

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



PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS EN ÓPTICA

ESTUDIO DE FOTOSENSIBILIDAD EN FIBRA ÓPTICAS

TESIS

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

Presenta:

NOEMÍ GUZMÁN ROUSSEAU

Ensenada, B. C., a 14 de diciembre de 2006.

RESUMEN de la tesis de **Noemí Guzmán Rousseau**, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRO EN CIENCIAS en ÓPTICA con orientación en opto electrónica. Ensenada, Baja California diciembre de 2006.

ESTUDIO DE FOTONSENSIBILIDAD EN FIBRA ÓPTICAS

Resumen aprobado por:

Dr. Mikhail Chliaguine
Director de Tesis

El desarrollo tecnológico en el área de fotosensibilidad en fibras ópticas (fotosensibilidad definida como un cambio de índice de refracción de fibras ópticas) y la grabación de rejillas de Bragg ha adquirido una gran importancia durante las últimas dos décadas. Hoy en día, las rejillas de Bragg en fibras ópticas están presentes en muchas aplicaciones para sistemas de telecomunicaciones, láseres y sensores basados en fibra óptica. Sin embargo, los mecanismos de fotosensibilidad en fibras ópticas no han sido aclarados completamente, siendo una motivación para la investigación activa de la física de los procesos involucrados en fotosensibilidad de fibras ópticas.

En este trabajo se presenta la investigación experimental de la fotosensibilidad en dos tipos de fibras ópticas, para fibra especial de alta fotosensibilidad y una fibra estándar de telecomunicaciones. Se ha desarrollado un método interferométrico para mediciones de cambio de índice de refracción inducido en el núcleo de la fibra causado por la luz UV pulsada. El método permite realizar mediciones de fotosensibilidad en la etapa inicial de formación de rejillas de Bragg en diferentes regímenes de su grabación. Los resultados obtenidos por esta técnica, y también por un método común para medición de fotosensibilidad, nos permiten concluir que al menos tres mecanismos de fotosensibilidad están involucrados en la formación de rejillas de Bragg en fibras ópticas. Se ha mostrado que en la etapa inicial de grabación de rejillas de Bragg, y con una fluencia por pulso baja, el mecanismo dominante es “la formación de centros de color”. Con una fluencia por pulso más alta el mecanismo dominante es la “compactación de estructura del vidrio”. Se encontró también que al exceder de un nivel umbral de la intensidad, hay un tercer mecanismo que toma un papel muy significativo en el efecto de fotosensibilidad, que resulta en la formación de micro poros en la estructura del vidrio. Este tercer mecanismo puede explicar la dependencia no-monotónica en el desarrollo de la amplitud de rejillas de Bragg tipo IIA, la atenuación adicional de la luz de prueba y cambios en resistencia mecánica de la fibra óptica. En este trabajo observamos por primera vez la formación de rejillas de Bragg tipo IIA en fibra estándar de telecomunicaciones. Se mostró además, que en la etapa inicial de formación de rejillas de Bragg están presentes efectos transitorios de calentamiento de la fibra por la luz UV, que pueden tener un papel importante en la reflectancia y el cambio de índice inducido.

Palabras clave: Rejillas de Bragg, fotosensibilidad, Interferómetro Fabry-Perot.

ABSTRACT of the thesis presented by **Noemí Guzmán Rousseau** as a partial requirement to obtain the MASTER OF SCIENCE degree in OPTICS. Ensenada, Baja California, Mexico. December 2006.

STUDY OF PHOTSENSITIVITY IN OPTICAL FIBERS.

The technological development in the area of photosensitivity in optical fibers (photosensitivity defined as refractive index change in optical fibers) and the recording of Bragg gratings has acquired a great reach of interest during the last two decades. Nowadays, the Bragg gratings in optical fibers are present in many applications for telecommunications systems, lasers and sensors based on optical fibers. Nevertheless, the mechanisms of photosensitivity in optical fibers have not been clarified completely, being a motivation for the active investigation of the physics of the processes involved in photosensitivity of optical fibers.

In this work the experimental investigation of photosensitivity in two types of optical fibers was performed, for special fiber of high photosensitivity and one standard telecommunications fiber. An interferometric method for measurements of optically induced refractive index change in the core of the fiber by intense UV light has been developed. The method allows to carry out measurements of photosensitivity in the initial stage of Bragg grating formation at different regimes of its recording. The results obtained by this technique and also by a common method for measurement of photosensitivity in optical fibers allow us to conclude, that at least three mechanisms of photosensitivity are involved in the formation of fiber Bragg gratings. At the initial stage of the fiber Bragg recording at low pulse fluence, the dominant mechanism was found to be the so called "Color Center formation". When a higher pulse fluence is applied and also a higher accumulated fluence "compaction of the glass structure" plays a more important role. We also found, that when exceeding a threshold level of the intensity, a third mechanism takes part significantly in the photosensitivity, such a mechanism which is a formation of micro pores in the glass structure. This third mechanism can explain an observed non-monotonic dependency with pulse fluence in the development of reflectivity of Bragg gratings type IIA, and the additional attenuation of the probe light, and the changes in the mechanical resistance of the optical fiber. In this work we observed for the first time the formation of type IIA fiber Bragg gratings in a standard telecommunication fiber. We also showed, that at the initial stage of the Bragg gratings there are transitory effects of heating of the fiber by light UV that can influence the Bragg grating formation significantly under a high UV fluence per pulse.

Keywords: Fiber Bragg gratings, Photosensitivity, Fabry-Perot Interferometer.

CONTENIDO

CAPÍTULO I	INTRODUCCIÓN	Página
INTRODUCCIÓN	1
<i>I.1 Objetivo</i>	4
<i>I.2 Contenido de la Tesis</i>	4
CAPÍTULO II.	REJILLAS DE BRAGG	6
<i>II.1 Introducción</i>	6
<i>II.2 Rejillas de Bragg</i>	6
<i>II.2.1 Características de una rejilla de Bragg</i>	9
<i>II.3 Sensores basados en Rejillas de Bragg</i>	11
<i>II.3.1 Sensores locales o puntuales</i>	12
<i>II.3.2 Sensores distribuidos</i>	12
<i>II.3.3 Sensores cuasi-distribuidos</i>	13
<i>II.3.4. Aplicaciones</i>	14
<i>II.4 Métodos de medición de fotosensibilidad en fibras ópticas</i>	15
<i>II.5 Tipos de Fotosensibilidad en fibra ópticas</i>	19
<i>II.6 Mecanismos relacionados con fotosensibilidad en fibras ópticas</i>	22
<i>II.6.1 Defectos en fibras de Ge/Si</i>	22
<i>II.6.2. Centros de color</i>	26
<i>II.6.3 Relajación de esfuerzos</i>	28
<i>II.6.4 Compactación/Densificación</i>	30
CAPÍTULO III.	INTERFERÓMETRO DE FABRY-PEROT BASADO EN REJILLAS DE BRAGG.	35
<i>III.2- Transformada de Fourier de espectro de reflexión de interferómetro F-P basado en Rejillas de Bragg</i>	38
<i>III.3 Relación de Transformada de Fourier de espectro de reflexión de interferómetro F-P cambio de índice inducido por irradiación UV</i>	39
<i>III.4 Medición de fotosensibilidad utilizando interferómetro F-P</i>	42
<i>III.4.1 Características de dispositivos utilizados en arreglo experimental</i>	42
<i>III.4.2 Estabilidad del arreglo experimental</i>	46
<i>III.4.3 Descripción de adquisición y procesamiento de mediciones</i>	50

Contenido (Continuación)	Página
CAPÍTULO IV RESULTADOS.....	55
<i>IV.1 Fotosensibilidad medida en fibra SMF-28 bajo diferentes dosis de irradiación UV.....</i>	<i>55</i>
<i>IV.1.1 Fotosensibilidad medida bajo dosis de irradiación baja</i>	<i>55</i>
<i>IV.1.2 Fotosensibilidad medida bajo dosis de irradiación intermedia</i>	<i>62</i>
<i>IV.1.3 Fotosensibilidad medida bajo dosis de irradiación alta</i>	<i>64</i>
<i>IV.2 Fotosensibilidad medida en fibra óptica fotosensible de Fibercore utilizando método interferométrico Fabry-Perot de RBG.....</i>	<i>69</i>
<i>IV.3 Dependencias de reflectancias de Rejillas de Bragg en fibra óptica SMF-28 de Corning bajo diferentes dosis de irradiación UV.....</i>	<i>76</i>
<i>IV.4 Observación de efecto de atenuación en fibra SMF-28 con diferentes dosis de irradiación.</i>	<i>79</i>
<i>IV.4 Observación de efecto de birrefringencia inducida dentro interferómetro Fabry-Perot bajo irradiación UV</i>	<i>79</i>
<i>IV.6 Observación de efectos térmicos (Transitorios) en fibra fotosensible de Fibercore.....</i>	<i>85</i>
CAPÍTULO V DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO.....	89
<i>V.1 Discusión de resultados.....</i>	<i>89</i>
<i>V.2 Conclusiones</i>	<i>100</i>
<i>V.3 Trabajo a futuro</i>	<i>101</i>
<i>Bibliografía</i>	<i>102</i>

Lista de Figuras

	Página	
1	Comportamiento de una rejilla de Bragg.	7
2	Reflexiones de Bragg.	8
3	Modulación del índice de refracción y cambio de índice promedio de una rejilla de Bragg tipo uniforme.	9
4	Espectro de reflexión de una rejilla de Bragg a $\lambda_{\text{Bragg}}=1534.2 \text{ nm}$.	11
5	Configuración de sensor local.	12
6	Configuración de sensor distribuido.	13
7	Configuración de sensor cuasi distribuido.	13
8	Arreglo experimental de interferómetro de Michelson para medición de fotosensibilidad en fibras ópticas	16
9	Interferómetro Mach Zender utilizado para medir la fotosensibilidad en fibras ópticas.	17
10	Arreglo con interferómetro Fabry-Perot utilizado para medir fotosensibilidad en fibras ópticas.	18
11	Defectos de enlace débil y en material inhomogéneo de la red vítrea.	23
12	Enlace roto de defecto de Ge por la aplicación de un fotón con energía $E=h\nu$.	25
13	Centros de color Ge(1) y Ge(2).	26
14	Cavidad Fabry-Perot formada por dos Rejillas de Bragg.	35
15	Espectro de reflexión de interferómetro Fabry-Perot formado por dos Rejillas de Bragg de baja reflectividad.	37
16	Arreglo utilizado para medir cambio de índice de refracción en fibras ópticas.	40
17	Arreglo experimental utilizado para medir cambio de índice de refracción en fibra ópticas.	42
18	Esquema de fuente de amplio espectro basado en fibra dopada con Erblio.	44
19	Espectro de reflexión de una RBG utilizando arreglo descrito en sección III.4.1.	45
20	Espectro de reflexión de interferómetro Fabry-Perot formado por dos RBG de baja reflectividad.	45
21	Representación de los promedios de 11 espectros adquiridos por el analizador de espectros ópticos.	47
22	Interferómetro de 9 mm con desplazamiento de espectros.	48
23	Estabilidad del sistema (corrimiento de índice durante 1.5 Hrs.).	49
24	Arreglo experimental utilizado para determinar la estabilidad del láser UV.	50
25	Espectros promedios de interferómetro # 4 irradiados con diferente número de pulsos UV.	52
26	Módulo al cuadrado de la T.F de los espectros correspondiente a 0,15, 50 y 100 pulsos UV.	53

Lista de Figuras (Continuación)

