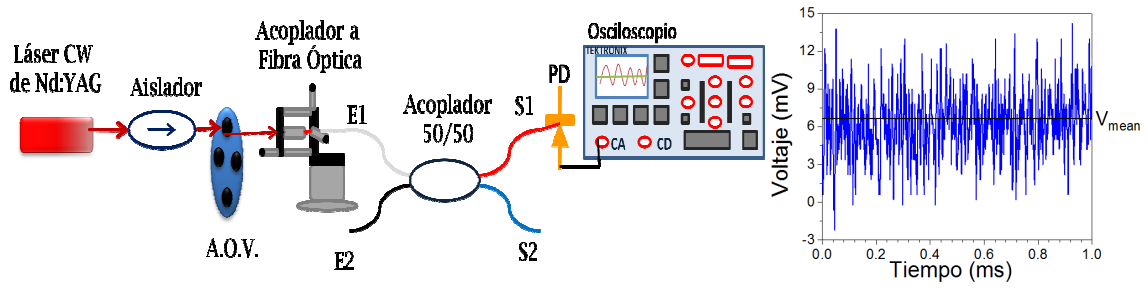


Figura 20. Arreglo experimental empleado para la evaluación del ruido de intensidad del láser de Nd:YAG. El recuadro muestra el ruido de intensidad del láser a una potencia promedio de 1 mW detectada.

donde V_{rms} es el voltaje RMS (root mean square, por sus siglas en inglés) y V_{prom} es el valor promedio de la señal obtenida mediante la función de medición *mean* adquiridas directamente del osciloscopio en acoplamiento AC. Se evalúa de esta manera debido a que en este modo de acoplamiento AC el nivel de voltaje promedio detectado no es cero.

En la figura 21a se presenta el ruido de intensidad detectada en la salida S1 al variar la potencia de entrada – ver recuadro de la figura 21, hasta una potencia máxima detectada de 3 mW para evitar saturar el fotodetector. En este rango se observa un incremento lineal del ruido de intensidad como función de la potencia de entrada al sistema.

Para comparar el ruido de intensidad con respecto al principal ruido en el sistema de detección, se calculó el ruido de disparo σ_i en el fotodetector mediante la ecuación (Sarpeshkar, 1993)

$$\sigma_i = \sqrt{2 \cdot q \cdot \xi \cdot P_{ent} \cdot \Delta f}, \quad (33)$$

donde q (1.6×10^{-19} C) es la carga electrónica, Δf es el ancho de banda, ξ es la responsividad del detector y P_{ent} es la potencia de entrada al fotodetector. Por consiguiente se obtiene la gráfica de la figura 21b, donde se concluye que para la potencia detectada de 1 mW el ruido de intensidad de nuestro láser es alrededor de 100 veces mayor al ruido de disparo.

Un parámetro importante para cualquier sistema de detección es la relación señal a ruido (RSR) (Sze y Kwong, 2007). Este valor está limitado por la razón

$$RSR = V_{CD} / V_{Nrms}, \quad (34)$$

donde V_{CD} corresponde al valor promedio de la señal en acoplamiento DC y V_{Nrms} es el valor efectivo del nivel de ruido. Por ejemplo, a una potencia promedio detectada de 1 mW (700 mV) y un ancho banda de 1 MHz se obtiene una $RSR \approx 350$.

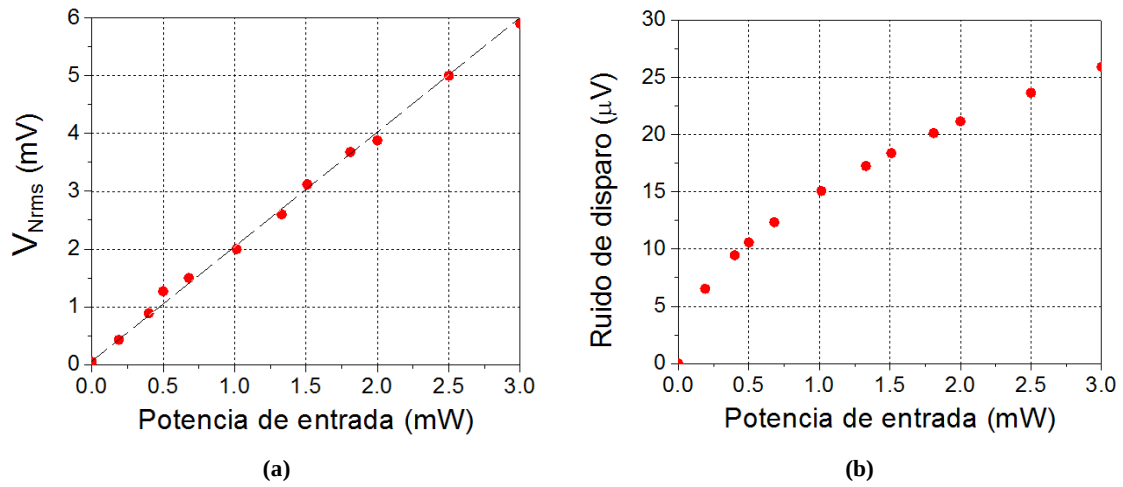


Figura 21. Ruido de intensidad del láser (a) y evaluación teórica para el ruido de disparo (b) en función de la potencia de entrada (ancho de banda de 1 MHz).

Para la evaluación del ruido de fase del láser se utilizó el arreglo experimental mostrado en la figura 18, mediante el siguiente procedimiento. Primeramente se caracterizó la señal reflejada por cada terminal libre del acoplador (reflexión de $\sim 3\%$ debido a la diferencia de índice de refracción en la frontera vidrio-aire) detectada en la entrada E2. Se colocó gel acoplador en la terminal S1 mientras se observaba en el osciloscopio la señal reflejada por la terminal S2 en acoplamiento DC (canal 1) para analizar su ruido de intensidad, mediante el voltaje rms detectado en acoplamiento AC (canal 2) como se presenta en la tabla I. De la misma manera se procedió con la señal reflejada por la terminal S1.

Tabla I. Caracterización de las señales reflejadas por las terminales libres clivadas del acoplador 50/50.

	Señal detectada en el osciloscopio mediante el fotodetector DET10C		Potencia detectada a la salida de cada terminal
	Acoplamiento DC (mV)	Acoplamiento AC V_{Nrms} (mV)	P_{ent} (mW)
Salida 1	180	0.602	~ 18.5
Salida 2	115	0.404	~ 16.2
Ambas salidas con gel acoplador	23.5	0.253	--
Sin Potencia de Entrada	--	0.05	0

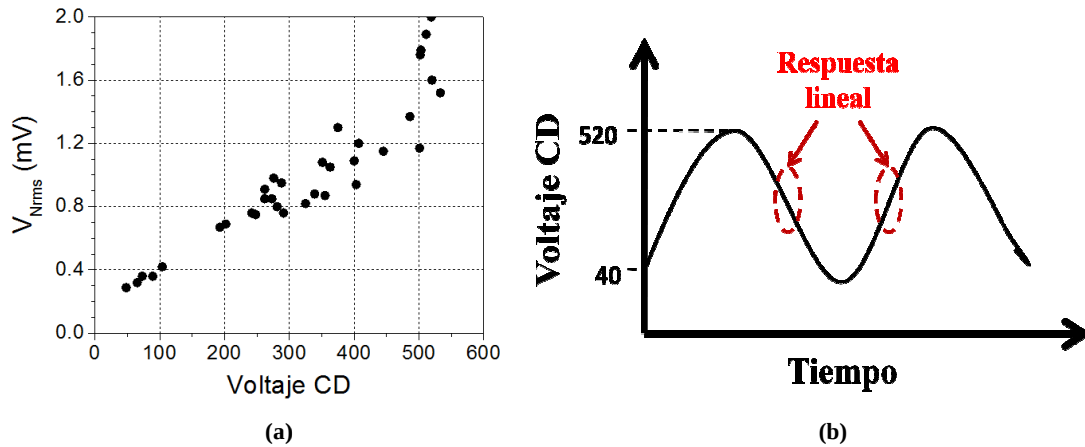


Figura 22. Ruido interferométrico detectado a una diferencia de camino óptico $\Delta L_n \sim 1\text{m}$ (a). Señal de interferencia variante en el tiempo observada en la entrada DC del osciloscopio (b).

Posteriormente se empalmaron 7 m de fibra óptica a una de las salidas del acoplador 50/50, de tal modo que en la entrada E2 se detectó la interferencia (constructiva y destructiva o, en general, variando según condiciones ambientales aleatorias) de las señales reflejadas provenientes de las terminales libres del acoplador (S1 y S2). Se observaron las fluctuaciones entre niveles máximos y mínimos en la entrada con acoplamiento DC – véase la figura 22a. Mientras en la entrada en acoplamiento AC se observaba el voltaje rms del ruido justo a la mitad entre el máximo y el mínimo de interferencia, donde se observa la respuesta lineal del interferómetro de Michelson como se manifiesta en la figura 22b.

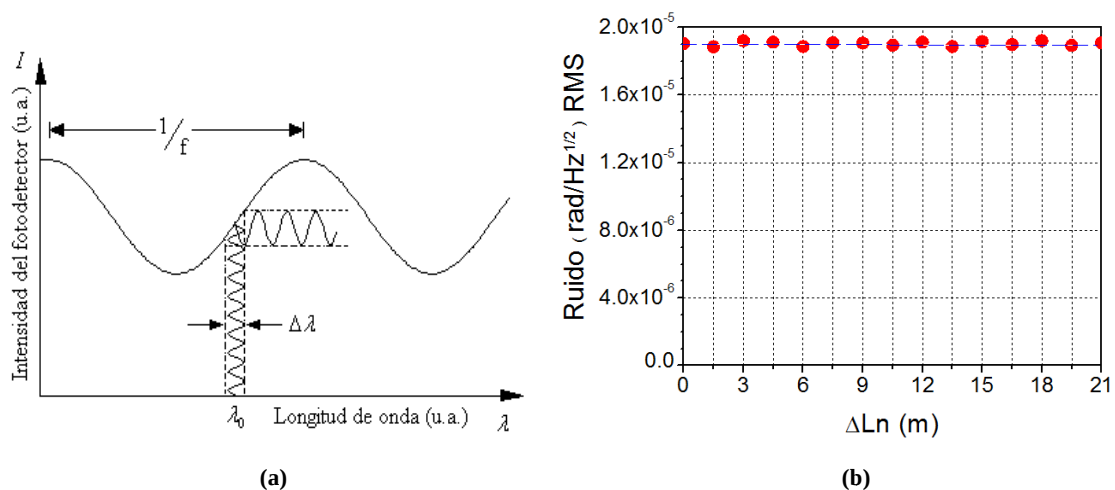


Figura 23. Dependencia entre las variaciones de longitud de onda de emisión ($\Delta\lambda$) y la intensidad a la salida del láser de Nd:YAG (a). En la figura (b) se muestra el ruido interferométrico como función de la diferencia de camino óptico (ΔL_n) obtenido experimentalmente.

Tabla II. Voltaje de modulación para distintos piezoeléctricos.

Piezoeléctrico	Desplazamiento @100V	Frecuencia resonante	$V_{2\pi}$	V_{π}
AE0203D04	$3 \pm 1.5 \mu\text{m}$	16 KHz	25.48 V _{pp}	12.74 V _{pp}
AE0505D16	$11.6 \pm 2 \mu\text{m}$	69 KHz	4.48 V _{pp}	2.24 V _{pp}

Mediante el método anterior se midió el ruido en el régimen lineal hasta la D.C.O. de 21 m observándose que el ruido no varía permaneciendo constante ($\sim 1.9 \times 10^{-5} \text{ rad/Hz}^{1/2}$) como se muestra en la figura 23b. Debido a que el ruido de fase debe crecer linealmente con la DCO, se concluye que el ruido de intensidad es dominante en nuestro láser respecto al ruido de fase. Según Zhou Meng *et al.*, (2005) para esta D.C.O. el ruido es básicamente causado por el ruido blanco del láser (emisión espontánea).

III.3 Sistema de modulación de fase

La modulación de la fase fue generada mediante un espejo adherido a un actuador piezoeléctrico. El parámetro más importante a conocer del actuador es el voltaje V_{π} el cual recorre medio período espacial del patrón de interferencia generado por la reflexión vidrio-aire entre las salidas del acoplador 50/50 como se presenta en la figura 24. Se colocó gel acoplador en la salida del acoplador que incide sobre el espejo para evitar una reflexión parásita por la terminal de la fibra.

Se varió la amplitud de la onda sinusoidal aplicada al piezoeléctrico mediante

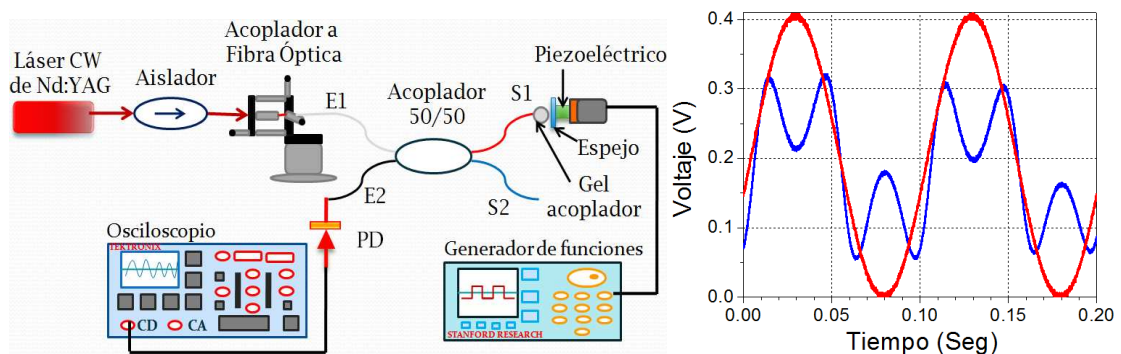


Figura 24. Arreglo experimental para la caracterización del modulador piezoeléctrico. En el recuadro la línea roja representa la señal sinusoidal aplicada al actuador piezoeléctrico y la línea azul representa la respuesta al voltaje V_{π} .

un generador de funciones hasta encontrar la forma de onda (ver el recuadro de la figura 24 en azul) que corresponde al voltaje V_{π} (tabla II).

III.3.1 Generador de funciones

Para la modulación de la fase se dispuso un piezoeléctrico controlado por un generador de funciones digital del fabricante Tektronix – modelo AFG3021, cuyas características primordiales son: genera varias formas de onda (sinusoidal, cuadrada, pulso, etc.) en un rango de frecuencias de 1 mHz a 25 MHz con una resolución de 1 μ Hz, rango de amplitudes de 10 mV_{pp} hasta 10 V_{pp}, impedancia de salida de 50 Ω y ± 5 VDC de voltaje offset. Además, se puede controlar el nivel de offset mediante una fuente de voltaje DC conectada en serie a la salida del generador para aprovechar el máximo de amplitud de su salida.