	Página	
27	Módulo al cuadrado de la transformada de Fourier de uno de los espectros promedios.	53
28	Cambio de fase de espectros con irradiación UV.	54
29	Cambio de índice inducido por 0, 15, 50 y 100 pulsos UV.	54
30	Espectro de reflexión de interferómetro Fabry Perot (F-P)#1.	55
31	Interferómetro #1 a) Espectros promedios irradiados con diferente número de pulsos UV, b) Cambio de fase, c) Cambio de índice de refracción inducido.	57
32	Interferómetro #2 a) Espectros irradiados con diferente número de pulsos UV, b) Cambio de fase, c) Cambio de índice de refracción inducido.	59
33	Interferómetro #3 a) Espectros promedios irradiados con diferente número de pulsos UV, b) Cambio de fase, c) Cambio de índice de refracción inducido.	60
34	Interferómetro #4 a) Espectros promedios irradiados con diferente número de pulsos UV.	61
35	Interferómetro #4 b) Cambio de fase, c) Cambio de índice de refracción inducido.	62
36	Interferómetro #5 a) Espectros promedios irradiados con diferente número de pulsos UV, b) Cambio de fase, c) Cambio de índice de refracción inducido.	64
37	Interferómetro #6 a) Espectros irradiados con diferente número de pulsos UV.	65
38	Interferómetro #6 b) Cambio de fase, c) Cambio de índice de refracción.	66
39	Interferómetro #7 a) Espectros irradiados con 1, 5 y 10 pulsos UV. b) Espectros irradiados con 50, 80 y 200 pulsos UV.	69
40	Interferómetro #7 b) Cambio de fase, c) Cambio de índice de refracción inducido por pulsos UV.	70
41	Interferómetro #8 a) Espectros irradiados con 1, 5 y 10 pulsos UV. b) Espectros irradiados con 20, 60 y 200 pulsos UV.	71
42	Interferómetro #8 c) Cambio de fase, d) Cambio de índice de refracción inducido por pulsos UV.	72
43	Espectro de reflectancia de una rejilla de Bragg grabada en fibra SMF-28.	75
44	Dependencias de reflectancia de diferentes RBG utilizando el régimen de grabación de pulso por pulso.	77
45	Dependencias de reflectancia de diferentes RBG utilizando el régimen de adquisición de espectros cada 10 s.	77
46	Arreglo experimental utilizado para observar el efecto de atenuación inducida en fibra SMF-28 utilizando diferentes niveles de fluencia por pulso.	78

Lista de Figuras (Continuación)

	Página	
47	Resultados del efecto de atenuación inducida por diferentes dosis de irradiación.	79
48	Arreglo experimental utilizado para observar el efecto de cambio de polarización en fibra óptica.	81
49	a) Polarización lineal sin irradiación UV. b) Después de irradiación y de apagar el láser UV.	82
50	a) Polarización circular sin irradiación UV b) Después de irradiación y de apagar el láser UV.	83
51	Arreglo experimental utilizado para observar el cambio de temperatura en fibra fotosensible.	85
52	Respuesta de cambio de temperatura en fibra fotosensible FiberCore, a) Fluencia por pulso UV $F_p = 0.4 \text{ J/cm}^2$ y b) fluencia por pulso UV 0.66 J/cm^2 .	86
53	Distribución de intensidad de irradiación ultravioleta sobre núcleo de la fibra para método interferométrico y grabación de RBG.	88
54	Comportamiento de reflectancia de diferentes RBG bajo diferentes dosis de irradiación utilizando la adquisición de espectros cada 2 minutos.	90
55	Comportamiento de reflectancia de RBG bajo diferentes dosis de irradiación utilizando régimen de adquisición de espectros cada 10 s.	90
56	Espectros irradiados con 500 y 8000 pulsos de interferómetro #3 son compensados por factores de 1.37 y 2.06 respectivamente.	94
57	Espectros de interferómetro # 7 impreso en fibra fotosensible compensados con factores de 1.35 y 1.40.	94
58	Cambios de reflectancia por efectos transitorios de temperatura observados en la grabación de una RBG a niveles altos de fluencia por pulso.	98

INTRODUCCIÓN

El descubrimiento de fotosensibilidad en fibras ópticas en 1978, tiene una gran importancia para aplicaciones en el área de telecomunicaciones ópticas y sensores. El efecto de fotosensibilidad en fibras ópticas (en otras palabras un cambio de índice de refracción permanente de la fibra bajo influencia de luz) fue descubierto en forma de Rejillas de Bragg (RBG) grabadas en el núcleo de la fibra óptica. Estas rejillas tienen propiedades ópticas muy interesantes para diferentes aplicaciones y pueden servir como filtros ópticos [Legoubin et al 1995], como base para componentes de telecomunicación por fibra óptica [Kersey et al 1997], y también en el área de sensores de temperatura o esfuerzo [Othonos y Kalli, 1999], ente otros.

En 1978 se demostró la formación de una rejilla permanente en una fibra óptica por Hill en el Canadian Communication Research Center, Ottawa, Canada [Hill et al, 1978]. El experimento consistió en enviar luz intensa de un láser de Argón a $\lambda = 488 \text{ nm}$ a través de una fibra monomodo dopada con alta concentración de germanio. El efecto observado en este experimento fue que a mayor tiempo transcurrido hubo una disminución en la transmitancia y al mismo tiempo un incremento en la reflectancia de la fibra. Este efecto fue explicado como la grabación de una rejilla de Bragg por exposición del núcleo de la fibra por un patrón de interferencia estacionario formado por dos haces de luz, uno transmitido y otro reflejado de la punta clivada de la fibra óptica. Los investigadores reportaron que el ancho espectral de reflectancia era muy angosto y que esta rejilla podría servir como un filtro óptico. Al mismo tiempo la longitud de onda de resonancia es dependiente de la temperatura y del esfuerzo aplicado a la fibra, por lo cual podría tener

aplicaciones en el área de sensores. Desafortunadamente, la longitud de onda de reflectancia de RBG formadas en estos experimentos coincide con la longitud de onda de grabación $\lambda=488 \text{ nm}$, la cual está muy separada de la ventana espectral de telecomunicaciones. Por eso estas rejillas no fueron interesantes para aplicaciones en telecomunicaciones.

Diez años después se descubrió un método de grabación de RBG utilizando un esquema transversal de iluminación de la fibra a través de un patrón de interferencia de dos haces de luz ultravioleta a $\lambda=244 \text{ nm}$ [Meltz et al. 1989]. Este método resultó ser muy práctico porque las fibras tienen una sensibilidad 10^4 veces más alta a luz UV y es posible reducir considerablemente el tiempo de exposición. La RBG puede ser grabada con cualquier longitud de onda de resonancia en el intervalo entre el visible y el infrarrojo, lo que permite abrir numerosas aplicaciones en el área de las telecomunicaciones.

Este gran potencial en aplicaciones estimuló un gran interés en el desarrollo tecnológico, ya que actualmente existen avances en el desarrollo de diferentes fibras especiales de alta fotosensibilidad, y también en equipo de grabación como láseres UV especiales, en equipo de monitoreo tales como analizadores de espectros ópticos y herramientas como las máscaras de fase.

También apareció un gran interés en la investigación de los procesos físicos involucrados en el efecto de fotosensibilidad en fibras y materiales. Actualmente existen muchas publicaciones que presentan numerosos datos experimentales y teóricos sobre la fotosensibilidad en fibras ópticas. Se han reportado muchos efectos y dependencia de muchos parámetros de fabricación de fibras y RBG, condiciones de grabación, entre otros,

que hacen difícil el entendimiento de la fotosensibilidad. Se han observado cuatro diferentes tipos de fotosensibilidad en fibras ópticas.

A la fecha se han publicado más de diez modelos o mecanismos propuestos de fotosensibilidad, como son: formación de centros de color, densificación, relajación de esfuerzos, migración de iones, efecto Soret, efecto Kerr (Electro-striction), entre otros.

Los modelos de formación de centros de color y densificación son los más aceptados en la comunidad científica para explicar la formación de rejillas tipo I. Sin embargo, no hay claridad entre las condiciones de que en la grabación de las RBG, exista un modelo predominante. También hay otros tipos de rejillas como la rejilla tipo IIA que no puede ser explicada por los modelos existentes.

Existen diferentes aplicaciones que requieren de distintos tipos de rejillas, como en telecomunicaciones donde se necesitan de RBG de alta reflectancia, así como también en las aplicaciones de sensores donde se necesitan esquemas de RBG con alta reflectancia y alta resistencia térmica como las rejillas tipo IIA [Othonos y Kalli, 1999]. Para otros esquemas como sensores distribuidos se necesitan un gran número de rejillas de baja reflectancia grabadas en fibra de bajas pérdidas, como en las fibras estándar para telecomunicaciones [Shlyagin et al 2003].

Sin embargo, hay publicaciones que no presentan datos suficientes para optimizar la grabación de RBG en fibras estándar, especialmente en la etapa inicial de grabación, pero esta información es importante para optimizar la fabricación de sensores distribuidos prácticos basados en las RBG. En este trabajo se investigó la grabación de RBG y efectos de fotosensibilidad en diferentes regímenes para dos tipos de fibras, con especial interés en las etapas iniciales de irradiación y grabación [Shlyagin, et al. 2003].

1.1 Objetivo

El objetivo de este trabajo es el estudio experimental de mecanismos de fotosensibilidad en fibras ópticas, así como el desarrollo de un método de medición y optimización del régimen de grabación de rejillas de Bragg de reflectividad ultra baja para sensores de fibra óptica cuasi-distribuidos.

1.2 Contenido de la Tesis

En el Capítulo II, se presentan las características principales de una rejilla de Bragg de tipo uniforme, los tipos de RBG de acuerdo a la fotosensibilidad que exhiben, así como las diferentes aplicaciones en sensores basados en RBG. Se presentan también, diferentes métodos interferométricos de medición para determinar la fotosensibilidad y los mecanismos principales que intervienen en la formación de RBG.

En el Capítulo III, se presentan las características principales del interferómetro Fabry-Perot basado en RBG y la técnica interferométrica utilizada para medir el cambio de índice de refracción en fibra óptica a partir de un cambio de fase utilizando el espectro de reflexión del interferómetro de Fabry-Perot, así como su transformada de Fourier. También se describen las características de los dispositivos utilizados en el arreglo experimental, así como la adquisición y procesamiento de las mediciones.

En el Capítulo IV, se presentan los resultados obtenidos para la medición de fotosensibilidad utilizando la técnica de medición interferométrica para fibras ópticas SMF-28 y en la fibra especial fotosensible de Fibercore, así como también se presentan comportamientos diferentes de reflectancia en función de diferentes dosis de irradiación en fibras ópticas SMF-28. Además son presentados los resultados experimentales de diferentes

efectos como atenuación, cambio de polarización y observación de cambio de temperatura en la fibra óptica.

En el Capítulo V, se presenta una discusión de los resultados experimentales obtenidos y las conclusiones generales de acuerdo con los objetivos de este trabajo de tesis, así como también es importante destacar que se derivaron temas de investigación interesantes presentados como trabajo a futuro.

Capítulo II. Rejillas de Bragg

II.1 Introducción

En este capítulo se presentan las características principales de las rejillas de Bragg y la clasificación de acuerdo al comportamiento de cambio de índice o fotosensibilidad que muestran. También se presentan los diferentes mecanismos involucrados con el cambio de índice de la fibra cuando es expuesta a irradiación UV.

Se presentan además algunos métodos interferométricos utilizados para medir la fotosensibilidad en fibras ópticas; así como algunas configuraciones espaciales de sensores basados en RBG, debido a que es posible tener más de una sola rejilla en una sola fibra.

II.2 Rejillas de Bragg

Una rejilla de Bragg puede representarse como una estructura multi-capa con valores diferentes de índice de refracción en cada una de las capas o como una estructura en forma de modulación periódica del índice de refracción, en este caso, impreso en el núcleo de una fibra óptica. Esta modulación de índice de refracción es generada por una exposición del núcleo de la fibra a un patrón de interferencia de luz de cierta intensidad. El paso del haz UV modifica localmente el índice de refracción de la fibra óptica. Cada una de las zonas, o planos de índice modificado actúan como un espejo, que se caracteriza por tener un coeficiente de transmisión muy alto, por lo que reflejan muy poca luz. La separación de cada uno de estos planos tiene un espaciamiento constante llamado periodo de rejilla, expresado por Λ , como se muestra en la figura 1.