III.4 Fibras ópticas dopadas con iterbio

En nuestros experimentos se emplearon cuatro distintas muestras de fibras dopadas con iterbio monomodal con diferentes concentraciones de dopante, longitud y fabricante. En las 3 primeras filas de la tabla III se muestran las características básicas proporcionadas por el fabricante CorActive (www.coractive.com) y en la última fila por la compañía Liekki (www.nlight.net). Además de las características proporcionadas por el proveedor, fue necesario conocer otros importantes parámetros de la fibra: la potencia de saturación P_{sat} , su tiempo de respuesta τ_o y la densidad óptica sin saturación $\alpha_o L$. Dichos parámetros se determinaron experimentalmente mediante dos métodos, fluorescencia transitoria y transmitancia no lineal de la fibra óptica.

Tabla III. Características básicas de las fibras dopadas con iterbio.

Fibra	Apertura Numérica NA	Diámetro modal @1060 nm (μ m)	Longitud (m)	Pico de absorción @ 976 nm (dB/m)	Atenuación @ 1200 nm (dB/km)
Yb125	0.18	5	1	1611	16.9
Yb118	0.23	4	2	207.8	12.3
Yb103	0.25	3.5	3	34.4	5.7
Yb1200	0.2	4.4	3	1200	--

III.4.1 Fluorescencia transitoria

Para la evaluación de la potencia de saturación P_{sat} y el tiempo de relajación espontáneo τ_0 mediante fluorescencia transitoria se posicionó un chopper (abanico) en el haz de salida del láser en espacio libre hacia el acoplador 50/50 modulando la potencia del láser con un patrón rectangular, iluminando la fibra dopada con iterbio por lapsos de tiempo. La frecuencia de modulación del chopper (con dos álabes) era ajustada mediante un controlador de la compañía Stanford Research System – modelo SR540, a una frecuencia de 200 Hz – ver figura 25.

Cada muestra de fibra óptica dopada con iterbio se empalmó a un brazo de salida del acoplador 50/50, y en la sección final de éste, se colocó gel acoplador para eliminar interferencia en la entrada E2 del acoplador 50/50 producida por las reflexiones de Fresnel en la frontera vidrio-aire. Con el fin de sólo detectar la señal de fluorescencia por el detector DET10C y visualizarla en el osciloscopio a un ancho de banda del circuito de entrada alrededor de 10 KHz, como se muestra en el recuadro de la figura 25 (gráfica en forma de aleta).

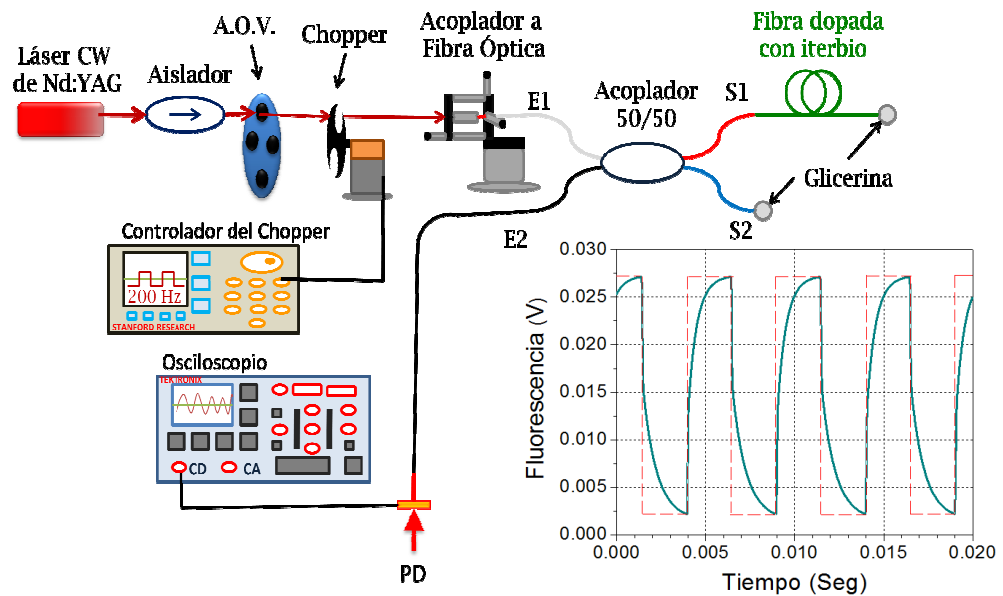


Figura 25. Configuración experimental para la observación de la fluorescencia transitoria en las fibras dopadas con iterbio. En el recuadro se observa el perfil de potencia acoplada a la entrada de la fibra (línea punteada) y la señal en forma de aleta representa la fluorescencia.

Se varió la potencia de entrada mediante un atenuador óptico para grabar diversas señales de fluorescencia. Cada señal fue promediada 256 trazos mediante el osciloscopio, a fin de mejorar la relación señal a ruido y suprimir las bajas fluctuaciones en la señal DC y señales de forma rectangular parásitas debido a la interferencia entre reflexiones espurias de los diferentes contactos ópticos de nuestra configuración.

Se obtuvo el tiempo de excitación (al ser iluminada la fibra dopada) y de relajación (en la obscuridad) de cada señal de fluorescencia grabada ajustando cada curva a la siguiente función exponencial mediante el programa OriginPro 8.0:

$$y = A_1 \cdot e^{(-x/t_1)} + y_0, \quad (35)$$

donde A_1 es la amplitud en la señal, t_1 es el tiempo de decaimiento exponencial y y_0 es el desplazamiento (offset). Así, se obtiene el tiempo de excitación y relajación en la señal de fluorescencia como función de la potencia de entrada expuesto en la figura 26a. En esta figura se observa el tiempo de relajación espontáneo $\tau_0 \sim 0.8$ ms para la fibra Yb125 y un decaimiento en los tiempos de excitación.

Basándose en la ecuación (2), si la potencia de entrada es igual a la potencia de saturación P_{sat} (Stepanov y Hernández Hernández, 2005), entonces el valor del tiempo de crecimiento de la fluorescencia τ es igual a la mitad del tiempo de relajación τ_0 . De esta manera, se grafica el inverso de cada tiempo característico mostrado en la figura 26a,

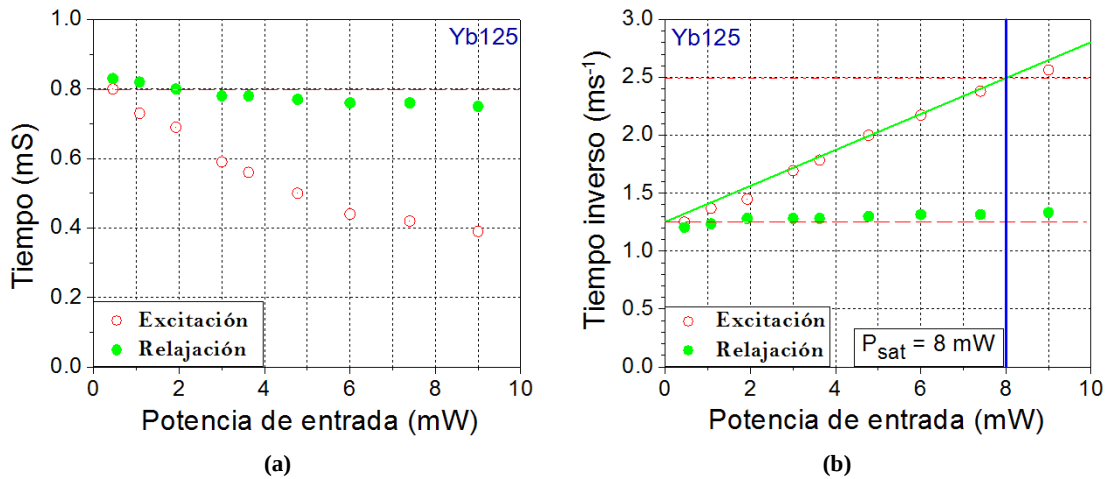


Figura 26. Dependencia de los tiempos de crecimiento y de decaimiento de fluorescencia en función de la potencia de entrada (a). Evaluación de la potencia de saturación en las fibras dopadas empleando el tiempo de crecimiento de la fluorescencia (b) (fibra Yb125 de 94 cm).

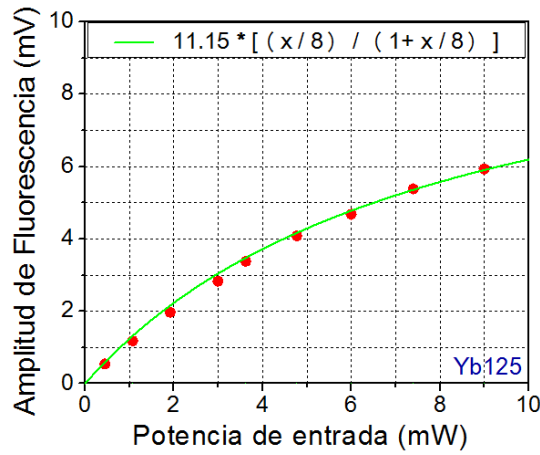


Figura 27. Dependencia de la amplitud de la señal de fluorescencia contra la potencia de entrada (fibra Yb125 de 94 cm).

se traza una línea paralela al doble del valor promedio del tiempo de relajación inverso característico espontáneo (τ_0^{-1}) de la señal de fluorescencia y se interpola gráficamente para obtener el valor aproximado de la potencia de saturación P_{sat} - ver figura 26b.

Para corroborar resultados, se graficó la amplitud de las señales guardadas de fluorescencia correspondiente al tiempo de decaimiento - ver figura 27, e interpoló mediante la ecuación teórica:

$$A = \frac{A_0 \cdot P_0 / P_{sat}}{1 + P_0 / P_{sat}}, \quad (36)$$

donde A es la amplitud de fluorescencia, A_0 es la amplitud máxima en estado de saturación (es decir cuando las poblaciones de nivel básico y metaestable son iguales), P_0 es la potencia de entrada y P_{sat} es la potencia de saturación. En la tabla IV se exponen los resultados de la potencia de saturación P_{sat} y el tiempo de relajación del ión de iterbio τ_0 respaldados mediante ambos métodos expuestos para cada muestra de fibra óptica dopada con iterbio.

Tabla IV. Resultados obtenidos en las fibras dopadas con iterbio.

Fibra	τ_0 (mS)	P_{sat} (mW)	$\alpha_0 L$	Tc
Yb125	0.8	8	0.76	0.55
Yb118	0.78	3.5	0.22	0.908
Yb103	0.76	2.7	0.17	0.76
Yb1200	0.75	16	1.6	0.99

III.4.2 Transmitancia no lineal

Para la comprobación de los resultados obtenidos y evaluación de la densidad óptica $\alpha_o L$ también se usó la técnica de transmitancia no lineal. En este método, se varió la potencia de entrada al acoplador 50/50 mientras se monitoreaba y registraba la energía propagada a la salida en cada brazo – ver figura 28. La densidad óptica está evaluada mediante la transmitancia dada por:

$$T = P_{sal} / P_{ent}. \quad (37)$$

Mediante la ecuación (12), se ajustaron los valores experimentales de transmitancia a una curva mediante el programa Maple 12.0, introduciendo los parámetros de densidad óptica $\alpha_o L$, potencia de saturación P_{sat} obtenida y transmitancia por contacto T_C originado por el empalme de cada muestra de fibra óptica con uno de los brazos del acoplador 50/50 – ver recuadro de la figura 28. De esta manera se lograron los resultados mostrados en la tabla IV.

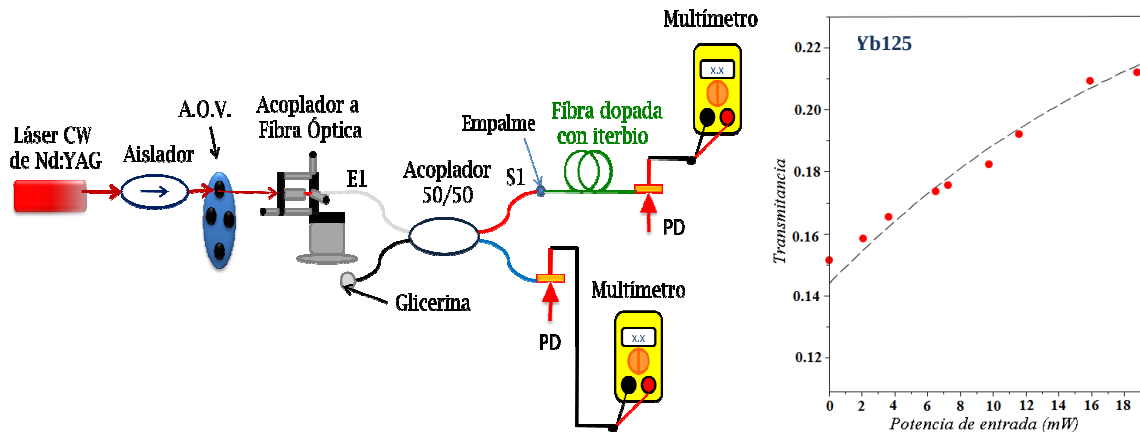


Figura 28. Configuración experimental para la medición de la transmitancia no lineal en las fibras dopadas con iterbio. En el recuadro se muestra la transmitancia no lineal de la fibra Yb125.

III.5 Conclusiones parciales

1. Se desarrolló una configuración experimental de fibra óptica la cual permite caracterizar los parámetros más importantes a nuestro interés del láser de Nd:YAG, los actuadores piezoeléctricos y las fibras ópticas dopadas con iterbio.
2. El láser de Nd:YAG de onda continua emitiendo a una longitud de onda 1064 nm con potencia de salida máxima de 250 mW. Su longitud de coherencia es lo suficiente para desarrollar nuestros experimentos hasta una diferencia de camino óptico de 21 m. Al menos para la diferencia de camino óptico de 21 m, el ruido de intensidad es dominante, con relación señal a ruido ≈ 350 . Las evaluaciones teóricas mostraron que para la potencia detectada de 1 mW el nivel de ruido es alrededor de 100 veces mayor al ruido de disparo.
3. Los actuadores piezoeléctricos AE0203D04 y AE0505D16 pueden lograr el desplazamiento necesario para recorrer medio período espacial el haz incidente proveniente de láser de Nd:YAG aplicando un voltaje V_{π} (12.74 Vpp y 2.24 Vpp respectivamente).
4. Se caracterizaron distintas muestras de fibras ópticas monomodo dopadas con iterbio, de diferentes longitudes, fabricante y concentraciones de iterbio iluminadas a una longitud de onda de 1064 nm. En particular se evaluó la potencia de saturación, el tiempo de relajación, la densidad óptica y la transmitancia por empalme en cada una de las fibras dopadas con iterbio mediante las técnicas de transmitancia óptica no lineal y fluorescencia transitoria como se expone en la tabla IV.

Capítulo IV

Investigación experimental del MDO transitorio en FDY

IV.0.1 Introducción

En el presente capítulo nos enfocamos a la caracterización experimental del mezclado de dos ondas transitorio en las fibras dopadas con iterbio a la longitud de onda de 1064 nm con el fin de obtener las condiciones óptimas del sistema interferométrico adaptativo. Se desarrollaron un conjunto de experimentos para observar la dependencia de las componentes (par e impar) de la respuesta del MDO en función de la potencia de entrada, del factor de acoplamiento y de la amplitud de modulación. Se evaluó la propiedad adaptativa, sensibilidad y desempeño del interferómetro mediante la relación de señal a ruido en la respuesta del MDO.