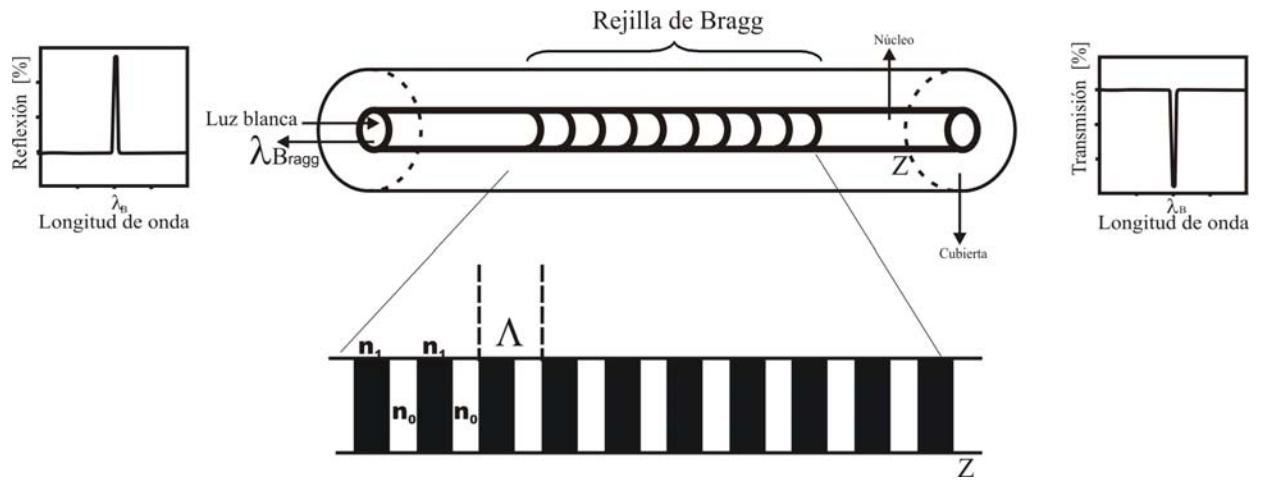


Figura 1. Comportamiento de una rejilla de Bragg.

Cuando la luz es propagada por el núcleo de la fibra pasa por las modulaciones de índice de refracción encontrándose con regiones de valores altos y bajos de índice de refracción y además, si la periodicidad Λ es tal que la suma de todas las reflexiones en cada región o plano se suman coherentemente, es decir se encuentran en fase, entonces la RBG puede tener una reflectancia de 100%.

La luz propagada a través de la rejilla es esparcida en cada plano de la rejilla de tal forma, que la longitud de onda que se propaga a través de ella es del doble del espaciamiento físico de la rejilla. Lo anterior es conocido como condición de Bragg y es expresada en la ecuación (1):

$$\lambda_B = 2n_{eff} \Lambda, \quad (1)$$

donde λ_B es la longitud de onda de Bragg, ésta es la longitud de onda en el espacio libre central del espectro de la rejilla y n_{eff} es el índice de refracción efectivo del núcleo de la fibra óptica a la λ_B .

La condición de Bragg es un requisito importante para que una rejilla de Bragg tenga una alta reflectancia. Lo anterior se cumple para determinadas longitudes de onda, para cualquier otra longitud de onda las reflexiones que no se encuentren en fase se cancelarán unas con otras resultando con valores altos de transmisión, como es mostrado en la figura 2.

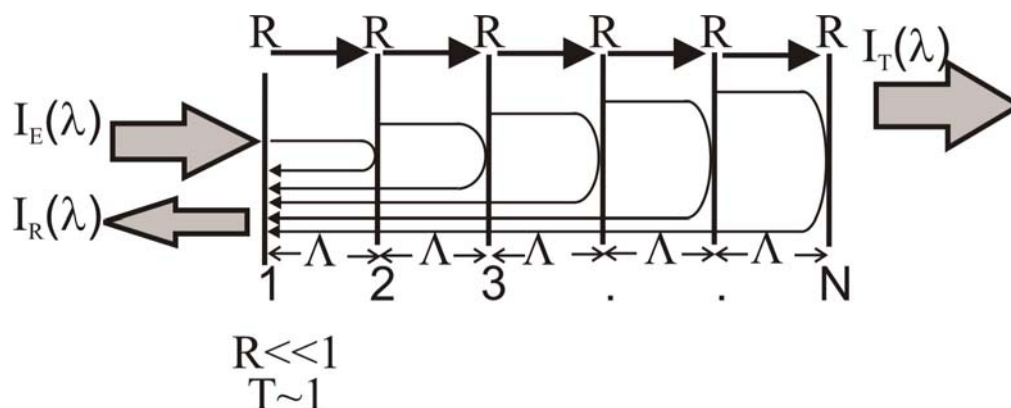


Figura 2. Reflexiones de Bragg.

El efecto de modulación del índice de refracción en fibras ópticas se puede realizar con diferentes tipos de fuentes de luz, pulsada o de onda continua y ha sido interpretado como un efecto de fotosensibilidad en las fibras debido a la exposición a luz intensa. Las variaciones en el índice de refracción obtenidas típicamente con esta técnica son del orden

de 10^{-5} a 10^{-3} [Othonos, 1999]. En general el cambio de índice de refracción en una fibra depende de muchos factores como son: la longitud de onda a la cual las rejillas son grabadas, la intensidad del haz de irradiación, la fluencia por pulso y la fluencia acumulada, así como también de la composición de la fibra o el tratamiento utilizado para aumentar la fotosensibilidad en la fibra.

II.2.1 Características de una rejilla de Bragg.

Las rejillas de Bragg se caracterizan porque sus espectros de reflexión y transmisión son complementarios, es decir tienen su máxima reflectancia y transmitancia en λ_B . En la figura 3 se muestra el índice de refracción modulado Δn_{mod} de una rejilla de Bragg que corresponde al índice de refracción promedio en el núcleo de la fibra, que es representado por n_0 y en los planos de la rejilla existe un incremento en el índice de refracción representado por n_1 .

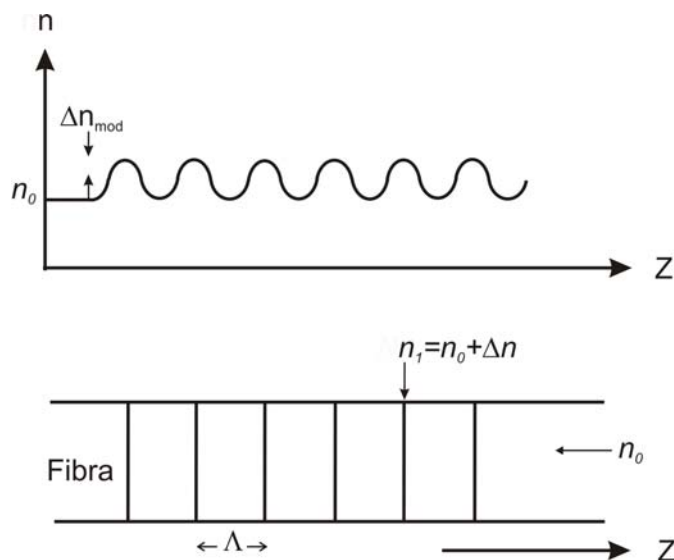


Figura 3. Modulación del índice de refracción y cambio de índice promedio de una rejilla de Bragg tipo uniforme.

Las propiedades de reflexión de una Rejilla de Bragg están descritas por la teoría de modos acoplados [Lam y Garside, 1981], donde la reflectividad de una rejilla con periodo y modulación de amplitud constante es $R(l, \lambda)$, y está dada por la siguiente ecuación:

$$R(l, \lambda) = \frac{\Omega^2 \sinh^2(sl)}{\Delta k^2 \sinh^2(sl) + s^2 \cosh^2(sl)}, \quad (2)$$

donde $R(l, \lambda)$ es la reflectividad, que es función de la longitud de la rejilla l y de la longitud de onda λ , Ω es el coeficiente de acoplamiento, el cual para un perfil senoidal, está expresado en la siguiente ecuación:

$$\Omega = \frac{\pi \Delta n M_p}{\lambda}, \quad (3)$$

donde Δn es la amplitud de la perturbación del índice de refracción, los valores típicos son 10^{-5} . M_p es el coeficiente que representa qué proporción de energía está dentro del núcleo de la fibra. Para el caso de una fibra monomodo M_p se puede considerar que toda la energía está dentro del núcleo de la fibra, por lo tanto el coeficiente $M_p = 1$.

El vector de onda de desintonización Δk está definido por $\Delta k = k - \pi / \Lambda$, $k = 2\pi n_0 / \lambda$ es la constante de propagación y $s^2 = \Omega^2 - \Delta k^2$, a la longitud de onda de Bragg $\Delta k = 0$, por lo que la ecuación (2) de reflectividad de una rejilla de Bragg se simplifica en la siguiente ecuación:

$$R_{\lambda_b} = \tanh^2(\Omega l). \quad (4)$$

En la Figura 4 es mostrado el espectro de reflexión simulado para una rejilla de Bragg evaluando la expresión (2) de longitud $l = 8 \text{ mm}$, $\Delta n = 1 \times 10^{-5}$, un periodo

$\Lambda=0.547\mu m$, para la fibra son propuestos los siguientes parámetros: índices de refracción de núcleo $n_{co} = 1.456$ y de la cubierta $n_{cl} = 1.447$, $n_{eff} = 1.45$ y un radio del núcleo de la fibra $a=5\mu m$. Con estos parámetros se obtiene la longitud de onda de Bragg del espectro de reflexión en 1534.2 nm ; evaluándolos en la ecuación (1).

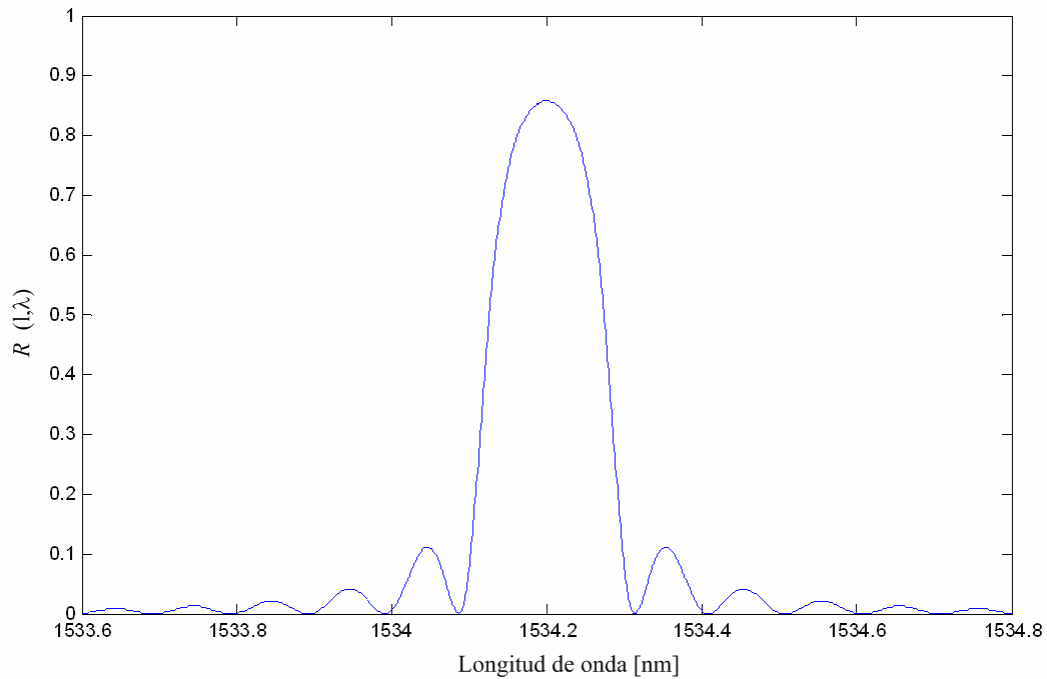


Figura 4. Espectro de reflexión de una rejilla de Bragg con $\lambda_B = 1534.2\text{nm}$.