IV.1 Configuración experimental

El esquema del sistema experimental se presenta en la figura 29. En esta configuración se forma una rejilla dinámica en la fibra dopada con iterbio por medio de un patrón de interferencia constituido por la onda de referencia directa “R” y la onda de señal reflejada por el espejo adherido al transductor piezoeléctrico (AE0203D04 de Thorlabs) - “S”. En la entrada E2 del acoplador se detectó la señal de interferencia generada por la onda reflejada en el espejo vibrante y la onda de referencia difractada por la rejilla dinámica. A dicha señal detectada en esta forma se denomina señal de mezclado de dos ondas (MDO).

En los experimentos reportados se usó un espejo adherido a un actuador piezoeléctrico para modular la fase con un perfil rectangular a una frecuencia de 200 Hz controlado mediante un generador de funciones AFG3021 (de Tektronix) con amplitud de voltaje de salida hasta el voltaje $V_{2\pi}$ del modulador de fase (véase sección III.3 en el Capítulo 3). Se detectó la señal MDO mediante el fotodiodo de InGaAs equipado con el preamplificador de transimpedancia PDA10CS (de Thorlabs) con una ganancia de hasta 10^6 V/A ($\pm 5\%$) y un ancho de banda máximo de 17 MHz. Se visualizó con el osciloscopio digital TDS3012B

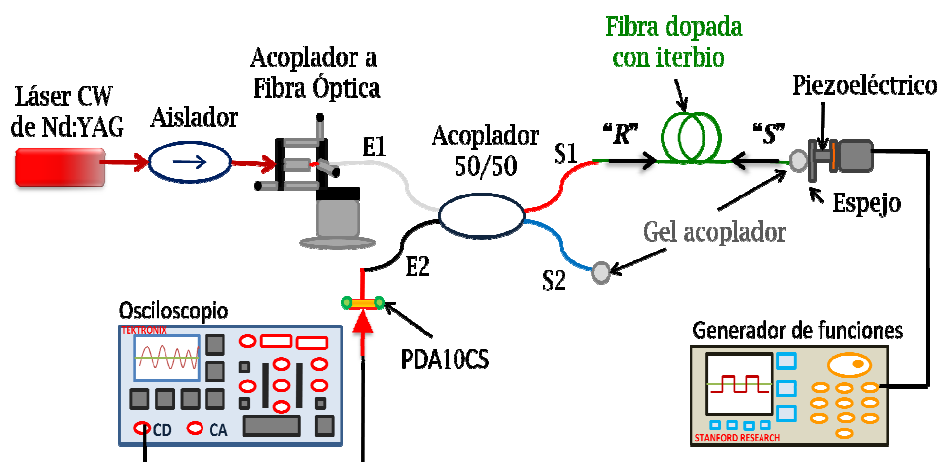


Figura 29. Arreglo experimental del sistema interferométrico.

(de Tektronix) usando promediado de hasta 512 trazos. A las salidas $S_{1,2}$ del acoplador 50/50 se colocó gel acoplador para eliminar las ondas parásitas por reflexión de Fresnel en la fronteras vidrio-aire ($\sim 3\%$).

En general, esta configuración experimental está basada en la publicación de Stepanov et al. (2007). En la figura 30 se expone la fotografía de la sección del sistema, donde se muestra como se acoplaba la energía en la fibra dopada al reflejar el espejo adherido al piezoeléctrico (modulador de fase). Se introducía la fibra dopada por un conector FC temporal hasta sobresalir por la férula una fracción de fibra para facilitar su manejo. El conector estaba sujeto a una montura de traslación, desplazada por un tornillo micrométrico (de Newport) con una división mínima de $1\ \mu\text{m}$ para controlar la distancia entre la fibra y el espejo sin ser dañado alguno de los dos. El transductor piezoeléctrico estuvo contenido en un cilindro de aluminio de una pulgada de ancho para asegurarlo a una montura de espejo convencional (de Thorlabs KM1), con el fin de poder alinear la fibra con el espejo. De esa manera todos los elementos a su vez estuvieron atornillados a una placa perforada de 8 pulgadas por lado asegurada a la mesa de trabajo.

Cabe mencionar, que además de la señal transitoria del MDO en esta configuración, también se observan las señales de interferencia convencional por reflexiones en los diferentes contactos ópticos de nuestro sistema de fibra óptica. Una medida general para reducir estas señales parásitas fue empalmado todo el sistema. Sin embargo, la señal más fuerte de este tipo (y la cual no podemos reducir por empalme) fue la señal de interferencia

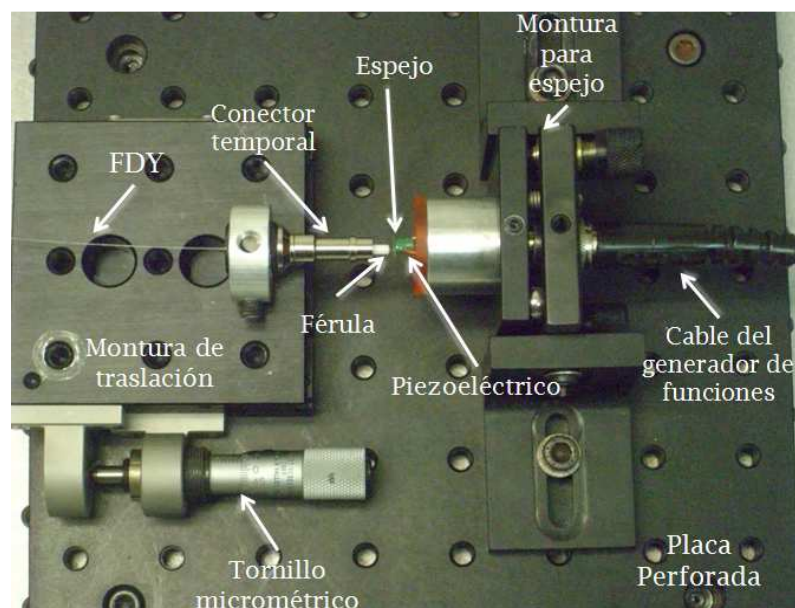


Figura 30. Imagen del acoplador a la salida de la fibra con el modulador piezoeléctrico.

entre la onda modulada de fase (de forma rectangular) reflejada por el espejo vibrante y la reflejada por el extremo de la fibra dopada.

Como mencionamos anteriormente, para disminuir esta reflexión se usó gel acoplador ocupando el espacio entre el extremo de la fibra y el espejo vibrante. Sin embargo, por imposibilidad de eliminar completamente esta interferencia parásita, generalmente se presentó en la señal MDO detectada en forma de una componente rectangular – ver la figura 31. Ajustando la distancia entre el espejo y el extremo de la fibra por el tornillo micrométrico fue posible disminuir esta modulación por ajuste del punto operacional de

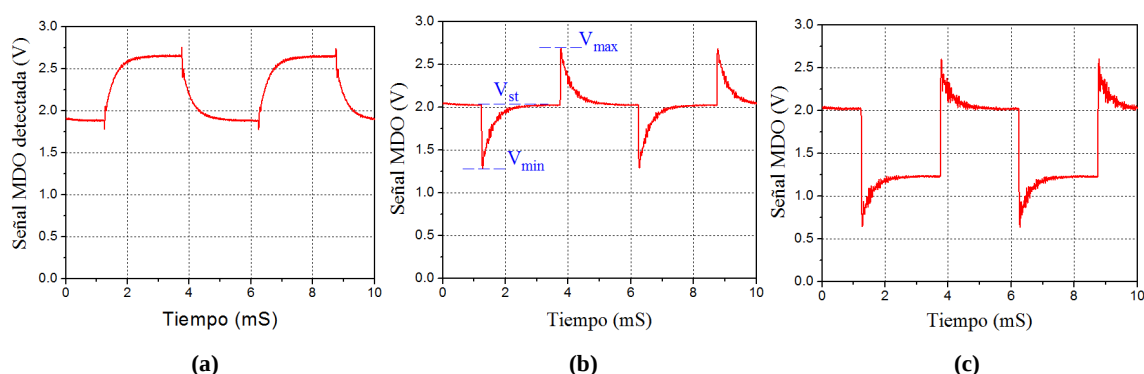


Figura 31. Señal detectada para tres distintos ajustes de distancia fibra-espejo. Los trazos muestran la interferencia destructiva (a) y constructiva (c) entre la señal rectangular modulada y la señal del MDO. El trazo (b) muestra la señal del MDO prácticamente limpia de señal parásita (es decir, sin componente rectangular).

este interferómetro al punto de detección cuadrática, o cambiar su signo. La señal parásita restante (fluctuando en el tiempo por el cambio de temperatura ambiental) fue posible reducirla adicionalmente hasta el nivel despreciable usando detección promediada en el osciloscopio digital.

IV.2 Caracterización experimental de la respuesta del MDO transitoria

En los experimentos presentados a continuación se usaron las fibras con mayor concentración de iterbio Yb125 ($L \approx 39$ cm, $\alpha_0 L \approx 0.76$) e Yb1200 ($L \approx 3$ m, $\alpha_0 L \approx 1.44$). Los resultados de la caracterización preliminar en estas fibras están presentados en la Sección 4 del Capítulo III.

IV.2.1 Balance general de potencias

Para una potencia típica de entrada (P_{in}) de 17 mW a la fibra dopada (valor observado también en la salida libre del acoplador S2), se detectó a la salida de esta (P_{out}) el nivel promedio ≈ 11 mW. Con estos datos podemos evaluar la transmitancia de la fibra (parcialmente saturada por la onda directa) como

$$T = P_{out}/P_{in} = 11 / 17 \approx 0.64. \quad (38)$$

Bajo estas condiciones experimentales (para un ajuste en particular del acoplamiento entre la fibra con el espejo) la potencia estacionaria (P_{st}) detectada en la entrada E2 del acoplador 50/50 fue de ~ 0.17 mW. Entonces, el coeficiente de acoplamiento (γ) de la onda reflejada por el espejo con la fibra Yb125 es

$$\gamma = (2 \cdot P_{st}) / [(P_{in}) \cdot (T)^2] = (2 \cdot 0.17) / [(17) \cdot (0.64)^2] \approx 0.048, \quad (39)$$

donde definimos este coeficiente como el porcentaje de potencia de luz a la salida de la fibra reingresada a la FDY por el espejo. Este parámetro no es fijo y puede variarse bastante ajustando la distancia entre el extremo de la fibra dopada y el espejo por el tornillo micrométrico. El coeficiente de acoplamiento γ igual a 1 es el máximo valor teórico y el valor máximo de γ que pudimos alcanzar en nuestro sistema fue de 0.3.

Cabe indicar, que la evaluación experimental del factor de acoplamiento no es del toda

precisa, dado que interpretamos al valor íntegro de la potencia estacionaria como solo la potencia reflejada por el espejo, cuando en realidad el valor de la potencia estacionaria es la suma de la potencia de la onda de referencia difractada por la rejilla dinámica formada en la FDY y la potencia de la onda reflejada por el espejo en ausencia de modulación. Aún así, ésta definición es competente para caracterizar la respuesta del MDO transeúnte. Asimismo, el γ máximo que se logró es de 0.6 sin empalmar la FDY (sin el proceso del MDO transitorio) al acoplador convencional 50/50 con fibra HI 1060 FLEX – de Corning.

IV.2.2 Evaluación de la contribución de fluorescencia

En el trazo mostrado en la figura 31b se observa la suma de las señales de respuesta de MDO transitorio y la señal de fluorescencia acoplada a la fibra por los iones de iterbio excitados al nivel metaestable por la iluminación a una longitud de onda de 1064 nm.

Para evaluar la potencia de fluorescencia en la señal MDO observada, se removió el espejo de retro-reflexión y se midió la potencia de luz en la entrada E2 variando la potencia introducida a la fibra dopada, por atenuadores ópticos colocados entre el aislador y el acoplador 50-50 del sistema en la figura 29. Durante estas mediciones se aplicó gel a ambas salidas del acoplador - S1 y S2 - para prevenir reflexiones de las ondas directas de regreso a la fibra. La gráfica de la potencia detectada en función de la potencia de entrada es presentada en la figura 32. El valor mínimo bosquejado en esta gráfica (~ 13.1 mV) corresponde al nivel estacionario del sistema electrónico de detección (fotodiodo con preamplificador + osciloscopio) a una potencia acoplada igual a cero. El resto de la señal detectada tiene una forma característica con saturación y puede ser atribuida a la fluorescencia.

La pequeña potencia de la fluorescencia detectada nos permite despreciar la contribución de este origen en los experimentos del mezclado de dos ondas. Por ejemplo, la señal de fluorescencia equivale a $\sim 1\%$ ($18.5\text{mV} / 2\text{V} \approx 0.0092$) de la amplitud estacionario de la señal MDO mostrada en la figura 31b para el acoplamiento $\gamma \approx 0.05$. Sin embargo, para acoplamientos menores, la contribución de fluorescencia en el nivel estacionario de la señal detectada puede ser bastante grande y se debe tomar en cuenta durante la correcta evaluación de la señal del MDO.

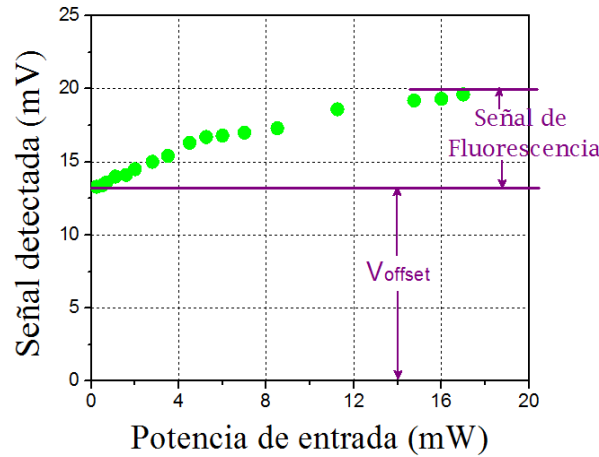


Figura 32. Señal detectada en la entrada E2 en ausencia de ondas reflejadas en función de la potencia de entrada.

IV.2.3 Procesamiento y separación de las contribuciones en las señales MDO

Las señales del MDO transitorio observadas en la entrada E2 del sistema para tres distintas amplitudes de modulación se presentan en la figura 33. Las señales mostradas han sido normalizadas sobre el valor estacionario – véase figura 31b, como parte de la primera etapa del procesamiento. En general, las señales MDO detectadas originadas a una longitud de onda de 1064 nm en las muestras de FDY expuestas en la tabla III están dominadas por una componente impar, asociada a una rejilla de fase (ver la sección 3, del Capítulo 2), por ello, la forma observada de la respuesta del MDO es prácticamente simétrica.

La profundidad de modulación en la respuesta del MDO transitorio ($\Delta V / V_{st}$) es definida como la relación entre la amplitud ΔV del pulso en la señal de MDO sobre su valor estacionario – véase figura 33d. De esta manera, en la fibra Yb1200 ($L = 300$ cm, $\alpha_0 L = 1.6$) la $\Delta V / V_{st} \cong 65\%$ es prácticamente el doble en relación a la fibra Yb125 ($L = 39$ cm, $\alpha_0 L = 0.76$) la $\Delta V / V_{st} \cong 32\%$.

Los oscilaciones rápidas (visibles principalmente en las figuras 33b, 33c y 33d) variando con significativamente mayor rapidez que el tiempo de relajación del nivel metaestable $\tau_0 \approx 0.8$ ms del ion Yb^{+3} , son atribuidos a los procesos transitorios en el sistema mecánico por la frecuencia de resonancia (~ 16 KHz) del transductor piezoeléctrico.

Para hacer un análisis cualitativo de las señales mostradas en la figura 33, se separó la

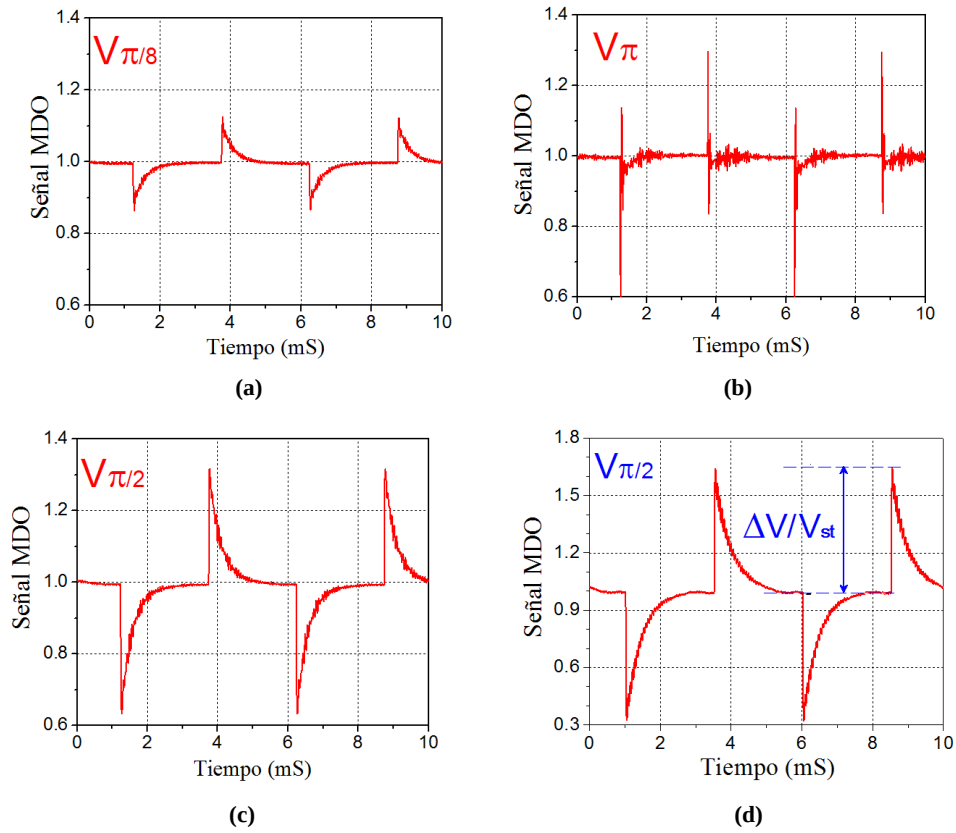


Figura 33. Respuesta del MDO transitorio en la fibra Yb125 ($P_{in} = 17$ mW, $\gamma \cong 0.05$, $L = 39$ cm) observada a distintas amplitudes de modulación: $V_{\pi/8}$ (a), V_{π} (b), $V_{\pi/2}$ (c) y en la fibra Yb1200 ($P_{in} = 19$ mW, $\gamma \cong 0.23$, $L = 3$ m) a una amplitud de modulación $V_{\pi/2}$ (d).

componente impar (desplazando por medio período la señal grabada del MDO, restándola de la señal inicial) - ver figura 34, y la componente par (sumando la señal inicial y la señal desplazada y dividiéndola sobre el factor 2). Ambas señales obtenidas de esta manera se presentan en la figura 35.

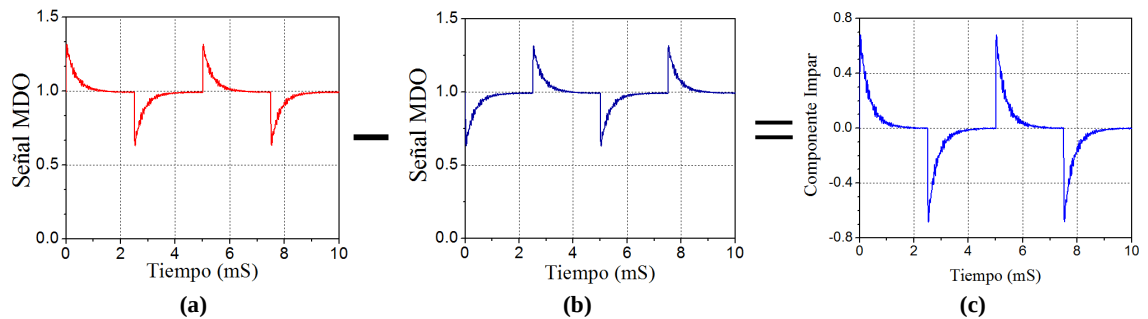


Figura 34. Señal de la respuesta del MDO transitorio (a) restando a la señal inicial desplazada medio período (b) obteniéndose la componente impar (c).

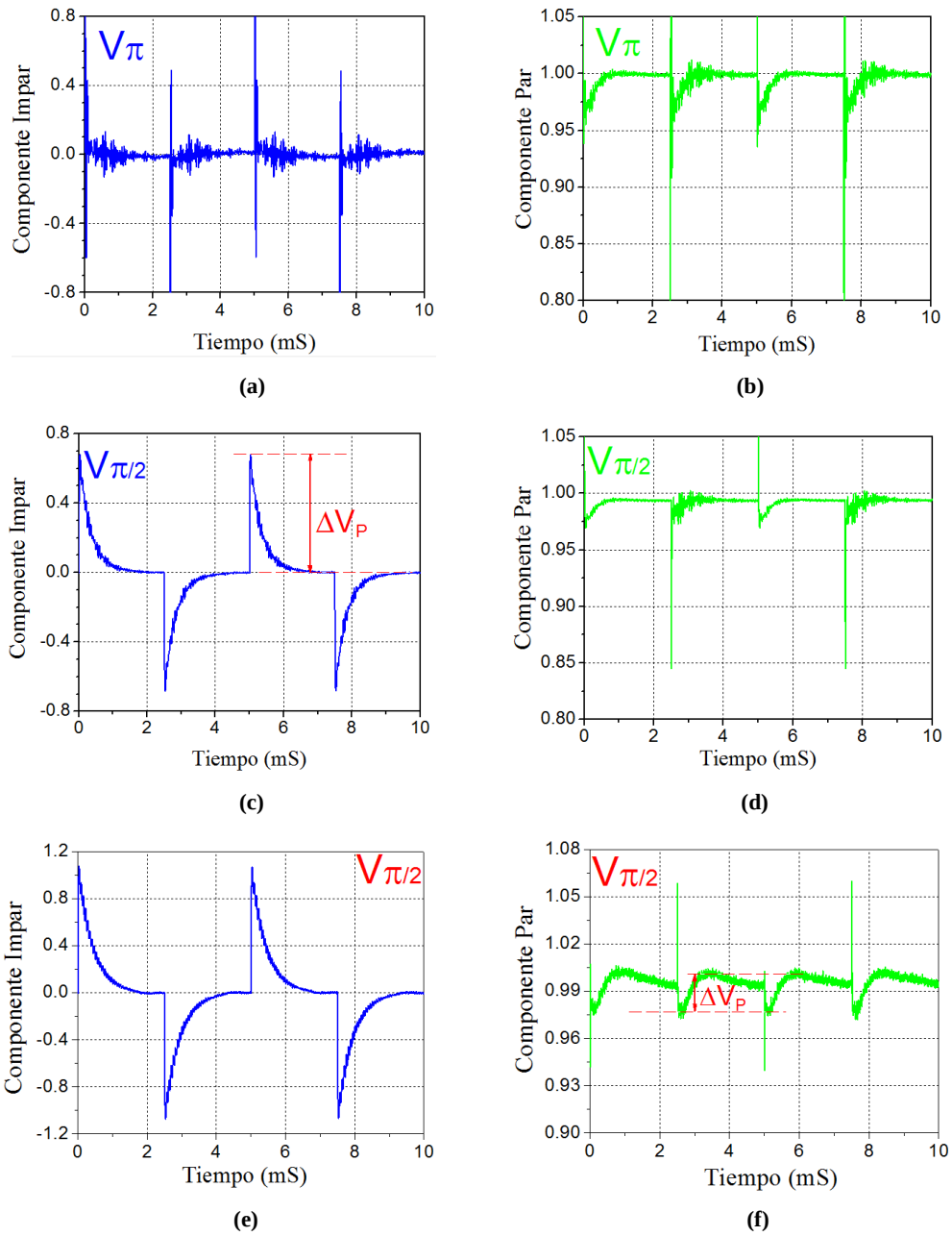


Figura 35. Componente impar y par de las respuestas MDO en la fibra Yb125 ($P_{in} = 17$ mW, $\gamma \cong 0.05$, $L = 39$ cm) a distintas amplitudes de modulación: V_π (a, b) y $V_{\pi/2}$ (c, d), y en la fibra Yb1200 ($P_{in} = 19$ mW, $\gamma \cong 0.23$, $L = 3$ m) a una amplitud de modulación $V_{\pi/2}$ (e, f), respectivamente.

Comparando las amplitudes de estas componentes indica que la componente impar (asociada a la rejilla de fase) es aproximadamente 20 veces mayor a la componente par (por la rejilla de amplitud), siendo la rejilla de fase dominante en las condiciones de nuestros experimentos con FDY a la longitud de onda de 1064 nm.

IV.2.4 Caracterización de las componentes en las señales del MDO

En busca de clarificar experimentalmente el comportamiento de la componente par e impar en la señal MDO transitorio se variaron distintos parámetros del sistema: el voltaje de modulación aplicado al piezoeléctrico, la potencia acoplada a la fibra dopada con iterbio y por último, el factor de acoplamiento.

La figura 36 muestra las dependencias de la amplitud normalizada (ΔV_P) en la componente impar – véase figura 35c, y de la amplitud normalizada (ΔV_P) en la componente par – ver figura 35f, en función del voltaje aplicado al piezoeléctrico; conseguida al variar la amplitud del voltaje aplicado al actuador piezoeléctrico resultando alteraciones en la fase del haz reflejado – “S”. En realidad, se muestra la dependencia teórica esperada (Stepanov y Hernández Hernández, 2007) para la componente impar:

$$\Delta V_P \approx \sin(\pi \cdot V_{mod} / V_\pi), \quad (40)$$

mientras que para la componente par, muestra la dependencia:

$$\Delta V_P \approx [1 - \cos(\pi \cdot V_{mod} / V_\pi)]/2. \quad (41)$$

Dependencias teóricas muy semejantes a las de la figura 36 y 37 se observaron en las demás muestras de FDY empleadas en el desarrollo de esta tesis, diferencian únicamente mínimas variaciones en la amplitud normalizada de las componentes en la respuesta del MDO como se puede apreciar al comparar las figuras 35c y 35e.

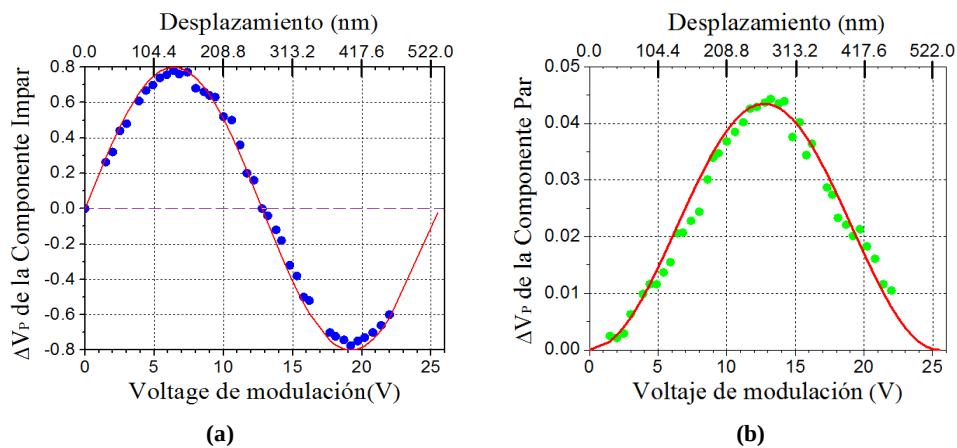


Figura 36. Dependencia experimental de la amplitud normalizada de la componente impar (a) y de la componente par (b) en función del voltaje de modulación. La línea sólida representa el ajuste teórico con $V_\pi = 12.74 \text{ V}_{p-p}$ (Fibra Yb125, $L = 39 \text{ cm}$, $P_{in} = 17 \text{ mW}$, $\gamma \approx 0.05$).

La figura 37 muestra las dependencias de la ΔV_P de la componente par e impar en función del factor de acoplamiento (γ) a un voltaje de modulación $V_{\pi/2}$, obtenida variando la distancia entre el extremo de la fibra dopada con iterbio clivada y el espejo adherido al piezoeléctrico girando el tornillo micrométrico en la montura de traslación - ver figura 30. Se observa que en el amplio rango de variación del factor de acoplamiento ($3 \times 10^{-3} - 0.3$), la amplitud de la componente par e impar no varía significativamente. De hecho, este resultado está en concordancia con el análisis teórico para la rejilla de amplitud, formada por las ondas de distintas potencias (Stepanov, 2008).

Una tendencia por la disminución de la amplitud para acoplamientos bajos puede ser explicada por la contribución de fluorescencia en el nivel promedio de la señal detectada. Si esto es así, es posible aumentar el valor de la amplitud normalizada usando un filtro óptico (el cual atenúa todas las longitudes de onda excepto la emitida por el láser) en frente del detector.