II.3 Sensores basados en Rejillas de Bragg.

La fibra óptica en sí es un sensor, pero si la fibra es utilizada para sensores basados en RBG, ésta logra un alcance superior en el área de sensores. Existen muchos tipos de rejillas de Bragg, entre las más comunes están las RBG tipo uniforme, es decir que el espaciamiento físico Λ es igual entre cada reflector de la rejilla, como la mostrada en la figura 1. Estas rejillas son caracterizadas por ser excelentes elementos sensores para la

temperatura y el esfuerzo, y son clasificados como sensores intrínsecos, debido a que la longitud de onda de Bragg es modificada por efectos termo-ópticos y elasto-ópticos, respectivamente. Así que dependiendo de diferentes parámetros físicos como la longitud o la magnitud del cambio de índice, las RBG pueden actuar en diferentes configuraciones, desde un sensor o filtro para una longitud de onda específica hasta un espejo de banda ancha. También pueden ser combinadas con otras rejillas para trabajar como filtros pasa-bandas. Dependiendo también de la distribución espacial de las RBG, los sensores se pueden clasificar en como:

II.3.1 Sensores locales o puntuales

Este tipo de sensores son los que se encuentran localizados en un sólo lugar de la fibra óptica, como se muestra en la figura 5 y en algunas aplicaciones pueden ser utilizados para determinar la temperatura y el esfuerzo, como se mencionó anteriormente.

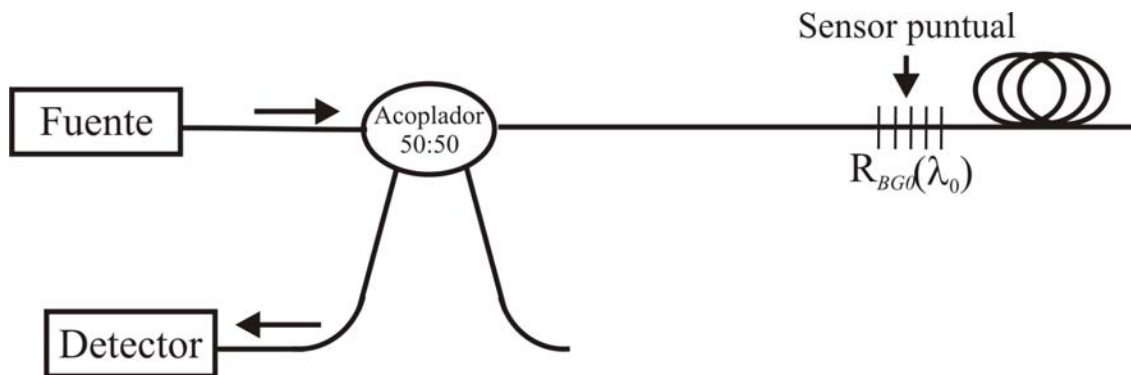


Figura 5. Configuración de sensor local o puntual.

II.3.2 Sensores distribuidos

Los sensores distribuidos se caracterizan principalmente por que la medición de una variable física se realiza a lo largo de toda la fibra óptica de manera continua, como se muestra en la figura 6.

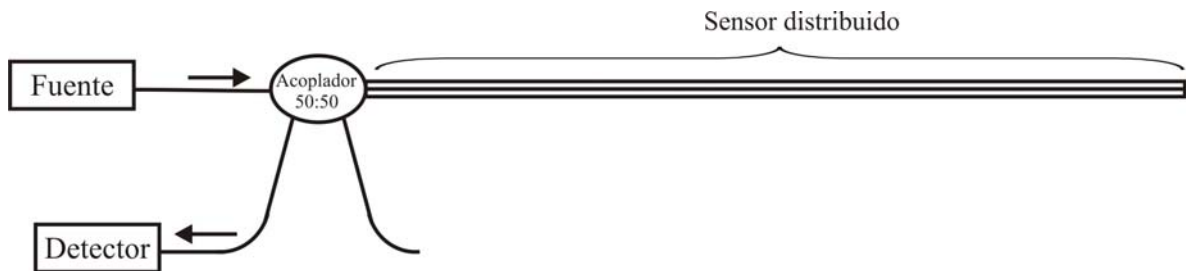


Figura 6. Configuración de sensor distribuido.

II.3.3 Sensores cuasi-distribuidos

En los sensores cuasi-distribuidos, la medición es realizada en posiciones discretas a lo largo de la fibra, como se muestra en la figura 7. Esta configuración tiene la ventaja de que cada una de las RBG puede ser impresa con periodicidad distinta [Kersey.et al 1997]. Este tipo de sensores son muy útiles para ser utilizados como multiplexores de longitud de onda o bien hasta como un láser semiconductor. [Hillmer et al. 1994].

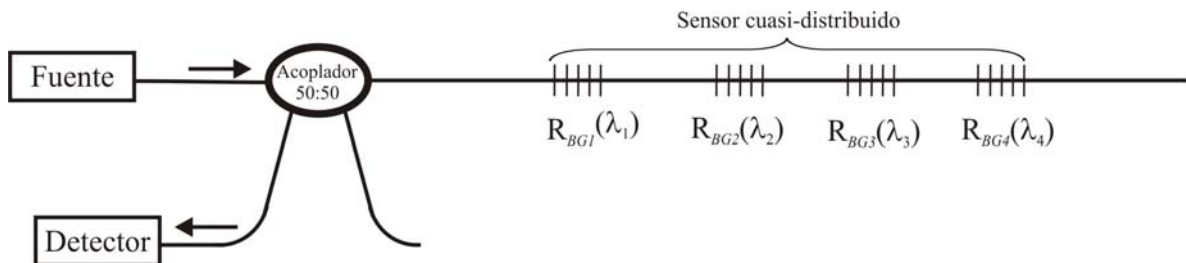


Figura 7. Configuración de sensor cuasi-distribuido.

Tanto los sistemas distribuidos como cuasi-distribuidos son ampliamente utilizados cuando se requiere detectar una variable física a lo largo de grandes distancias.

II.3.4 Aplicaciones

Las RBG son instrumentos muy útiles para el desarrollo de comunicaciones ópticas por la capacidad de filtrar, multiplexar, así como en otras áreas como sensores ópticos y también en las áreas para la industria aeroespacial, química, médica, entre otras.

Las RBG presentan las características siguientes: tamaño reducido, bajas pérdidas, inmunidad a la interferencia electromagnética; forma de interrogación (verificación del sensor) y su seguridad intrínseca las hacen muy atractivas para una amplia gama de aplicaciones. Por otro lado las RBG presentan una alta sensibilidad a pequeños cambios de la temperatura y el esfuerzo, afectando directamente su reflectancia, por lo que son muy útiles en el desarrollo de sensores [Kersey et al. 1997, Rao et al. 1997]; superando a los sensores electrónicos [Betz et al. 2002] cuando se requiere de operar en ambientes adversos [Fernandez et al. 2002, James et al. 2002].

También presentan numerosas aplicaciones en el área de telecomunicaciones como el filtrado espectral, ya sea combinando o separando múltiples longitudes de onda para desarrollar sistemas de multiplexores de división por longitudes de onda (WDM).

Las RBG pueden utilizarse como espejos para diseñar láseres de fibra, teniendo una emisión espectral de salida muy estrecha y modo de operación monomodal, así como en láseres DFB, en láseres semiconductores de modo amarrado [Washburn et al. 2004] y láseres Raman. También son recomendables para el diseño de sensores de temperatura para sistemas remotos [Lee et al. 2004] y para láseres sintonizables a diferentes longitudes de onda de operación.

Además las RBG se pueden utilizar en amplificadores de fibra óptica con fibra dopada con Erblio y pueden ser útiles en la elaboración de componentes fotónicos utilizando elementos como vidrio o zafiro, expuestos a diferentes longitudes de onda: 255, 271 y 298 *nm* [Illy et al. 2003].

Las RBG tienen también numerosas aplicaciones en las áreas de comunicaciones y sensores, como se mencionó anteriormente, ya que pueden operar en varios ambientes de radiación como en el espacio y la industria nuclear, como por ejemplo: RBG utilizadas en desarrollo de componentes fotónicos para el monitoreo de reactores nucleares utilizando sensores multiplexados basados en RBG bajo radiación combinada de neutrones y rayos gama [Gusarov et al. 2002]. Otra aplicación importante de la RBG es que pueden ser utilizadas para evaluar la cantidad de radiación gama, donde se ha observado que el pico de reflexión se recorre hacia la zona espectral del rojo utilizando la multiplexores por longitud de onda basados en RGB, así como también pueden ser utilizadas el diseño de enlaces ópticos tolerantes a la radiación gama para la observación de satélites [Fernandez et al. 2002].

II.4 Métodos de medición de fotosensibilidad en fibras ópticas.

Existen diferentes métodos para medir la fotosensibilidad en fibras de forma indirecta, entre ellos hay uno método comúnmente utilizado que consiste en grabar una rejilla de Bragg para monitorear su reflectancia, mediante la cual, se puede conocer el cambio de índice de refracción modulado utilizando las ecuaciones (3) y (4). Otro método también utilizado consiste en grabar una rejilla de Bragg y monitorear desde el inicio de la grabación el desplazamiento de la longitud de onda de Bragg. Entonces conociendo parámetros tales

como el espaciamento físico Λ de la rejilla y utilizando la ecuación (1), se puede obtener el cambio de índice de refracción en función de la cantidad de energía irradiada sobre el área expuesta de la fibra óptica.

Existen además métodos interferométricos basados en fibras ópticas, utilizados para medir la fotosensibilidad. En estos, las mediciones se realizan a través de la diferencia de fase basada en la interferencia de dos o más ondas que viajan por diferentes caminos ópticos. Esta diferencia de fase cambia en función de una alteración externa que afecta a uno de los brazos del interferómetro. Existen diferentes métodos interferométricos para medir el cambio de índice de refracción inducido por irradiación ultravioleta, entre los métodos más utilizados se encuentran:

- Interferómetro de Michelson: utilizando esta técnica interferométrica es posible determinar la fotosensibilidad en fibras ópticas con alta concentración de germanio (35 % mol), mostrando además que esta fibra es 6 veces mas fotosensible que la que tienen baja concentración de germanio (3 % mol) [Mizunami et al. 1996]. La configuración de éste es mostrada en la figura 8.

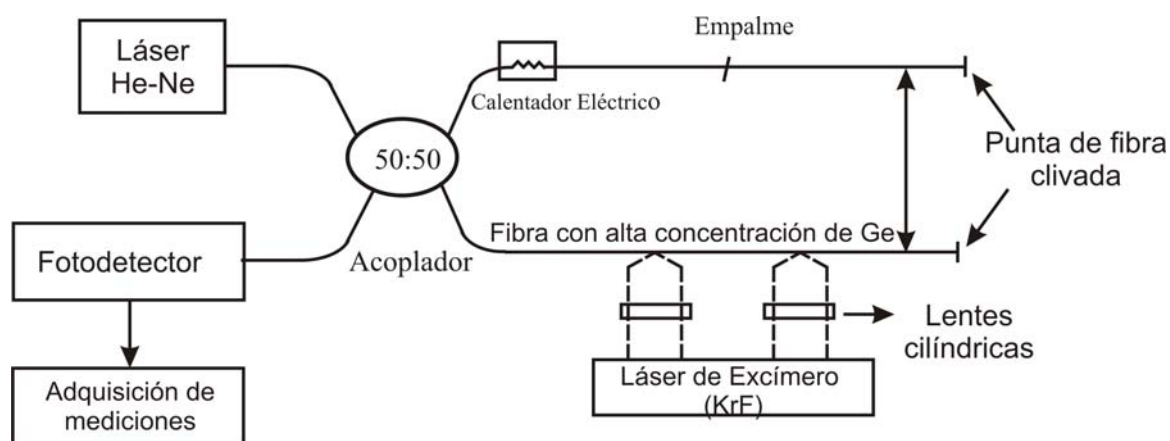


Figura 8. Arreglo experimental de interferómetro de Michelson para medición de fotosensibilidad en fibras ópticas.