La figura 38 muestra la dependencia de la ΔV_P de la componente par e impar en función de la potencia acoplada a la fibra dopada con iterbio a un voltaje de modulación $V_{\pi/2}$. Esta vinculación se logró modificando la potencia de entrada a la FDY colocando atenuadores ópticos entre el aislador y la montura que introducía la energía del láser al acoplador mostrado en la figura 29. Al menos cualitativamente, la dependencia obtenida está en concordancia con las predicciones teóricas (Stepanov y Pérez Cota, 2007): el crecimiento cuadrático de la amplitud con la potencia (para las potencia bajas), un

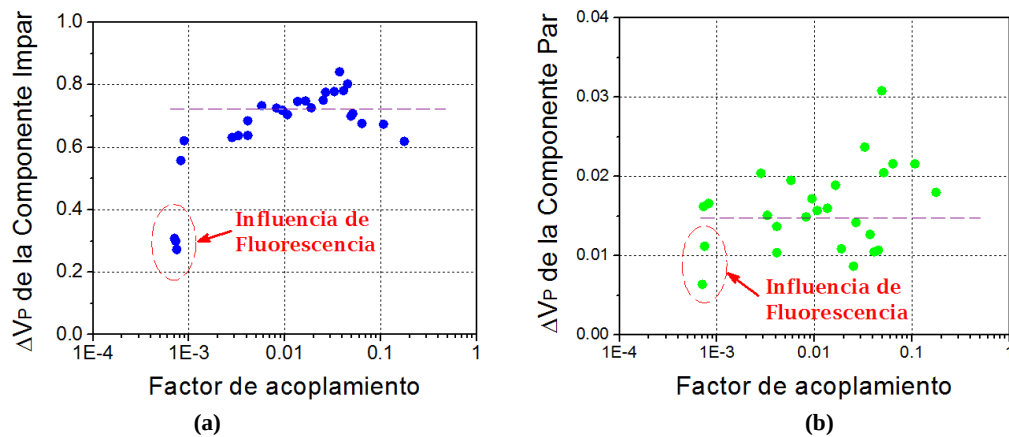


Figura 37. Dependencia experimental de la amplitud de la componente impar (a) y de la componente par (b) en función del factor de acoplamiento (Fibra Yb125, $L = 39$ cm, $P_{in} = 17$ mW).

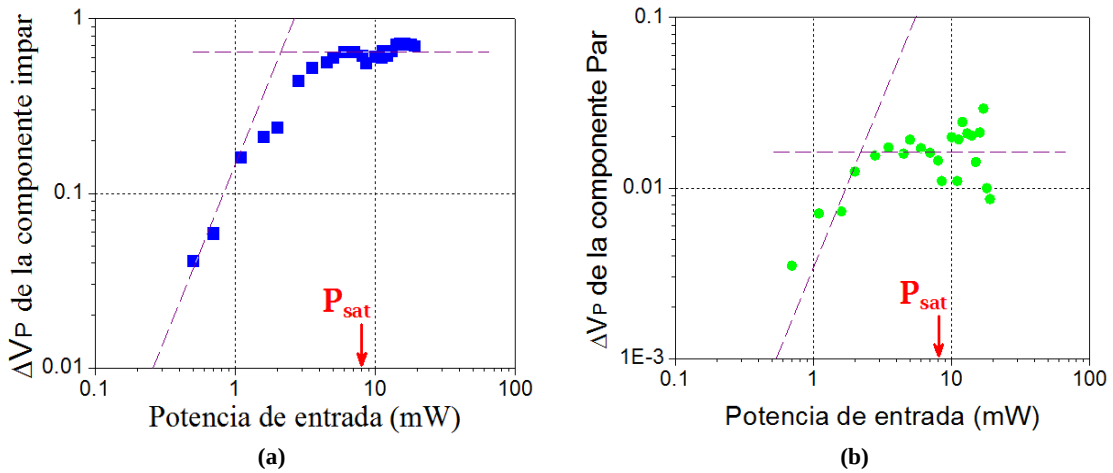


Figura 38. Dependencia experimental de la amplitud de la componente impar (a) y par (b) en función de la potencia de entrada al acoplador 50/50 (Fibra Yb125, $L = 39$ cm, $\gamma \cong 0.05$).

máximo de señal alrededor de la potencia de saturación y el decaimiento lineal inverso después de la potencia de saturación. Tomando en cuenta que para la fibra Yb125 la potencia de saturación estuvo encontrada alrededor de 8 mW (ver la tabla IV), el inicio de saturación de la señal MDO alrededor de 10 mW es bastante esperado. Por consiguiente, cada muestra de FDY utilizada en este trabajo muestra su máxima respuesta en la señal de MDO alrededor de la potencia de saturación evaluada en la sección 4 del Capítulo 3.

IV.3 Evaluación de las propiedades adaptativas del interferómetro

La propiedad adaptativa es una de las características más interesantes en nuestro sistema interferométrico, por su capacidad de compensar las fluctuaciones de fase de bajas frecuencias originadas por el medio ambiente. Dicha propiedad está determinada por el tiempo de formación de la rejilla τ_g de la ecuación (2). A mayor rapidez de formación de la rejilla dinámica (es decir, con menor τ_g), más apta será la respuesta de nuestro sistema a trabajar en ámbitos reales, en particular, médicos ó industriales.

Con los trazos de la componente par e impar de la respuesta del MDO obtenidos anteriormente (ver la figura 35), podemos recortar el período del proceso de relajación de los pulsos transitorios de MDO y aproximarlos a una función exponencial (ecuación (35)) como se muestra en la figura 39. Estas aproximaciones fueron realizadas mediante el paquete Origin 8.0, obteniéndose los resultados de la tabla V.

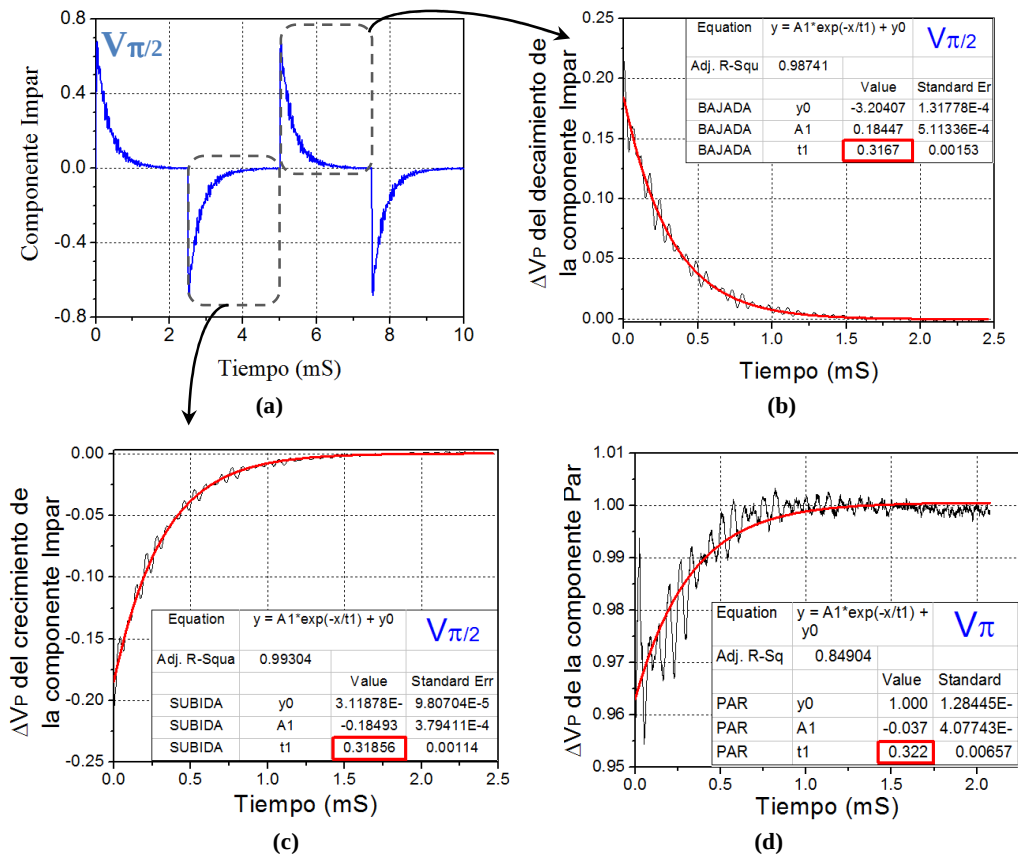


Figura 39. Evaluación del tiempo de relajación del pulso positivo (a) y negativo (b) en la componente impar obtenido a una amplitud de modulación $V_{\pi/2}$ y del pulso de la componente par (d) obtenido a una amplitud de modulación V_{π} de la respuesta del MDO transitorio detectada en la fibra Yb125 ($L = 39$ cm, $\gamma \approx 0.05$, $P_{in} = 17$ mW).

Entonces, para la potencia de entrada de 17 mW en la fibra Yb125 el tiempo de relajación exponencial (para el pulso positivo y negativo) es una característica propia del proceso de MDO y, al parecer, prácticamente no depende de la amplitud de modulación de fase. De la ecuación teórica (2), para $\tau_0 = 0.8$ ms se obtiene un $\tau_g \approx 0.26$ ms, el cual es bastante cercano al valor experimental presentado en la tabla V. La discrepancia puede ser atribuida al decaimiento de la luz a través de la fibra.

Tabla V. Tiempos de relajación del pulso positivo y negativo en las componentes de la señal MDO impar a distintas amplitudes de modulación.

Amplitud de modulación	Tiempo de subida (mS)	Tiempo de bajada (mS)
$V_{\pi/8}$	0.325	0.329
$V_{\pi/4}$	0.325	0.324
$V_{\pi/2}$	0.318	0.317
V_{π}	0.322	--

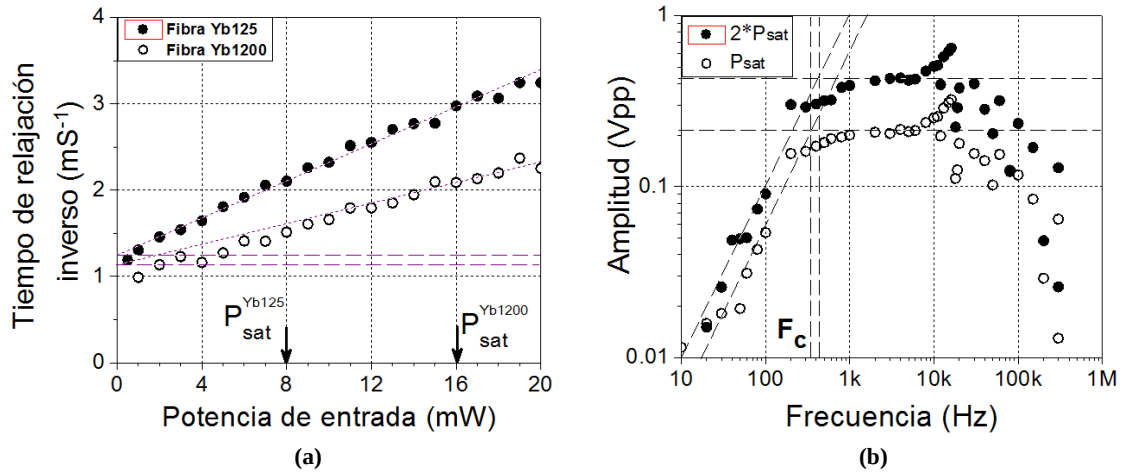


Figura 40. Dependencia experimental del tiempo de relajación inverso de la respuesta del MDO transitorio en función de la potencia de entrada (a) en la Fibra Yb125 ($L = 39$ cm, $P_{\text{sat}} = 8$ mW, $\tau_0 = 0.8$ ms) e Yb1200 ($L = 3$ m, $P_{\text{sat}} = 16$ mW, $\tau_0 = 0.75$ ms). Las líneas recortadas representan τ_0^{-1} . Amplitud de la respuesta del MDO en función de la fase sinusoidal modulada en la fibra Yb125 (b) (frecuencia de resonancia del piezoeléctrico ~ 16 KHz).

En la figura 40a se presenta la dependencia experimental de la velocidad de formación de la rejilla (τ_g^{-1}) en función de la potencia de entrada a la FDY, obtenida mediante aproximaciones exponenciales del período correspondiente al tiempo de relajación del pulso transitorio en la señal de MDO para las fibras Yb125 e Yb1200. Ahí se observan tiempos de formación del orden de submilisegundos y además, que la τ_g^{-1} en la fibra Yb125 es ≈ 1.4 veces más rápida a la misma potencia en la fibra Yb1200. De esta comparación, se concluye que la τ_g^{-1} incrementa linealmente con la potencia de entrada pero decrece con la densidad óptica $\alpha_0 L$ de la fibra.

Es típico evaluar la capacidad adaptativa del interferómetro con sólo aplicar un perfil de modulación sinusoidal a la onda reflejada “S” a través del transductor piezoeléctrico con un incremento variable en la frecuencia de modulación controlada mediante el generador de funciones – ver figura 40b. Se observa un perfil de respuesta del MDO como en un filtro pasa-altas compensando todas las variaciones ambientales a frecuencias menores a la frecuencia de corte (F_c), la cual es posible estimar con la ecuación

$$F_c = \frac{1}{2\pi\tau_g}. \quad (42)$$

El decaimiento de la amplitud en la respuesta de la señal de MDO en las altas frecuencias es atribuido al ancho de banda limitado por la frecuencia de resonancia (alrededor de ~ 16 KHz) del transductor piezoeléctrico.

Cabe destacar esta propiedad única de los interferómetros adaptativos – la disminución de las señales ambientales con bajas frecuencias - no es equivalente a la acción de un filtro electrónico de pasa-alta agregado en el sistema después del fotodiodo. En la configuración adaptativa bajo consideración esta operación se hace por un ajuste automático de la rejilla dinámica hasta el proceso de foto-detección, y, como resultado, las distorsiones no-lineales de la señal informativa en las frecuencias bajas son eliminadas.

IV.4 Evaluación de la relación señal a ruido y sensibilidad del sistema interferométrico

El desempeño del sistema interferométrico fue caracterizado mediante la relación señal a ruido (RSR), definida como

$$RSR = \frac{\Delta V}{V_{Nrms}}, \quad (43)$$

donde ΔV es la amplitud asignada desde el valor estacionario al máximo del pulso en la señal de MDO (ver figura 41) medido a un voltaje de modulación $V_{\pi/2}$ (donde se observa la máxima respuesta de la señal MDO – véase figura 33) y V_{Nrms} es el valor efectivo del ruido medido en ausencia de modulación de fase por el método presentado en la sección 2.5, capítulo 3. Como en la sección anterior, se muestra la evaluación de la RSR de los datos experimentales obtenidos para las FDY con mayor densidad óptica: Yb125 ($\alpha_0 L = 0.76$) e

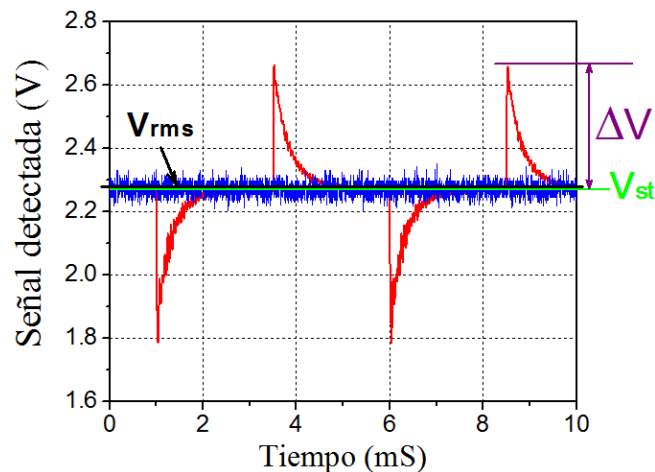


Figura 41. Trazo de la respuesta máxima del MDO transitorio obtenida con promediación de 512 trazos a un voltaje de modulación $V_{\pi/2}$ (línea roja). El trazo encimado (azul) representa el nivel estacionario (V_{st}) y el ruido de la señal detectada sin modulación de la onda reflejada “S” y sin promediación.

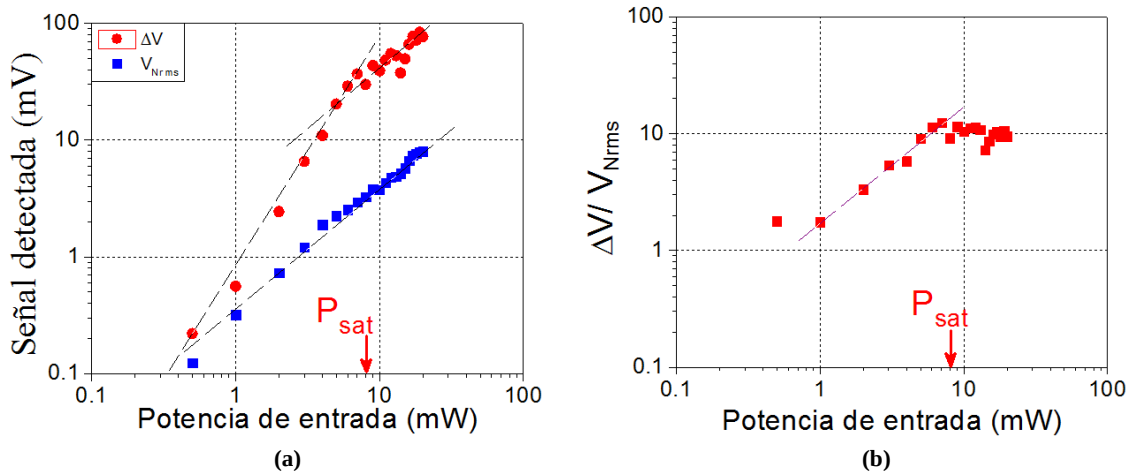


Figura 42. Dependencia entre la amplitud de la señal MDO y el nivel V_{Nrms} del ruido contra la potencia de entrada (a) en la fibra Yb125 ($L = 39$ cm, $P_{in} = 17$ mW, $\gamma \cong 0.05$). La imagen (b) muestra la RSR.

Yb1200 ($\alpha_0 L = 1.6$). Estas mediciones fueron realizadas mediante el arreglo experimental mostrado en la figura 29 con el fotodetector PDA10CS con un ancho de banda de 17 MHz.

La relación entre la RSR en función de la potencia de entrada a la FDY es presentada en la figura 42. Se observa que la amplitud ΔV de la señal de MDO en la imagen 42a crece con la potencia de entrada: cuadráticamente para potencias bajas y linealmente para las altas, al igual que el ruido (evidente por el ruido de intensidad proveniente del láser de Nd:YAG – véase sección 2.4 del capítulo 3). En la figura 42b se aprecia un incremento lineal de la RSR hasta la potencia de saturación de la FDY, donde a potencias mayores a ésta, permanece relativamente constante. Cabe mencionar, que para mejorar la precisión de las mediciones de la amplitud del MDO se usó promediación mediante el osciloscopio.

Modificando la distancia entre el espejo adherido al piezoeléctrico y la FDY - ver figura 30, se obtuvo la dependencia de la RSR como función del factor de acoplamiento γ . Se contempla un incremento lineal del ruido y la amplitud ΔV de la señal de MDO respecto al γ . Como resultado, la relación SNR es prácticamente constante para γ altos. Creemos que a γ pequeños la influencia del ruido del preamplificador y también ruido asociado a la fluorescencia son relevantes. Además, la fibra Yb1200 por tener mayor densidad óptica, posee una RSR casi 10 veces mayor a la fibra Yb125.

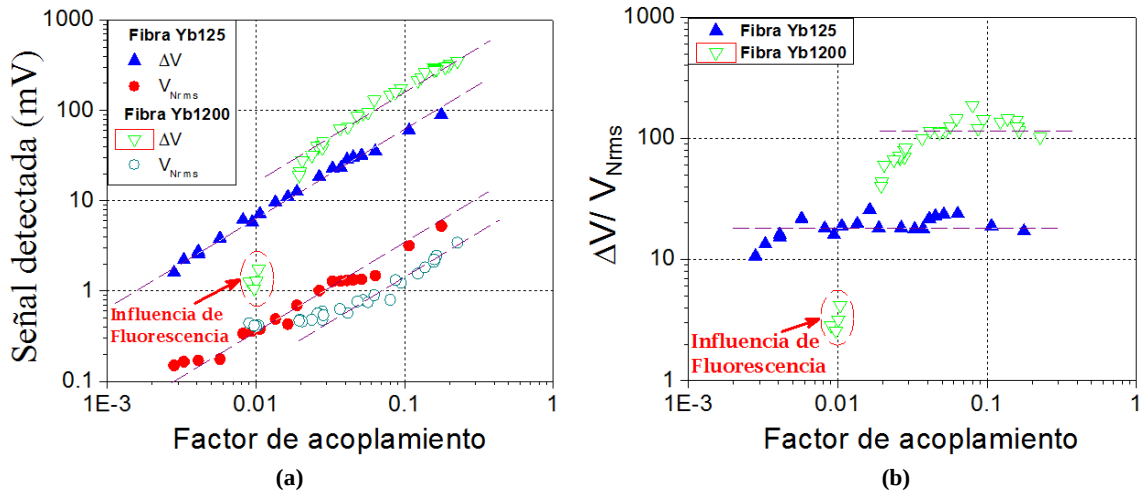


Figura 43. Dependencia de la amplitud de la señal MDO y el nivel V_{Nrms} del ruido contra el factor de acoplamiento (a) en las fibras Yb125 ($L = 39$ cm, $P_{in} = 17$ mW, $\alpha_0 L = 0.76$) e Yb1200 ($L = 300$ cm, $P_{in} = 19$ mW, $\alpha_0 L = 1.6$). La imagen (b) muestra la RSR.

La sensibilidad del sistema interferométrico la podemos definir como el desplazamiento mínimo detectable. El máximo desplazamiento ejercido por el actuador en este trabajo es de 532 nm (modulación de fase a un voltaje aplicado $V_{2\pi}$) correspondiente a la mitad de la longitud de onda del láser de Nd:YAG. En la figura 44a se muestra la relación entre el desplazamiento del piezoeléctrico respecto a la amplitud ΔV de la respuesta del MDO.

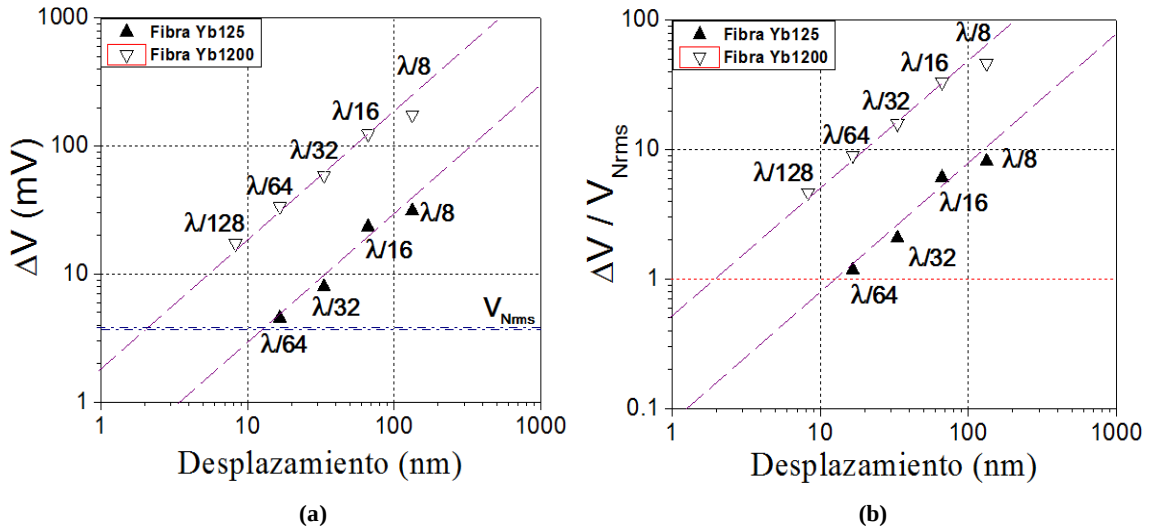


Figura 44. Amplitud de la respuesta del MDO contra el desplazamiento de la superficie de prueba (a) observada con las fibras Yb125 ($L = 39$ cm, $P_{in} = 17$ mW, $\gamma \cong 0.05$) e Yb1200 ($L = 3$ m, $P_{in} = 19$ mW, $\gamma \cong 0.2$) en un ancho de banda de 17 MHz. Dependencias similares para la relación RSR (b).

Se observa un incremento lineal de la respuesta del MDO al aumentar el desplazamiento hasta un cambio de fase de $V_{\pi/2}$ ($\lambda/8 = 133$ nm), donde se observa la máxima RSR de ≈ 8 y 47 para las fibras Yb125 e Yb1200 respectivamente – véase la figura 44b.

Podemos aceptar que la señal del MDO es “detectable” solo cuando $RSR \geq 1$. Para esta definición la amplitud mínima de desplazamiento detectable es $\approx (133\text{nm}/8)/(\pi/2) \approx 10.5$ nm y $\approx (133\text{nm}/47)/(\pi/2) \approx 1.8$ nm para estas dos fibras respectivamente. En las evaluaciones anteriores el factor $\pi/2$ apareció por la no-linealidad en la dependencia sinusoidal mostrada en la figura 36a en el rango de amplitud de modulación de fase de $0 - \pi/2$.

IV.5 Condiciones óptimas del sistema interferométrico

Con el estudio indagado hasta este momento es factible especificar las condiciones óptimas de operación del interferómetro adaptativo. Los parámetros más importantes a considerar son la potencia de entrada, el factor de acoplamiento y el ruido del sistema.

De las dependencias precedentes es claro que la potencia de entrada a la fibra dopada debe estar cercana a la potencia de saturación de cada fibra empleada en el sistema interferométrico. La mayor potencia acoplada intensifica la velocidad de formación de las rejillas dinámicas de población mejorando la capacidad adaptativa del sistema, desarrollando la habilidad de compensar el ruido ocasionado por los cambios ambientales.

Las investigaciones presentadas dicen que la densidad óptica de la fibra puede ser aumentada por lo menos dos veces al valor de fibra Yb1200 sin un sacrificio significativo en la linealidad de repuesta del MDO por la rejilla de fase – ver la grafica 7e. Entonces la densidad óptica $\alpha_0 L$ alrededor de 3 es recomendable.

Por la coherencia alta del láser utilizado y en ausencia práctica del ruido de fase, la longitud física de la fibra dopada no es tan crítica y puede ser de algunos metros. Sin embargo la concentración de contaminante bastante grande (que resulta en la longitud de fibra corta) es recomendable porque en las fibras de longitudes largas se espera un cambio de polarización de luz aleatorio, el cual puede reducir el contraste del patrón de interferencia y la eficiencia de MDO.

En las mediciones se recomienda alcanzar el mayor factor de acoplamiento posible para no tener inconvenientes con la influencia de fluorescencia y el ruido de preamplificador en la señal informativa. Sin embargo, esta recomendación no es realística para los sistemas con aplicación industrial, donde por rugosidad de los objetos reales y las distancias grandes de observación se esperan factores de acoplamiento muy bajas $< 10^{-3}$ (Stepanov *et al.*, 2007).

IV.6 Conclusiones parciales

1. Se caracterizó el mezclado de dos ondas transitorio mediante rejillas dinámicas de población en las fibras dopadas con iterbio con absorción saturable (de diferentes proveedores y distintas concentraciones de iterbio) a una longitud de onda de 1064 nm en la configuración lineal del interferómetro.
2. La contribución de la componente impar (rejilla de fase) en el mezclado de dos ondas resultó ser 20 veces superior a la componente par (rejilla de amplitud) en las fibras utilizadas, que está en concordancia con las investigaciones anteriores (Stepanov *et al.*, 2007). La fuerte aportación de la rejilla de fase trae como consecuencia linealidad de la respuesta del MDO.
3. A potencias de entrada cercanas y/o mayores (hasta 20 mW) a la potencia de saturación se observa la máxima amplitud de la señal de MDO. En las fibras Yb125 e Yb1200 con las densidades ópticas 0.76 y 1.6 se alcanzó una profundidad de modulación del 32 y 65% respectivamente, justificando la relación directamente proporcional entre la máxima señal del MDO y la densidad óptica $\alpha_0 L$ de la fibra dopada (Stepanov y Pérez Cota, 2007).
4. A factores de acoplamiento γ elevados ($3 \times 10^{-2} - 0.3$ en la fibra de mayor dopaje Yb1200 y $3 \times 10^{-3} - 0.3$ en la fibra Yb125) se observó la máxima profundidad de modulación de la señal del MDO. El valor absoluto de la señal del MDO incrementa linealmente con el γ .
5. El tiempo de formación de la rejilla está localizado en el rango de mili-segundos (0.3 - 0.8 ms en nuestros experimentos), disminuyó linealmente con la potencia de entrada y no es influenciado por la amplitud de modulación de la fase.

6. Las propiedades adaptativas del interferómetro también se caracterizaron mediante su función de transferencia: la dependencia de la amplitud de la señal del MDO en función de la frecuencia de modulación de la fase sinusoidal. La posición de la frecuencia de corte en esta dependencia del tipo pasa-alta corresponde con las mediciones del tiempo de formación de la rejilla. Además, la capacidad adaptativa de las rejillas dinámicas incrementa con la intensidad de luz.
7. El desempeño del sistema interferométrico de detección adaptativa se evaluó en términos de la relación señal a ruido logrando que la señal detectada del MDO sea 10 veces mejor al ruido del sistema dominado por el ruido de intensidad del láser en la fibra Yb125 y hasta 100 veces mayor en la fibra Yb1200 (para el ancho de banda de 17 MHz).
8. La máxima sensibilidad del sistema de detección interferométrico se evaluó mediante el desplazamiento mínimo del espejo detectado a aproximadamente 8.5 nm y 1.8 nm para las fibras Yb125 e Yb1200 en un ancho de banda de 17 MHz.

Capítulo V

Detección de señales ultrasónicas reales

V.0.1 Introducción

Con las condiciones óptimas del funcionamiento del sistema interferométrico adaptativo establecidas en el capítulo anterior se detectaron desplazamientos nanométricos simulados por el espejo modulador de fase con pulsos de microsegundos y ondas ultrasónicas propagándose en una placa sólida de aluminio inducidas por un láser de Nd:YAG pulsado Q-switched.