- Interferómetro de Mach-Zender: Es un método utilizado para la medición de la fotosensibilidad de fibras ópticas. Puede ser construido en una sola fibra óptica donde son grabadas dos RBG de periodo largo, como se muestra en la figura 9. Se puede observar que la primera rejilla acopla parte de la luz que se propaga en el modo fundamental del núcleo en modo de la cubierta. La segunda RBG está a una distancia de 10 a 15 *cm* de la primera RBG y acopla el modo excitado de la cubierta al modo fundamental del núcleo. Entre las dos RBG, hay una onda que se propaga en el modo fundamental del núcleo y otra que viaja en uno de los modos de la cubierta. Las RBG de periodo largo actúan como un equivalente de espejos semi-transparentes en un interferómetro Mach-Zender óptico de volumen y por influencia de luz UV entre las dos RBG se puede cambiar el índice efectivo del núcleo y provocar un cambio de fase en la luz propagada en la fibra. Además se utiliza un analizador de espectros ópticos para medir el espectro de transmitancia donde aparece el patrón de interferencia producido por este interferómetro. Mediante el cambio de fase es posible medir el cambio de índice inducido por luz UV [Dianov et al 1997]. Este interferómetro sólo ha logrado medir cambios de índice en fibra con alta concentración de germanio.

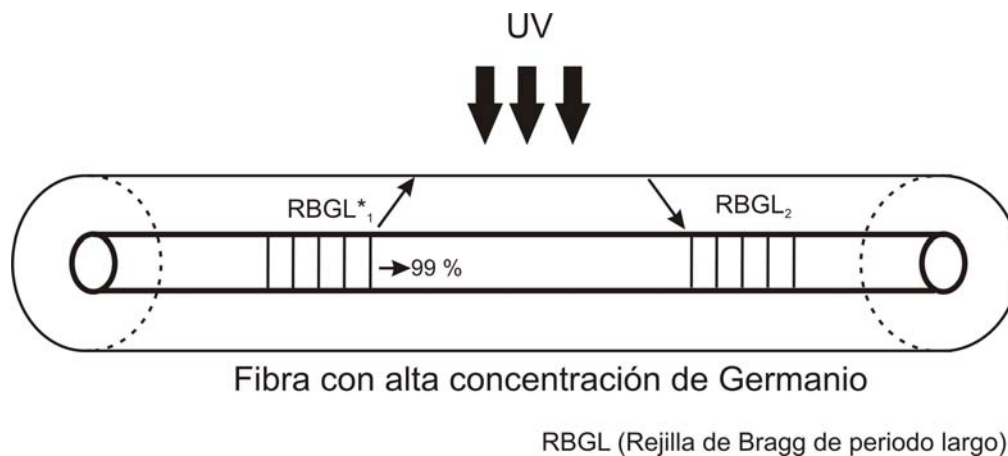


Figura 9. Interferómetro Mach-Zender utilizado para medir la fotosensibilidad en fibras ópticas.

- Interferómetro de Fabry-Perot: existen también resultados experimentales de medición de la fotosensibilidad utilizando este interferómetro para fibras ópticas con diferente concentración de Ge/B con y sin proceso de hidrogenación. Esta técnica de medición interferométrica se basa en la evaluación de la fase utilizando el espectro de Fourier, que permite la determinación de la evolución del cambio de índice inducido en función de la fluencia acumulada, [Swart et al. 2002]. Su configuración es mostrada en la figura 10.

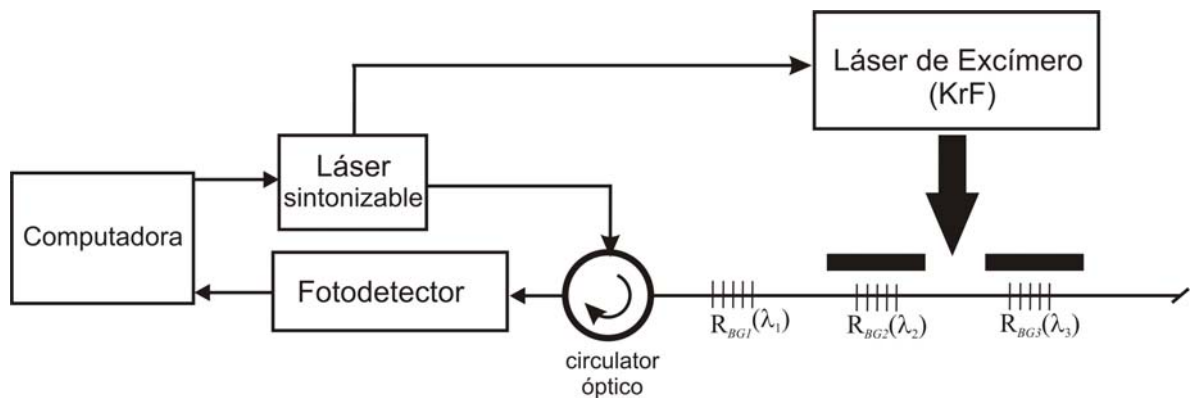


Figura 10. Arreglo con Interferómetro Fabry-Perot utilizado para medir fotosensibilidad en fibras ópticas.

La característica principal de este método interferométrico es que funciona para determinar el cambio de índice efectivo para el modo fundamental de la fibra óptica, mientras que el interferómetro de Mach-Zender proporciona la diferencia de índices efectivos de los modos acoplados entre el núcleo y la cubierta de la fibra.

II.5 Tipos de Fotosensibilidad en fibra ópticas

Existen diferentes tipos de fotosensibilidad en fibras ópticas que dependen de las características que presentan las RBG bajo las condiciones iniciales de grabación, como son: longitud de onda de grabación, tipo de fibra, potencia y forma de irradiación continua o pulsada. Esta clasificación está basada en la respuesta fotosensible de las rejillas, es decir, mostrando diferentes propiedades espectrales, térmicas y mecánicas debido a diferentes mecanismos que intervienen en la formación de las RBG.

Tipo I

Son las RBG más básicas, ya que aparecen en la etapa inicial de grabación de cualquier rejilla y pueden ser observadas utilizando fluencias por pulso bajas a moderadas. Estas RBG tienen respuestas espectrales de transmisión y reflexión complementarias, además no tienen pérdidas de absorción o reflexión a través de la cubierta de la fibra y pueden tener un crecimiento no lineal de reflectancia si tienen irradiación continua y pueden tener efectos de saturación. Su respuesta fotosensible está asociada con la formación de defectos y cambios de densidad de la matriz vítrea. Estas rejillas pueden borrarse si son expuestas a temperaturas de 200°C aproximadamente. La temperatura óptima de operación de las RBG tipo I es de -40 a +80 °C, por lo que son buenas candidatas para aplicaciones en sensores y telecomunicaciones. Pero pueden tener resistencia térmica hasta de 400 °C, dependiendo de los co-dopantes del núcleo de la fibra.

Tipo II

Son también llamadas rejillas de daño ya que pueden ser grabadas por un sólo pulso de muy alta fluencia [Archambault, et al. 1993]. Pueden tener una alta

reflectancia pero también pueden presentar quebraduras o fracturas iniciadas por un pulso UV entre el núcleo y la cubierta de la fibra óptica. Se caracterizan por ser térmicamente muy estables, operando a temperaturas de ~ 800 °C por 24 horas sin presentar degradación [Archambault, et al. 1993]. Esto es debido a que se provoca un daño en la interfaz entre el núcleo y la cubierta, provocando un mayor cambio de índice. El daño está localizado en uno de los lados del núcleo y tiene una fuerte absorción de luz UV. Si son sometidas a una temperatura mayor de ~ 1000 °C por aproximadamente 4 horas puede ocurrir una fusión y provocar que la rejilla desaparezca o se borre. La fusión de la red vítrea es el mecanismo asociado a este tipo de rejilla. Pueden ser grabadas por un sólo pulso utilizando una fuente de luz pulsada con una nivel de fluencias por pulso entre 0.5 a $0.8 J/cm^2$. También pueden ser grabadas por láseres de excímero requiriendo un tiempo de grabación de pocos nanosegundos. Este tipo de rejillas puede ser utilizado en aplicaciones como seleccionadores de longitudes de onda para DWDM. [Russel, et al.].

Tipo IA

Son rejillas impresas que generalmente se graban en fibras hidrogenadas y co-dopadas con boro-germanio, además requieren pulsos de alta potencia y un nivel alto fluencia acumulada. Pueden ser observadas bajo condiciones experimentales especiales utilizando el método holográfico en el cual se ha observado un corrimiento mayor de $20 nm$ hacia el rojo de la longitud de onda de Bragg, que a comparación de la grabación de rejillas en fibras de silicio sin dopar, se requiere de un alto nivel de fluencia o más de 26,000 pulsos de irradiación UV. En comparación con la rejilla tipo I, ésta presenta también un desplazamiento espectral hacia el rojo pero 10 veces menor [Liu et al. 2002].

Tipo IIA

Es una rejilla, cuyo comportamiento es inicialmente de una rejilla tipo I y seguida por la formación de otra rejilla con cambio de índice de refracción negativo [Dong y Liu 1997], es decir el índice de refracción disminuye bajo influencia de luz ultravioleta. Este tipo de RBG han sido observadas en fibras ópticas con alta concentración de germanio (>9 mol %) y en fibras con núcleos pequeños [Xie 1993, Taunay 1997]. También pueden ser grabadas en fibras co-dopadas con B/Ge, Sn /Ge [Ky 1998] y co-dopadas con nitrógeno [Dianov 1997]. Se caracterizan por ser térmicamente más estables que las rejillas tipo I a temperaturas entre 700 a 800 °C y pueden ser utilizadas en el área de sensores para cuando se necesita trabajar en ambientes expuestos a temperaturas muy elevadas. Los espectros de reflectancia y transmitancia son casi complementarios y son parecidos a las rejillas tipo I, sólo que en su formación presentan un acentuado decremento de reflectancia que puede disminuir hasta cero y nuevamente experimentar un incremento mayor al inicial. Esto quiere decir que durante la grabación de esta rejilla de Bragg, en la etapa inicial su reflectancia desarrollada es de tipo I, llegando a un máximo, entonces desaparece parcial o completamente seguida por un nuevo y mayor incremento de reflectancia hasta llegar a un nivel de saturación. Este segundo incremento es llamado tipo IIA. Algunas veces, pueden presentar un desplazamiento espectral hacia el rojo y azul, lo que es un indicador de formación de rejillas tipo I y tipo II, respectivamente [Taunay et al. 1997]. El desplazamiento hacia el rojo corresponde a un incremento del índice de refracción efectivo de la fibra n_{eff} (rejilla positiva) y el desplazamiento espectral hacia el azul corresponde a un cambio negativo o decremento del n_{eff} . Además, los espectros de rejillas tipo I y tipo IIA son prácticamente indistinguibles, es decir son muy similares, con la excepción de que la

rejilla tipo IIA presenta un fuerte esparcimiento de luz en el área expuesta de la rejilla [Pureur 1996].

II.6 Mecanismos relacionados con fotosensibilidad en fibras ópticas

II.6.1 Defectos en fibras de Ge/Si

Los mecanismos que participan en la respuesta fotosensible de las fibras se inician desde el proceso de fabricación. Uno de los métodos más utilizados para la fabricación de fibras es el método MCVD (Modified Chemical Vapour Deposition) donde ocurren reacciones químicas entre los gases de silicio y germanio con el oxígeno, produciendo una mezcla de dióxidos de germanio-silicio, pero no se puede llegar a una reacción de 100% debido a que estos elementos químicos tienen una porción de sub-óxidos y defectos en la matriz vítrea, que provocan cambios como la compactación en la preforma que provocan alteraciones futuras en el proceso de estiramiento de la fibra y por consecuencia los enlaces de ésta se rompen, dando como resultado un material inhomogéneo, es decir que presentan un acomodo aleatorio de enlaces rotos que son llamados defectos.

La fotosensibilidad en vidrios basados en Ge-Si, está generalmente basada en la absorción óptica que está asociada a los defectos presentes en la estructura vítrea. La estructura de la red vítrea de Ge-Si es desordenada y se pueden presentar diferentes clases de defectos puntuales incluyendo enlaces vacantes o defectuosos e incluso en átomos de impurezas llamados dopantes. Las bandas de absorción asociadas a estos defectos han sido utilizadas para explicar la dependencia de la longitud de onda de la respuesta fotosensible. En general los centros deficientes de oxígeno-germanio GODC, (Germanium Oxygen

Oxygen Deficient Centers), también el enlace monovalente neutral de oxígeno- germanio NOV (Neutral Oxygen Monovacancy) y el enlace divacante neutral de oxígeno NODV (Neutral Oxygen Divacancy) han sido asociados con la banda de absorción a $\lambda=244 \text{ nm}$ (5.08eV) y $\lambda=240 \text{ nm}$ (5.15eV), respectivamente [Hosono 1992]. En la figura 11, se muestran diferentes tipos de defectos que pueden estar presentes en la red vítrea.

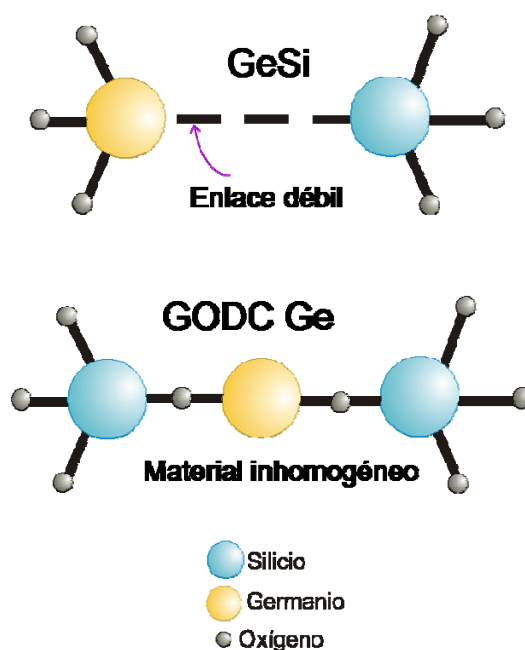


Figura 11. Defectos de enlace débil y en material inhomogéneo de la red vítrea.

Estos defectos son formados en las fibras ópticas que contienen concentraciones de germanio que forman sub-óxidos como GeO_x ($x=1$ a 4), las cuales presentan muy buenas propiedades como: pérdidas bajas y alto umbral de daño. La cantidad de dióxidos de germanio GeO_2 en la red vítrea dependerá de la concentración de defectos GODCs, además

presentan la característica de ser muy estables a temperaturas elevadas [Nesutruiev 1992, Jackson 1974].

El modelo de formación de centros de color sugiere que la modulación de índice de refracción es el resultado de la transformación de los defectos anteriormente mencionados debido a la irradiación UV. Esta transformación de defectos está asociada a la fotoexcitación de un electrón, que puede ser transferido y atrapado en otros defectos presentes en la red vítrea del material. La exposición a la irradiación de $\lambda=248 \text{ nm}$ (5.0 eV) está asociada al paso inicial de fotosensibilidad para niveles menores de fluencia por pulso de 0.040 J/cm^2 . Esta irradiación sobre los enlaces NOV provoca un “borrado” (Bleaching) en la banda de absorción y en la formación de los centros GeE' con una asociada absorción inducida formando a $\lambda=190 \text{ nm}$ [Nishii 1993].

La irradiación de luz UV sobre estos defectos rompe el enlace entre moléculas de átomos adyacentes de germanio o silicio, creando de este modo los centros de color GeE'. En este caso el electrón extra se mueve libremente en la red vítrea saltando a través de ella, pudiendo ser re-atrapado en su sitio original o en otro lugar. Esto causa un cambio en la configuración de la molécula de Ge y Si causado por la absorción, generando un cambio estructural del material. Esto se debe a un cambio llamado hibridación de silicio, que cambia su configuración de la capa sp^3 a sp^2 . La transformación de los defectos GODC causada por irradiación UV se muestra en la figura 12. Estos defectos transformados son llamados defectos paramagnéticos Ge(n), donde n se refiere al número de átomos de germanio vecinos más cercanos que se encuentran rodeando al átomo de silicio. Estos defectos contienen un ión con spin incompleto asociado a un electrón [Friebele 1974].

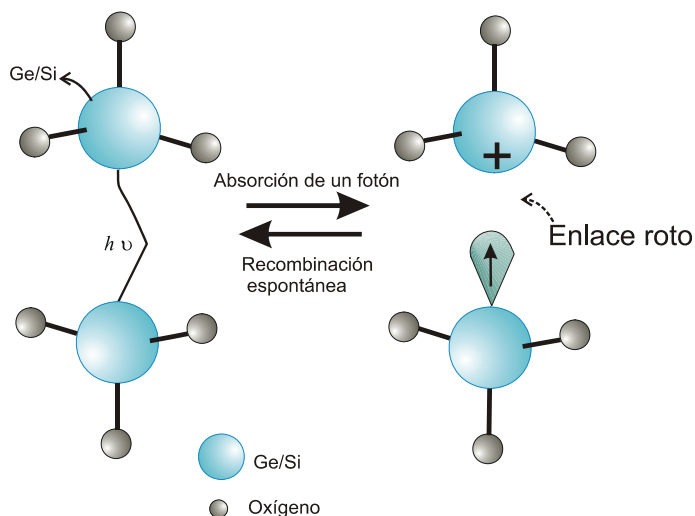


Figura 12. Enlace roto de defecto de Ge por la aplicación de un fotón con energía $E = h\nu$.

Los centros de color Ge(1) y Ge(2) son llamados centros de electrón atrapado [Kawazoe 1985]. Se puede observar que para el centro Ge(1), el átomo de germanio tiene cuatro átomos vecinos de oxígeno-silicio y que además queda con un electrón extra con spin incompleto que provoca una distorsión y puede ser re-atrapado en otro defecto de la red vítrea. Para el centro Ge(2) puede observarse que el electrón extra se encuentra en uno de los enlaces de átomos de germanio-oxígeno que está coordinado con tres enlaces de oxígeno silicio [Tsai et al. 1987, 1981]. Este electrón extra distorsiona el arreglo tetraédrico de la red vítrea. Las estructuras para estos dos defectos son mostradas en la figura 13.

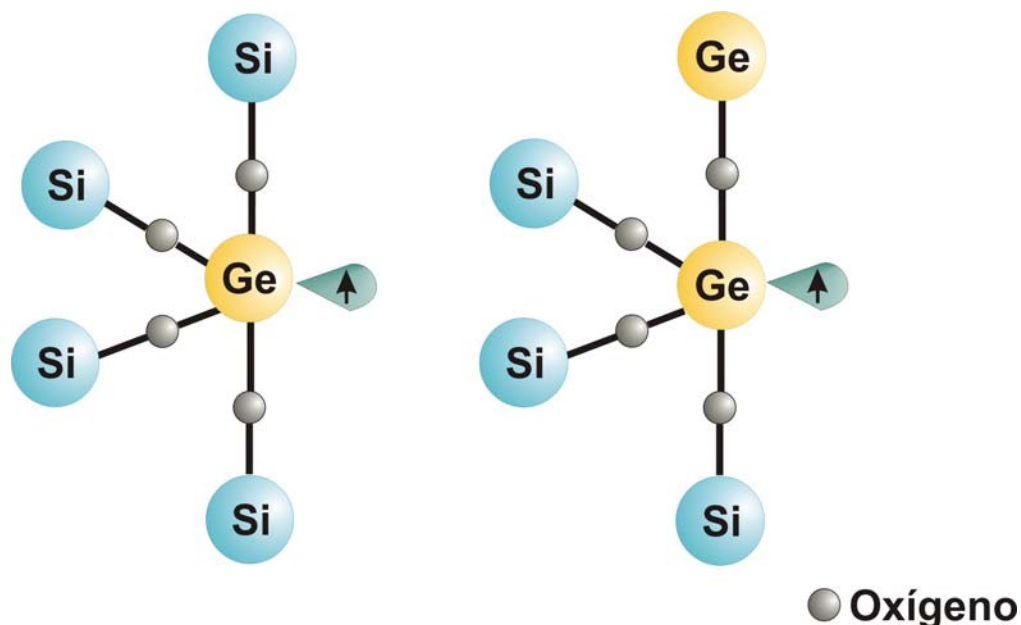


Figura 13. Centros de color Ge (1) y Ge (2).

Los centros Ge(1) y Ge(2) están asociados a bandas de energía y absorción de 4.6 eV, ($\lambda=281\text{nm}$) y 5.8 eV, ($\lambda=213\text{ nm}$), respectivamente [Friebele y Griscom 1986].

II.6.2.Centros de color

El mecanismo de formación de centros de color explica la fotosensibilidad en fibras compuestas por Ge-Si y está basado en los defectos localizados de la red vítrea de la fibra óptica formados generalmente durante su proceso de fabricación, como fue mencionado anteriormente. En este mecanismo la fotosensibilidad está asociada a la banda de absorción de los defectos GODC, que son localizados a $\lambda=242\text{ nm}$, y cuando son afectados por irradiación UV son transformados en defectos: Ge(1) y Ge(2) como fue descrito en sección anterior. Estos defectos presentan un borrado en la banda de absorción de 242 nm , pero a

$\lambda=190, 213$ y 280 nm tienen un alto nivel de absorción. Estos cambios de absorción inducidos por la irradiación óptica en el intervalo ultravioleta dan origen al cambio de índice de refracción del núcleo de la fibra óptica, por ejemplo, en la formación de una rejilla en el intervalo de longitudes de onda del espectro visible e infrarrojo, expresado en la ecuación (5), conocida como la relación de Kramers-Kronig [Hand 1990, Dong 1995].

$$\Delta n_{eff}(\lambda) = \frac{1}{2\pi^2} P \int_0^{\infty} \frac{\Delta \alpha_{eff}(\lambda')}{1 - (\lambda/\lambda')^2} d\lambda', \quad (5)$$

donde P es la parte principal de la integral, proveniente de las propiedades de integración de Cauchy, λ corresponde a la longitud de onda y $\Delta \alpha_{eff}(\lambda)$ es el cambio de coeficiente de absorción efectivo de los defectos y puede ser, expresado por la ecuación (6):

$$\Delta \alpha_{eff}(\lambda) = (1/L) \int_0^L \Delta \alpha(\lambda, z) dz, \quad (6)$$

donde L es el grosor de la muestra o del núcleo de la fibra óptica. Lo anterior considera el hecho de que el haz que produce el borrado pasa a través de la muestra y es fuertemente atenuado, pero este efecto no ocurre de forma uniforme respecto con la distancia de propagación. El $\Delta \alpha_{eff}$ puede ser modelado como una distribución gaussiana.