V.1 Detección de señales rápidas

En esta sección se reportan resultados obtenidos con ayuda del arreglo experimental mostrado en la figura 29 por medio del fotodetector PDA10CS con ancho de banda de 17 MHz, sobre la detección de desplazamientos definidos por el modulador piezoeléctrico AE0203D04. El espejo adherido al transductor piezoeléctrico era desplazado por la contracción y expansión del elemento piezoeléctrico producido por las variaciones de voltaje inyectadas mediante el generador de funciones AFG3021.

En la figura 45 se muestran las respuestas del sistema interferométrico adaptativo a las traslaciones $\lambda/8 \approx 133$ nm (cambio de fase $\pi/2$) y $\lambda/32 \approx 33$ nm (cambio de fase $\pi/8$) del espejo aplicando un pulso positivo de 30 μ s – ver figura 45a – y un pulso negativo de 30 μ s – ver figura 45d, al transductor piezoeléctrico. Debido a la linealidad de la respuesta del MDO transitorio por la rejilla de fase fue posible detectar tantos desplazamientos positivos (el espejo propagándose en dirección a la fibra dopada), como negativos (en sentido opuesto) y ser diferenciados.

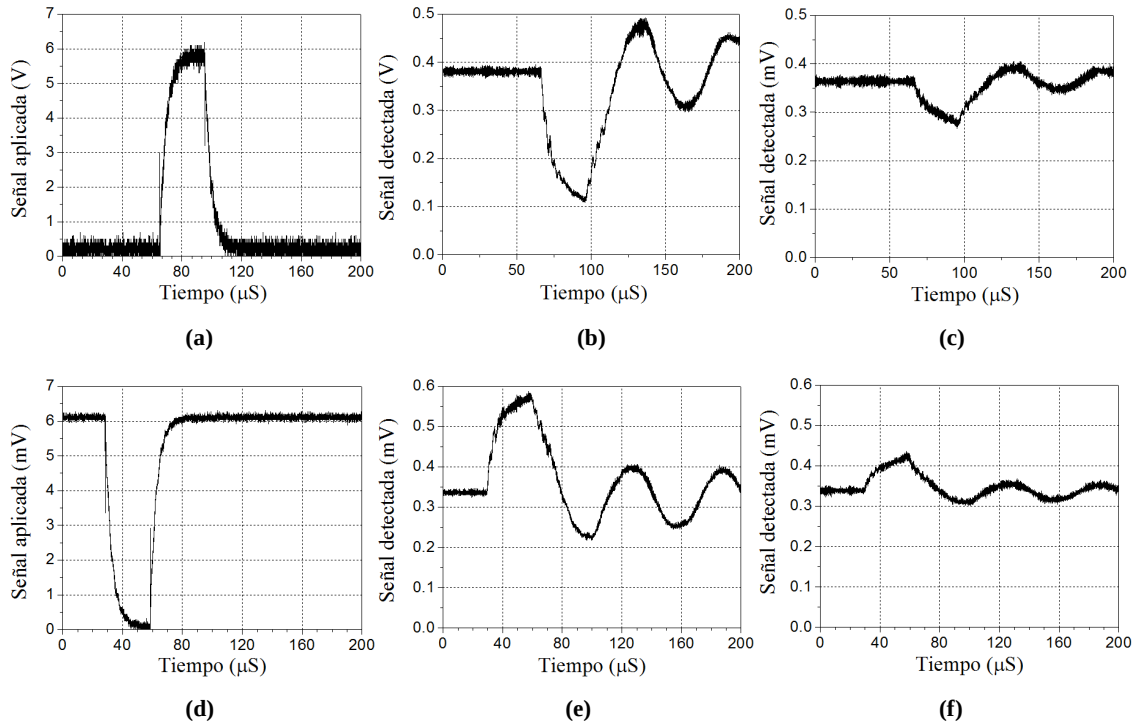


Figura 45. Trazos del osciloscopio observados sin promediación en la fibra Yb1200 ($L = 300$ cm, $P_{in} = 19$ mW, $\gamma \cong 0.2$) al aplicar un pulso positivo (a) y negativo (d) de $30 \mu\text{s}$ desplazando por $\lambda/8$ (b, e) y por $\lambda/32$ (c, f) el espejo.

En la figura presentada, se observan las señales de respuesta a ambos signos opuestos pero con las amplitudes aproximadamente similares. También se observa que la reducción del voltaje de modulación por el factor 4 disminuye la señal de respuesta por un factor parecido. Las distorsiones y oscilaciones visibles en la señal detectada corresponden a la resonancia (frecuencia de oscilación de ~ 16 KHz) del transductor piezoeléctrico empleado en el experimento.

V.2 Detección experimental de señales ultrasónicas

Para la detección experimental de señales ultrasónicas, se utilizó una placa metálica sólida de aluminio medianamente pulida – de dimensiones de $24 \times 10 \times 55$ mm. Se irradió con pulsos del orden de nanosegundos por un láser pulsado Q-switched, generando las ondas ultrasónicas por estrés termoelástico (Scruby y Drain, 1990) propagándose a través de la placa. La fotografía del arreglo experimental del sistema de excitación y de detección de pulsos ultrasónicos es presentada en la figura 46.

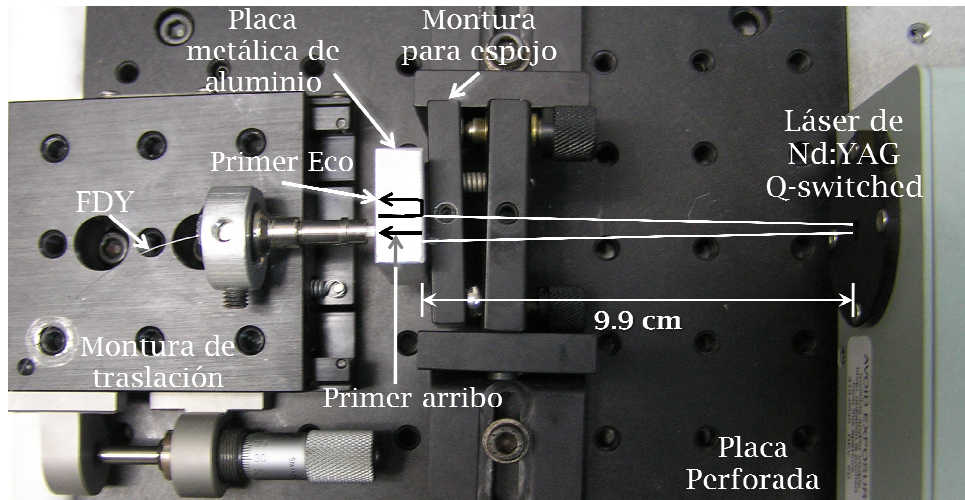


Figura 46. Arreglo experimental del sistema de excitación y detección de pulsos ultrasónicos.

Se empleó un láser de estado sólido de Nd:YAG Q-switched de la compañía Continuum con las siguientes características según los datos del fabricante:

- emite a sólo una frecuencia (longitud de onda de 1064 nm),
- energía por pulso de hasta 50 mJ,
- frecuencia de repetición de 1 a 15 Hz,
- duración de pulsos de 5-7 nseg,
- polarización horizontal,
- diámetro del haz de salida menor a 3 mm con divergencia menor a 3 mrad,
- potencia promedio máxima medida de 800 mW de salida en 15 pulsos por segundo.

El tiempo de propagación (t) de la onda ultrasónica a través de la placa metálica es:

$$t = \frac{d}{v}, \quad (44)$$

donde d es el grosor de la placa metálica (10 mm, en nuestro caso) y v es la velocidad de propagación del ultrasonido en aluminio adquirida de los datos expuestos por la compañía Non Destructive Test Systems (www.ndt-systems.com) presentados en la tabla VI. En los materiales sólidos isotrópicos hay dos modos de propagación ultrasónica: ondas longitudinales (con desplazamientos paralelos a lo largo de la dirección de propagación) y ondas transversales (shear waves, en inglés) con desplazamientos transversales a la dirección de propagación.

Tabla VI. Velocidad longitudinal y transversal ultrasónica en aluminio sólido.

Material	Propiedad acústica	
	Velocidad Ultrasónica	
	Longitudinal	Transversal (shear)
Aluminio	6.23 mm/ μ s	3.1 mm/ μ s

En la figura 47 (trazo en verde) se expone la detección del primer arribo longitudinal “L” y transversal “T” en la onda ultrasónica, así como el primer eco longitudinal E_{1L} y transversal E_{1T} , y el segundo eco longitudinal E_{2L} . Los tiempos de propagación de las señales ultrasónicas correspondientes calculadas para el ancho de la placa de 10 mm y las velocidades de la tabla VI también se muestran en esta figura. El trazo en azul representa un pulso de luz de excitación reflejado por el lado frontal de la placa (opuesto a la detección de ultrasonido) y se emplea para la localización exacta del pulso de excitación del ultrasonido.

Las oscilaciones rápidas que se observan en este trazo (ver también figura 48a), en las señales de ondas ultrasónicas longitudinales (figura 47) pueden ser atribuidos a un pico de resonancia (~ 10 MHz) en el fotodetector PDA10CS empleado en las mediciones.

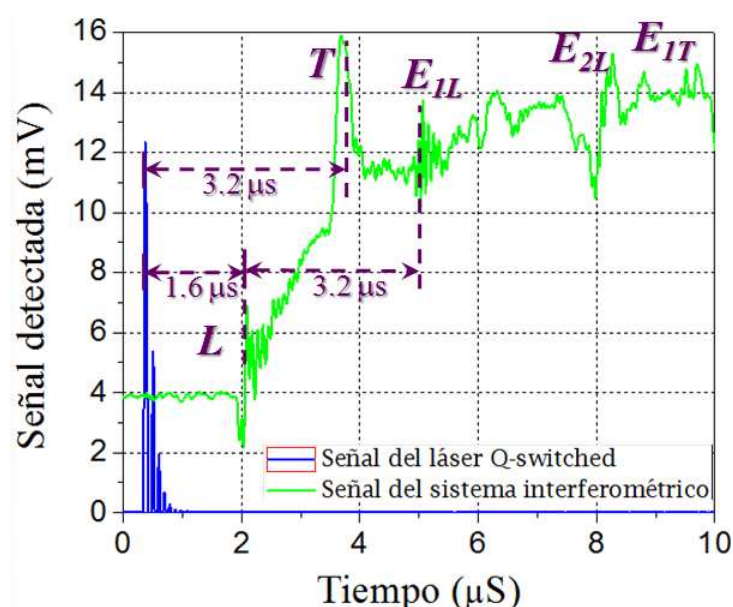


Figura 47. Señales ultrasónicas (en verde) detectadas por el sistema interferométrico adaptativo obtenida en acoplamiento AC con promediación de 512 tramas con la fibra Yb1200 ($\alpha_0 L = 1.4$, $L = 3$ m, $\gamma \sim 0.4$). El pulso emitido por el láser pulsado Q-switched es representado por el trazo en azul.

La respuesta del fotodetector PDA10CS fue verificada aplicando una señal óptica emitida por el láser LIC202B de Thorlabs de onda continua con longitud de onda de 1568 nm, modulando su intensidad sinusoidalmente mediante el modulador electro-óptico MX-LN-10 – de Photoline Technologies en un rango de frecuencias de 10 Hz a 20 MHz. Como se muestra en la figura 48, en realidad hay un pico bastante fuerte alrededor de 10 MHz. La dependencia obtenida también nos da la idea sobre el ancho de banda real del amplificador usado (~ 17 MHz). Pruebas con diferentes fotodetectores de este tipo accesibles en nuestro grupo muestran que este pico resonante es bastante típico del dispositivo.

En conclusión, podemos comentar respecto a la necesidad de promediar demasiados trazos en el osciloscopio para observar claramente las señales ultrasónicas (figura 47) excitadas por el láser Nd:YAG pulsado disponible. En contraste, con la observación de los diminutos desplazamientos con la amplitud controlada producidos por el piezoeléctrico (figura 45) no fue necesario usar ninguna promediación, ya que en realidad, es necesario para aplicaciones industriales. De hecho, la máxima energía de pulsos de este láser es de 50mJ, el cual es por lo menos 10 veces menor a los experimentos similares de detección adaptativa en las placas de aluminio de este grosor (Rodríguez *et al.*, 2009).

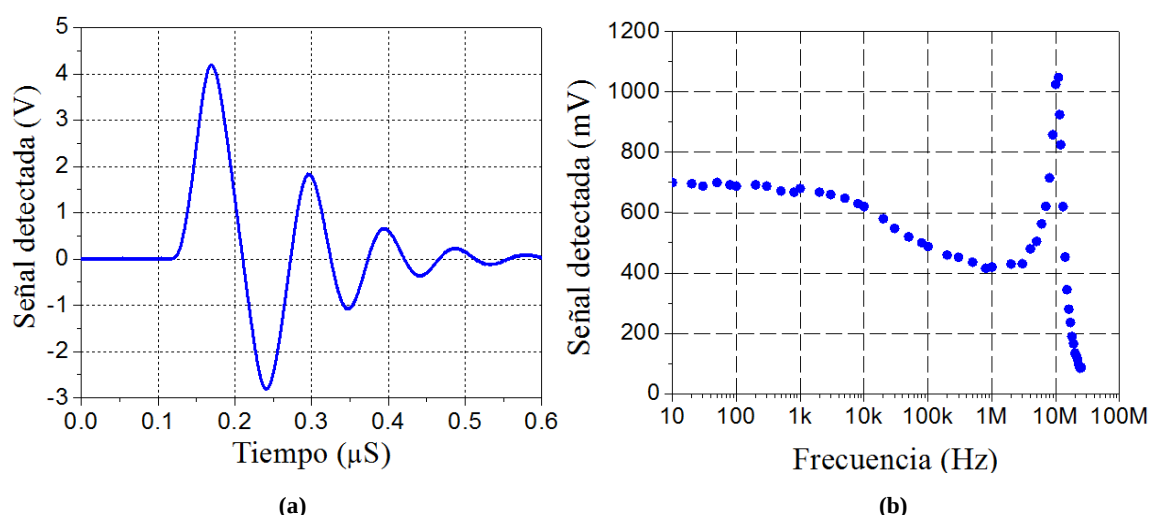


Figura 48. Respuesta del detector PDA10CS a un pulso de 6 ns generado por el láser pulsado (a) y amplitud de la señal sinusoidal detectada por el detector en función de la frecuencia de modulación de intensidad (b).

En realidad, podemos evaluar el desplazamiento promedio del área de la superficie de la placa de aluminio irradiada (diámetro del haz del láser Q-switched de 5 mm) en este experimento por medio de la amplitud de la onda longitudinal ($A_{OL} \sim 3$ mV) y transversal ($A_{OT} \sim 5$ mV) ultrasónica detectada (véase figura 47) aproximadamente como

$$\frac{A_{OL}}{V_{Nrms} \cdot m} \approx \frac{3 \text{ mV}}{(6 \text{ mV}) \cdot (0.5)} \sim 1 \text{ nm}, \quad (45)$$

$$\frac{A_{OT}}{V_{Nrms} \cdot m} \approx \frac{5 \text{ mV}}{(6 \text{ mV}) \cdot (0.5)} \sim 1.6 \text{ nm}, \quad (46)$$

donde V_{Nrms} es el valor efectivo del ruido medido en ausencia de excitación ultrasónica (véase el método presentado en la sección 2.5, capítulo 3) y m es la pendiente de la sensibilidad en la gráfica 44b. Cabe mencionar que el desplazamiento detectado es menor al desplazamiento mínimo detectable (sensibilidad) por nuestro sistema de detección operando sin promediación y fue observado gracias a la promediación de 512 tramas por el osciloscopio mejorando la RSR ~ 22 veces de nuestro sistema de detección.

V.3 Conclusiones parciales

1. Se detectaron desplazamientos pulsados con la amplitud controlada por la superficie de prueba con duraciones de hasta 30 microsegundos limitados por el modulador piezoeléctrico.
2. Se detectaron ondas y ecos ultrasónicos en una placa metálica de aluminio inducidos por un láser pulsado de Nd:YAG con duración y energía de pulsos de 5 nseg y < 50 mJ, respectivamente. Para la observación de las señales fue necesario promediar la señal detectada para mejorar la relación señal a ruido.
3. El fotodetector PDA10CS empleado durante la detección de la respuesta del MDO transitorio en el interferómetro adaptativo muestra un pico de resonancia a alrededor de 10 MHz que claramente distorsionó la forma de las señales ultrasónicas detectadas.

Capítulo VI

Resultados principales y conclusiones del trabajo

1. Se desarrolló un sistema experimental de fibra óptica para la caracterización de las fibras dopadas con iterbio a una longitud de onda de 1064 nm e investigación del mezclado de dos ondas no estacionario mediante rejillas dinámicas de población por absorción saturable de la fibra dopada. El sistema está basado en el láser de onda continua de estado sólido de Nd:YAG de CrystaLaser IRCL-300-1064-S de bajo ruido con potencia de salida máxima de 250 mW y en el modulador de fase piezoeléctrico.
2. Se evaluaron las características principales del láser de Nd:YAG acoplado a un sistema de fibra óptica con eficiencia de 16 %. La longitud de coherencia (hasta 21 m) medida en un interferómetro de Mach-Zender de fibra óptica es suficiente para la observación efectiva del mezclado de dos ondas en las fibras de longitudes de algunos metros. A diferencia de los láseres semiconductores investigados antes, el ruido del láser es dominado por fluctuaciones de intensidad (ruido de intensidad) con la razón señal-a-ruido típica $RSR = 0.35 \text{ Hz}^{-1/2}$ ($RSR \sim 1500$ para el ancho de banda de 20 MHz de interés práctico).
3. Mediante las técnicas de transmitancia óptica no lineal y fluorescencia transitoria se caracterizaron a una longitud de onda de 1064 nm diversas fibras ópticas monomodo dopadas con iterbio: Yb125, Yb118, Yb103 (de Coractive) e Yb1200 (de Liekki) de distintas concentraciones de iterbio, y longitudes 39, 255, 250 y 300 cm, respectivamente. En particular se evaluó: la potencia de saturación $P_{\text{sat}} = 8, 3.5, 2.7$ y 16 mW, el tiempo de relajación del estado meta-estable $\tau_0 = 0.8, 0.78, 0.76$ y 0.75 mS, la densidad óptica $\alpha_0 L = 0.76, 0.22, 0.17$ y 1.6, y la transmitancia por empalme en cada una de las fibras.
4. La respuesta del MDO observada en las FDY a la longitud de onda de 1064 nm tiene un comportamiento lineal originado por la fuerte contribución de la componente

- impar 20 veces superior a la componente par. Se midió la dependencia de la amplitud del MDO como función de la potencia de entrada, el voltaje de modulación de la fase y el factor de acoplamiento del haz reflejado por el transductor piezoeléctrico. Los valores máximos de la señal del MDO (hasta 65 % de amplitud relativa) se observaron a: potencias de entrada cercanas y/o mayores (hasta 20 mW) a la potencia de saturación, a factores de acoplamiento mayores a 0.03 y voltajes de modulación alrededor de $V_{\pi/2}$. La amplitud de la señal del MDO es directamente proporcional a la densidad óptica de las FDY.
5. La velocidad de formación de la rejilla de población fue evaluada directamente de la relajación de la señal del MDO y resultó ser $\tau_g^{-1} \geq 1 \text{ ms}^{-1}$. La capacidad adaptativa del sistema interferométrico demostró estar relacionada con el tiempo de formación de las rejillas. La frecuencia de corte en la función de transferencia del sistema (es decir, la dependencia de la respuesta del MDO contra la frecuencia de la modulación sinusoidal) incrementa directamente con la intensidad de luz en la entrada a la fibra dopada.
 6. La eficiencia del sistema interferométrico se evaluó en términos de la relación de señal a ruido y la sensibilidad mínima detectable al desplazarse el espejo modulador de fase. En el ancho de banda de interés de 20 MHz, la señal del MDO mostró ser al menos de 10 a 100 veces superior al ruido del canal de detección en el sistema interferométrico al investigar las fibras de mayor densidad óptica Yb125 e Yb1200. Se detectaron pulsos de 30 μS simulados por desplazamientos de 30 nm por el espejo modulador de fase.
 7. Se detectó también la señal directa y ecos ultrasónicos en una placa metálica sólida de aluminio inducidos por un láser de Nd:YAG Q-switched con duración y energía de pulsos de 5 nseg y 50 mJ, respectivamente. El sistema interferométrico desarrollado resultó ser estable y adecuado para la aplicación propuesta, sin embargo, debido a la insuficiente energía en los pulsos de excitación, fue necesario promediar las señales detectadas mediante el osciloscopio digital para su observación confiable.
 8. Los resultados de este trabajo se presentaron en la conferencia internacional OSA '09 con publicación de memorias en extenso (Jesús A. Nuñez-Quintero and Serguei

Stepanov, Adaptive interferometer for detection of laser ultrasonic signals using saturable Yb-doped fiber at 1064 nm, JWC42) y están incluidos en el artículo (Serguei Stepanov, Fernando Pérez Cota, Alberto Nuñez Quintero and Ponciano Rodríguez, population gratings in rare-earth doped fibers for adaptive detection of laser induced ultra-sound) enviado a la revista internacional “Journal of Holography and Speckle”.

VI.1 Conclusión general del trabajo

El sistema interferométrico basado en la fibra dopada con iterbio es adecuado para la detección lineal adaptativa de las señales ultrasónicas inducidas por el láser pulsado en el ancho de banda de hasta 20-30 MHz. La sensibilidad del sistema desarrollado está limitado por el ruido de intensidad del láser, pero se espera poder incrementar (al introducir detección balanceada) hasta su nivel fundamental limitada por el ruido de disparo.

VI.2 Trabajo futuro

A continuación se muestran algunas propuestas de investigación a futuro empleando básicamente el sistema adaptativo basado en fibra dopada con iterbio (FDY) iluminada a 1064 nm:

- Desarrollar un sistema de detección balanceada mediante dos fotodiodos para compensar el ruido de intensidad del láser y aumentar de esta manera la sensibilidad de detección, alcanzando la sensibilidad limitada por el ruido fotónico.
- Aplicar bombeo óptico (con 980 nm) a la fibra dopada para aumentar la rapidez de formación de la rejilla dinámica y en general, aumentar la sensibilidad del sistema para detectar vibraciones de objetos lejanos o con superficies de baja reflexión.
- Realizar investigaciones experimentales con fibras FDY multimodales, que pueden permitir trabajar con los objetos con superficies rugosas (los cuales reflejan las ondas con estructura de speckle).

- La configuración investigada puede también ser interesante para aplicaciones interferométricas de frecuencias bajas, por ejemplo, en los sensores hydro-acústicos o sensores de campo magnético.
- Desde el punto de vista fundamental es también interesante investigar la formación de las rejillas de fase en FDY por dos ondas con polarizaciones cruzadas, las cuales se observan por ejemplo en las fibras dopadas con erbio.
- Mezclado de dos ondas por las rejillas dinámicas de fase de eficiencia alta son al igual muy interesantes para las investigaciones de propagación de luz lenta/rápida en las fibras dopadas saturables.

Bibliografía

- Becker P. C., N. A. Olsson y J. R. Simpson. 1999. Erbium-Doped Fiber Amplifiers: Fundamentals and Technology. Academic Press. San Diego. 460 pp.
- Brignon, A. y J. Huignard. 2004. Phase conjugate laser optics. John Wiley and Sons, Inc. Primera edición. New York. 410 pp.
- Collier, R., C. Burckhardt, y L. Lin. 1971. Optical holography. Academic Press. Primera edición. San Diego. 605 pp.
- Derickson, Dennis. 1997. Fiber optic test and measurement. Prentice Hall Professional Technical Reference. Primera edición. New Jersey. 672 pp.
- Dewhurst, R. J. 1990. Optical sensing of ultrasound. Nondestructive Testing and Evaluation, 5(2): 157-169 p.
- Dewhurst, R. J. y Q. Shan. 1999. Optical remote measurement of ultrasound. Meas. Sci. Technol. 10(11): 139-168 p.
- Feuer, M. D. 1998. Length and Power Dependence of Self-Adjusting Optical Fiber Filters. IEEE Phot. Tech. Lett. 10(11): 1587-1589 p.
- Fischer, B., J. L. Zyskind, J. W. Sulhoff y D. J. DiGiovanni. 1993. Nonlinear wave mixing and induced gratings in erbium-doped fiber amplifiers. Electron. Lett. 18(24): 2108-2110 p.
- Frisken, S. 1992. Transient Bragg reflection gratings in erbium-doped fiber amplifiers. Opt. Lett. 17(24): 1776-1778 p.
- Hariharan, P. 2007. Basics of Interferometry. Academic Press. San Diego. Primera edición. 226 pp.
- Hotoleanu, M., P. Kiiveri, S. Tammela, S. Särkilahti, H. Valkonen, M. Rajala y J. Kurki, K. Janka. 2002. Characteristics of highly doped Er^{3+} fiber manufactured by the new Direct Nanoparticle Deposition process. NOC. 200-204 p.
- Horowitz, M., R. Daisy, B. Fischer y J. Zyskind 1994. Narrow-linewidth, single-mode erbium-doped fibre laser with intracavity wave mixing in saturable absorber. Electron. Lett. 30(8): 648-649 p.
- Kersey, D. 1996. A review on recent developments in fiber optic sensor technology. Opt. Fiber Technol. 2(3): 291-317 p.

- Maiman. 1960. Optical and Microwave-Optical Experiments in Ruby. *Phys. Rev. Lett.* 4: 564-566 p.
- Meltz, G., W. W. Morey, and W. H. Glenn. 1989. Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method. *Opt. Lett.* 14(15): 823-825 p.
- Paschotta, R., J. Nilsson, P. R. Barber, J. E. Caplen, A. C. Tropper y D. C. Hanna. 1997. Lifetime quenching in Yb-doped fibers. *Opt. Commun.* 136(5): 375-378.
- Paschotta, R., J. Nilsson, L. Reekie, A. C. Tropper y D. C. Hanna. 1997. Single-frequency ytterbium-doped fiber laser stabilized by spatial hole burning. *Opt. Lett.* 22(1): 41-43 p.
- Pask, H.M. Carman, R.J. Hanna, D.C. Tropper, A.C. Mackechnie, C.J. Barber, P.R. y Dawes J.M. 1995. Ytterbium-doped silica fiber lasers: versatile sources for the 1-1.2 μm region. *IEEE Journal of Quantum Electrs.* 1(1): 2-13 p.
- Pérez Cota, F. 2007. Caracterización de un interferómetro en línea adaptativo basado en el mezclado de dos ondas en fibras dopadas con erbio enfocado a la detección de vibraciones mecánicas. Tesis de maestría, Centro de investigación científica y educación superior de ensenada. Ensenada, Baja California. 81 pp.
- Poole, S. B., D. N. Payne y M. E. Fermann. 1985. Fabrication of low loss optical fibers containing rare earth ions. *Electron. Lett.* 21: 737-738 p.
- Rodríguez Montero P., S. Stepanov, F. Pérez Cota y A. Nuñez Quintero. 2009. Adaptive detection of laser induced ultrasound via two-wave mixing in saturable erbium-doped optical fiber. *Tech. Digest of CLEO'Europa*.
- Saleh, B. E. A. y M. C. Teich. 1991. *Fundamental of photonics*. John Wiley and Sons, Inc. Primera edición. New York. 949 pp.
- Sarpeshkar, R., T. Delbruck, y C. A. Mead. 1993. White noise in MOS transistors and resistors. *IEEE Circuits Devices Mag.* 6: 23-29 p.
- Scruby C. B. y L. E. Drain. 1990. *Laser ultrasonics: techniques and applications*. Adam Hilger, Inc. Primera Edición. England. 447 pp.
- Siegman, A. E. 1986. *Lasers*. University Science Books. Mill Valley. Primera edición. 1283 pp.
- Simpson, J. R. y M. J. F. Digonnet. 2001. *Rare Earth Doped Fiber Fabrication: Techniques and Physical Properties in Rare-Earth-Doped Fiber Lasers and Amplifiers*. Marcel Dekker, Inc. Segunda edición. 777 pp.

- Stepanov. 2008. Dynamic population gratings in rare-earth-doped optical fibers. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 41: 1-23 p.
- Stepanov S., A. A. Fotiadi, and P. Mégret. 2007. Effective recording of dynamic phase gratings in Yb-doped fibers with saturable absorption at 1064 nm. *Optics Express*. 15(14): 8832-8837 p.
- Stepanov, S. y C. Nuñez Santiago. 2006. Intensity dependence of the transient two-wave mixing by population grating in Er-doped fiber. *Optics communication*. 264(1): 105-111 p.
- Stepanov, S. y E. Hernández Hernández. 2007. Phase contribution to dynamics gratings recorded in Er-doped fiber with saturable absorption. *Optics communications*. 271(1): 91-95 p.
- Stepanov, S., E. Hernández, and M. Plata Sanchez. 2004. Two-wave mixing by means of dynamic Bragg gratings recorded by saturation of absorption in erbium-doped fibers. *Opt. Lett.* 29(12): 1327-1329 p.
- Stepanov, S. y F. Pérez Cota. 2007. Transient two-wave mixing in a linear configuration of an adaptive interferometer based on Er-doped fiber with saturable absorption. *Opt. Lett.* 32(17): 2532-2534 p.
- Stepanov, S. y M. Plata. 2004. Efficiency of two-wave mixing via dynamic Bragg gratings in Er-doped optical fibers. *Ukr. J. Phys.* 49(4): 389-399 p.
- Svelto, Orazio. 1998. *Principles of lasers*. Springer Science and Business Media, Inc. Cuarta edición. New York. 604 pp.
- Sze, S. M. y Kwok Kwok, Ng. 2007. *Physics of semiconductor devices*. John Wiley and Sons, Inc. Tercera edición. New York. 815 pp.
- Zhou Meng, Yongming Hu, Shuidong Xiong, George Stewart, Gillian Whitenett and Brian Culshaw. 2005. Phase noise characteristics of a diode-pumped Nd:YAG laser in an unbalanced fiber-optic interferometer. *Applied Optics*. 44(17): 3425-3428 p.