Las principales técnicas utilizadas para la detección de los defectos en redes vítreas son: ESR Electron Spin Resonance y luminiscencia espectral. Existen además diferentes formas de transformación de defectos bajo la influencia de irradiación UV, o bien ya sea utilizando presión hidrostática y estabilidad térmica [Grubsky y Feinberg 2005].

El modelo de formación de centros de color no puede explicar todos los resultados experimentales para la formación de RBG en fibras ópticas. Sólo un porcentaje entre 10 a

30% del cambio de índice de refracción positivo puede ser justificado por el mecanismo de formación de centros de color [Dong 1995].

II.6.3 Relajación de esfuerzos

Este mecanismo consiste en un cambio del índice de refracción causado cuando la fibra de Ge-Si es también irradiada por luz UV, e intervienen dos mecanismos: las tensiones termo-elásticas y la compactación, ésta última será explicada en la sección siguiente. Estos mecanismos son generados también durante el proceso de fabricación de la fibra óptica, debido a que durante la etapa del proceso de estiramiento (drawing) realizado para obtener la forma final de la fibra se provoca que en el núcleo de la fibra tenga una temperatura más elevada que en la cubierta de ésta, y además durante este proceso el vidrio es enfriado a un nivel de su temperatura de transición. Estas diferencias de temperatura entre el núcleo y la cubierta de la fibra provocan una diferencia de expansión térmica, lo que significa que la temperatura de la fibra decrece rápidamente generando puntos congelados en la estructura vítrea e incluyendo los defectos GeE'. Entonces a través del efecto elasto-óptico, es decir, cuando se aplica una tensión a la red vítrea de la fibra óptica se produce un cambio en el índice de refracción. Esto ocurre cuando los puntos enfriados son irradiados por luz UV, produciéndose de esta forma una ruptura de enlaces tensionados a causa de la irradiación UV, incluso en los enlaces defectuosos, y por lo tanto ocurre la relajación de esfuerzos o disminuye la tensión causada por el congelamiento en ciertos puntos de la fibra originando un incremento en el cambio de índice de refracción. [Sceats et al. 1993]. En fibras compuestas de Ge-Si hay una abundancia de enlaces defectuosos.

El cambio de índice de refracción utilizando este modelo puede ser asociado por el efecto elasto-óptico en términos de la relación Kramers-Kronig, la cual atribuye al cambio de la banda prohibida en función al esfuerzo aplicado al vidrio bajo prueba, que puede ser considerado como continuo y como un arreglo tetraédrico de enlaces covalentes. La tensión produce un estiramiento de enlaces y un decremento de la longitud de onda de la banda prohibida del material bajo prueba, lo que provoca un decremento en el índice de refracción como lo describe la relación Kramers-Kronig. El cambio de índice de refracción bajo esfuerzo aplicado sobre el eje x para luz polarizada en x está caracterizado por los coeficientes elasto-ópticos c_1 y c_2 , expresados en la ecuación:

$$n_x = n_0 - c_1\sigma_x - c_2(\sigma_y + \sigma_z), \quad (7)$$

donde n_0 es el índice de refracción sin tensión aplicada, σ_x , σ_y , y σ_z son los coeficientes de tensión mecánica a lo largo de los ejes x, y, z .

Existen publicaciones donde se ha demostrado mediante mediciones de transmitancia y esfuerzo, que el proceso de estiramiento tiene una influencia directa en la formación de rejillas de Bragg en fibras con núcleo co-dopado con B-Ge y Sn-Ge. Se demostró además que este proceso aumenta la fotosensibilidad y el esfuerzo en el núcleo, en cambio se observó el efecto contrario para fibras con núcleo co-dopados con Sn-Ge [Ky et al. 1998].

Se ha encontrado además que si el estaño es utilizado como co-dopante junto con el germanio se puede incrementar la temperatura de fusión y la viscosidad del núcleo de la fibra [Dong et al. 1995]. Lo anterior se basa en la hipótesis de que en la estructura de los defectos intrínsecos ocurre una relajación de esfuerzos en el núcleo de la fibra que aumenta

con la tensión provocada por la expansión térmica, transformando de esta forma los defectos DID's (Drawing Induced Defects) en ODC's. [Nguyen et al. 1998].

En cambio si hay un incremento de tensión muy pequeño causada por el efecto elasto-óptico, debido a que la longitud de onda de Bragg λ_B es desplazada a longitudes de onda más largas durante la irradiación UV porque el n_{eff} es incrementado, lo que hace que la estructura sea más compacta por el aumento de cambio de índice de refracción.[Fonjallaz 1995]. Lo anterior permite concluir que los mecanismos de relajación de esfuerzos y compactación tienen una estrecha relación.

II.6.4 Compactación/Densificación

Debido a que los mecanismos de formación de centros de color y la relajación de esfuerzos no pueden explicar de forma individual todos los resultados experimentales relacionados con la grabación de RBG, existe otro modelo importante que complementa a los anteriores basado en la compactación o densificación de la estructura de la red vítrea. Este mecanismo también tiene su origen en el proceso de fabricación de la fibra, es decir cuando la red vítrea es calentada a altas temperaturas (1600 °C) e inmediatamente después es enfriada, formándose así muchos defectos, debido a que se presentan gran variedad de distribución de tensiones en el proceso de la preforma y por consecuencia en la fibra óptica resultante [Friebele y Griscom 1986].

El mecanismo de compactación produce un cambio de índice de refracción del núcleo de la fibra, que es inducido cuando ésta es expuesta a irradiación UV ($\lambda=248 \text{ nm}$) y su magnitud está determinada por niveles de intensidad por debajo del umbral de ruptura, de tal forma que se produce una compresión en la estructura vítrea de la fibra debido a la

ruptura de enlaces de la red vítrea de la fibra óptica. Este mecanismo en muestras vítreas de silicio es térmicamente reversible [Fiori y Devine 1986]. Existen casos cuando se tiene irradiación UV a niveles muy altos de intensidad que provocan un mecanismo de absorción de dos fotones del estado de la banda de valencia al estado de la banda de conducción para la generación de los defectos Ge(1) y Ge(2) [Nishii 93,95]. También existen cálculos cuántico-químicos de cúmulos (clusters) de átomos que modelan la estructura local y los defectos divalentes de germanio en vidrios formados en Ge-Si. Estos cálculos han demostrado que el defecto divalente del germanio puede interactuar con un átomo de oxígeno, siendo el principal defecto de la configuración y por lo tanto la causa de la densificación de la estructura vítrea. Esta compresión se espera que ocurra bajo una fotoionización [Uchino 2002], encontrando una estrecha relación entre los espacios espectrales inducidos por irradiación UV y la compactación hidrostática de la red vítrea [Dianov 97]. El tratamiento hidrostático de los vidrios de Ge-Si en preformas de fibras ópticas a temperaturas elevadas ~ 300 °C, con una presión de 9GPa presentaron una densificación de 19% y sólo un 1% utilizando la misma presión a temperatura ambiente [Dianov 97]. Por lo tanto, la transformación estructural inducida por la irradiación UV de centros de defectos resulta en una densificación de la red vítrea. Es decir ambos mecanismos, formación de centros de color y densificación pueden ocurrir simultáneamente cuando la fluencia por pulso es mayor a 0.05 J/cm^2 , por lo que es difícil separa uno del otro. En cambio a niveles menores de esta fluencia por pulso el mecanismo de formación de centros de color puede ser el mecanismo dominante en el cambio de índice de refracción. En la formación de la rejilla tipo I, se puede presentar que estos dos mecanismos ocurran en fase, junto con la distribución de intensidad del haz UV durante la grabación de la rejilla. Además estos

mecanismos son capaces de explicar la mayoría de los trabajos experimentales relacionados con la formación de las rejillas tipo I. Los detalles de la transformación estructural de los defectos bajo irradiación UV son temas importantes de investigación actual. [Uchiho 2000, Takahashi 2002, Paccou 2005, Trukhin 2003, Mashinsky 2004].

La compactación tiene la característica de poderse representar por un modelo matemático lineal que puede ser traducido como un cambio de volumen en función de la irradiación UV de la fibra óptica durante la formación de una rejilla de Bragg, como es expresado en la ecuación (8):

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{3(\Delta t/t)}{(1+2\sigma)}, \quad (8)$$

donde σ es el radio de Poisson del material bajo irradiación, V y t son el volumen y el tamaño de dicho material antes de la irradiación. ΔV y Δt son los cambios de volumen y de tamaño entre antes y después de la irradiación UV. Utilizando la relación de Lorentz-Lorentz, la refractividad de un material está expresada por:

$$R = \frac{(n^2 - 1)}{\rho(n^2 + 2)}, \quad (9)$$

donde ρ es la gravedad específica del vidrio y n es el índice de refracción. El Δn se obtiene diferenciando la ecuación (8), obteniendo así el cambio de índice de refracción:

$$\Delta n = -\frac{(n^2 + 2)(n^2 - 1)}{6n} \left[1 - \frac{\Delta R}{R\Delta V/V} \right] \frac{\Delta V}{V}. \quad (10)$$

Si el término $(V/R)\Delta R/\Delta V < 1$ en la ecuación (10) el cambio de índice de refracción es positivo, lo cual indica que el material es más compacto.

Se ha comprobado que el proceso de hidrogenación, en este caso, no aumenta la fotosensibilidad por el mecanismo de compactación, por lo que en fibras no hidrogenadas este efecto puede ser térmicamente reversible para el Δn_{mod} , también en las fibras co-dopadas con alta concentración de germanio (18 mol %) sin hidrogenar se ha observado una mayor compactación a fluencias acumuladas de 15 KJ/cm^2 cuando son expuestas a luz UV [Fiori y Devine, 1986, Fonjallaz et al. 1995].

Se ha reportado también que en fibras con bajo contenido de germanio y utilizando irradiación láser de Nd:YAG a $\lambda=213 \text{ nm}$ por la generación de quinto armónico y con pulsos de 150 ps, se pueden obtener cambios de índice de refracción bajo el mecanismo de compactación de 1.25×10^{-3} utilizando niveles de fluencia menores que 3 KJ/cm^2 [Pissadakis y Konstantaki, 2005].

En fibras co-dopadas con boro y utilizando un proceso de pre-exposición a luz láser de CO_2 y con una potencia de 8.5W, se pueden obtener rejillas completamente reversibles y re-escribibles bajo esta irradiación, pero sin mostrar pérdidas en la fotosensibilidad de las fibras. Este efecto de reversibilidad ha sido relacionado al mecanismo de densificación térmica estable que ocurre en el núcleo de la fibra y ha sido comprobado que es muy útil en la grabación de RBG de periodo largo (rejillas con periodo $\Lambda > 300 \text{ nm}$). [Grubsky y Feinberg, 2005].

La dependencia térmica de las RBG permite el funcionamiento por arriba del máximo esfuerzo de $2.74\% \varepsilon$, lo que indica que estas rejillas pueden ser utilizadas en aplicaciones como sensores que requieren operar a muy altas temperaturas y ambientes

peligrosos, como por ejemplo en naves espaciales, plantas nucleares y la industria química [Zhu et al, 2005].

También se ha demostrado que se puede obtener una respuesta fotosensible de la fibra utilizando láseres de pulsos ultracortos del orden de femtosegundos en el IR, en sustitución de los láseres de UV para muestras de silicio co-dopadas con boro y sin dopar. Una de las aplicaciones utilizando este tipo de irradiación de IR, es la fabricación de acopladores ópticos tipo “Y” en muestras de silicio puro [Homoelle et al. 1999].

Se puede concluir que la fotosensibilidad en fibras ópticas depende de muchos factores; su composición química, el proceso de fabricación, la intensidad del láser de irradiación y de la longitud de onda utilizada para la grabación de rejillas de Bragg. Sin embargo la fotosensibilidad es aún un área activa de investigación que busca explicar los diferentes tipos de fotosensibilidad en fibras ópticas. Sin embargo está ampliamente acreditado por publicaciones científicas que existen dos mecanismos principales que explican casi todos los comportamientos de fotosensibilidad o tipos de rejillas: la formación de centros de color y la densificación, los cuales tienen una estrecha relación con los defectos de la red vítrea. Para rejillas tipo I, la luz UV es absorbida por defectos como los GODC provocando una redistribución de electrones que ocasiona cambios estructurales en la red vítrea de la fibra óptica en forma de compactación. En cambio para las rejillas tipo IIA, aún no han sido observadas en fibras con baja concentración de germanio o hidrogenadas, y tampoco se tiene un modelo microscópico para explicar su formación.

Capítulo III. Interferómetro Fabry-Perot basado en Rejillas de Bragg

La técnica interferométrica utilizada para medir el cambio de índice de refracción en fibras ópticas consiste en utilizar dos RBG grabadas bajo condiciones iguales, separadas una distancia L_{FP} , creando una cavidad Fabry-Perot en el núcleo de la fibra óptica bajo prueba. De esta forma las RBG actúan como reflectores, como se muestra en la figura 14.

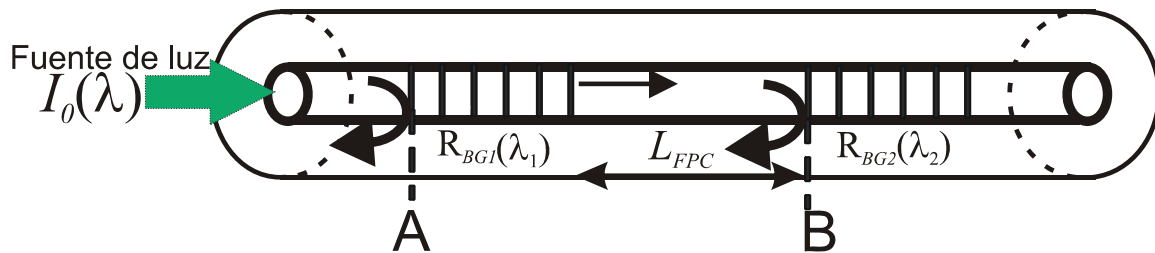


Figura 14. Cavidad Fabry-Perot formada por dos Rejillas de Bragg.

Para obtener el espectro de reflexión del interferómetro se requiere acoplar un haz de luz en uno de los extremos del interferómetro proveniente de una fuente de amplio espectro con una intensidad $I_o(\lambda)$. Cuando el haz llega a la primer rejilla de Bragg, parte de este haz es reflejado en el plano A por $r_{BG1}(\lambda)$ con su espectro centrado en λ_{BG} , (De acuerdo a lo expuesto en la sección II.2.1), mientras que la otra parte se transmite hasta que llega a la segunda rejilla de Bragg. La luz se refleja en el plano B y regresando al plano A con una amplitud compleja $r_{BG2}(\lambda)e^{-i2\beta(\lambda)L_{PC}}$, es decir, tendrá una diferencia de fase relativa $\Delta\varphi_{FP} = 2\beta(\lambda)L_{PC}$ con respecto a $r_{BG1}(\lambda)$, donde $\beta(\lambda) = 2\pi n / \lambda$.

Las dos reflexiones de ambas RBG interfieren y el coeficiente de refracción complejo del sistema puede ser expresado como:

$$r(\lambda) = r_{BG1}(\lambda) + r_{BG2}(\lambda)e^{-i\Delta\varphi_{FP}(\lambda)}. \quad (11)$$

Considerando que ambas rejillas tienen la misma reflectividad, $r_{BG1}(\lambda) = r_{BG2}(\lambda) = r_{BG}(\lambda)$, es decir:

$$r(\lambda) = r_{BG}(\lambda)(1 + e^{-i\Delta\varphi_{FP}(\lambda)}), \quad (12)$$

y utilizando una de las identidades del coseno, la expresión (11) se puede reescribir como:

$$r(\lambda) = 2e^{-i\frac{\Delta\varphi_{FP}(\lambda)}{2}} r_{BG}(\lambda) \cos\left(\frac{\Delta\varphi_{FP}(\lambda)}{2}\right). \quad (13)$$

La reflectancia $R(\lambda)$ del interferómetro Fabry-Perot se puede obtener por:

$$R(\lambda) = |r(\lambda)|^2, \quad (14)$$

entonces, sustituyendo la expresión (12) en (13) se obtiene:

$$R(\lambda) = 2R_{BG}(\lambda)[1 + \cos \Delta\varphi_{FP}], \quad (15)$$

donde $R_{BG}(\lambda) = |r_{BG}(\lambda)|^2$, es la reflectividad de una sola rejilla de Bragg, que está dada por [Miridonov et. al. 2001]:

$$R_{BG}(\lambda) = \left[\frac{\pi n L_{BG}}{\lambda_{BG}} \text{sinc} \frac{2n L_{BG} (\lambda - \lambda_{BG})}{\lambda_{BG}} \right]^2, \quad (16)$$

de esta forma, la señal del espectro de reflexión del interferómetro Fabry-Perot puede ser presentado como:

$$I(\lambda) = 2I_0(\lambda) \left[\frac{\pi n L_{BG}}{\lambda_{BG}} \text{sinc} \frac{2n L_{BG} (\lambda - \lambda_{BG})}{\lambda_{BG}} \right]^2 (1 + \cos \Delta\varphi_{FP}), \quad (17)$$

donde $I_0(\lambda)$, es la intensidad acoplada a la fibra. El término de interferencia del interferómetro Fabry-Perot expresado en la ecuación 17, está formado por una función coseno modulada por una función sinc^2 , como es mostrado en la figura 14, donde se muestra el espectro de reflexión de una cavidad o interferómetro Fabry-Perot de 9 mm de longitud. Una característica de este espectro de reflexión, es que tanto el periodo de las franjas y la fase dependen de la longitud del interferómetro, es decir a mayor longitud, el interferómetro tendrá un mayor número de franjas de interferencia.

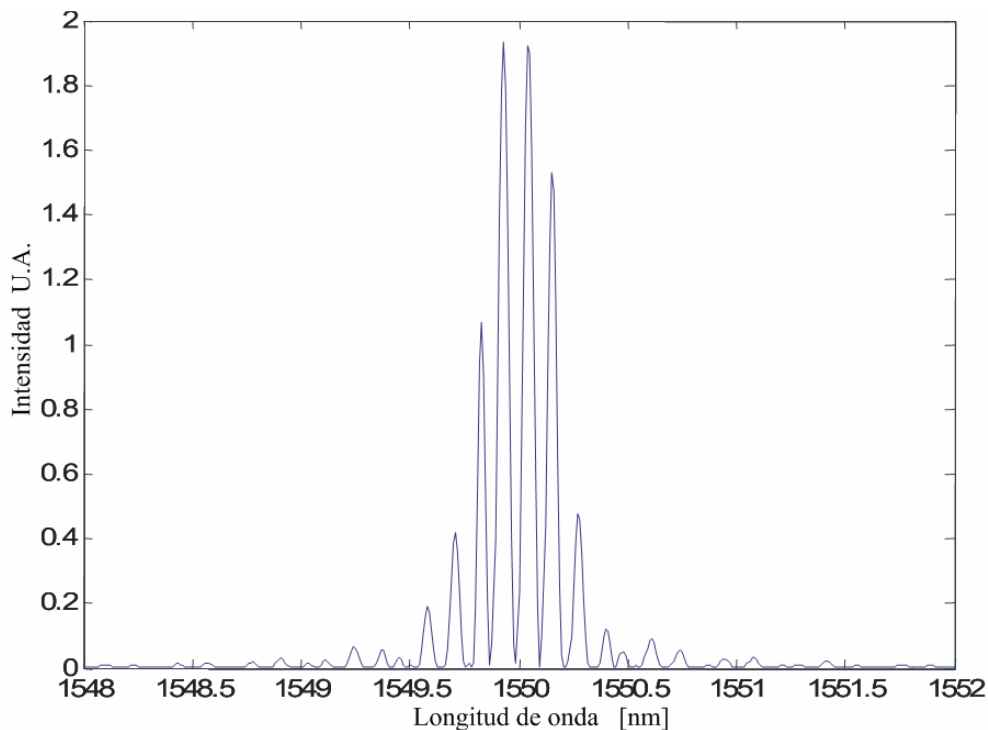


Figura 15. Espectro de reflexión de interferómetro Fabry-Perot formado por dos RBG de baja reflectividad.

III.2- Transformada de Fourier del espectro de reflexión del interferómetro Fabry-Perot basado en RBG.

La transformada espacial Fourier de la reflectancia espectral del interferómetro Fabry-Perot puede expresarse como:

$$\tilde{I}(v) = \int_{-\infty}^{+\infty} I(\lambda) e^{-i2\pi\lambda v} d\lambda, \quad (18)$$

entonces, sustituyendo la expresión (15) en (18), se puede expresar la transformada de Fourier de la reflectancia espectral del interferómetro de Fabry-Perot como:

$$\tilde{I}(v) = 2I_0 \int_{-\infty}^{+\infty} \left\{ \left[\frac{\pi n L_{BG}}{\lambda_{BG}} \text{sinc} \frac{2n L_{BG} (\lambda - \lambda_{BG})}{\lambda_{BG}} \right]^2 \left(1 + \cos \left(\frac{4\pi n L_{FP}}{\lambda} + \varphi_0 \right) \right) \right\} e^{-i2\pi\lambda v} d\lambda. \quad (19)$$

Se puede observar que en la expresión (17) la reflectancia espectral del interferómetro Fabry-Perot está formada por una multiplicación de dos funciones en el dominio de longitudes de onda. Entonces utilizando la propiedad de la Transformada de Fourier de convolución en la expresión (18), se tiene la convolución de ambas funciones en el dominio de la frecuencia como se expresa a continuación:

$$\tilde{I}(\lambda) = F \left[2 \left[\frac{\pi n L_{BG}}{\lambda_{BG}} \text{sinc} \frac{2n L_{BG} (\lambda - \lambda_{BG})}{\lambda_{BG}} \right]^2 \right] \otimes F \left[1 + \cos \left(\frac{4\pi n L_{FP}}{\lambda} + \varphi_0 \right) \right], \quad (20)$$

donde la transformada de Fourier de la ecuación (19) es la sumatoria de tres funciones triángulo, expresada como:

$$\tilde{I}(v) = \sum_{K=-1}^1 C_k \text{tri} \left(\frac{v - v_k}{\delta v} \right), \quad (21)$$

donde la función $\text{Tri}(x)$ está definida por $\text{Tri}(x) = \begin{cases} 1 & -|x| \leq |x| \leq 1 \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases}$ y el ancho espectral de

cada triángulo está definido por $\delta\nu = 2L_{BG}n / \lambda_B^2$ el cual depende de la longitud de la rejilla.

III.3 Relación de la Transformada de Fourier del espectro de reflexión del interferómetro de Fabry-Perot con la fase y el cambio de índice inducido por irradiación UV.

De la transformada de Fourier se puede obtener información sobre la fase del espectro de reflexión de (19), la cual se expresa en:

$$\varphi(\nu) = \tan^{-1} \frac{\text{Im}\tilde{I}(\nu)}{\text{Re}\tilde{I}(\nu)}. \quad (22)$$

De tal forma que esta fase puede ser calculada para cualquier espectro de reflexión del interferómetro de Fabry-Perot, que corresponde a la fase del término interferométrico expresado en la expresión (15). Esta fase es de gran utilidad, ya que conociendo el cambio de la fase de un espectro de reflexión del interferómetro sin irradiación y otro irradiado por pulsos UV, se puede obtener la diferencia de fases entre ambos espectros y por lo tanto determinar el cambio de índice inducido Δn_{uv} .

La configuración del arreglo experimental utilizado para realizar los experimentos de cambio de índice es mostrado en la figura 16 y será descrito detalladamente en la sección siguiente.

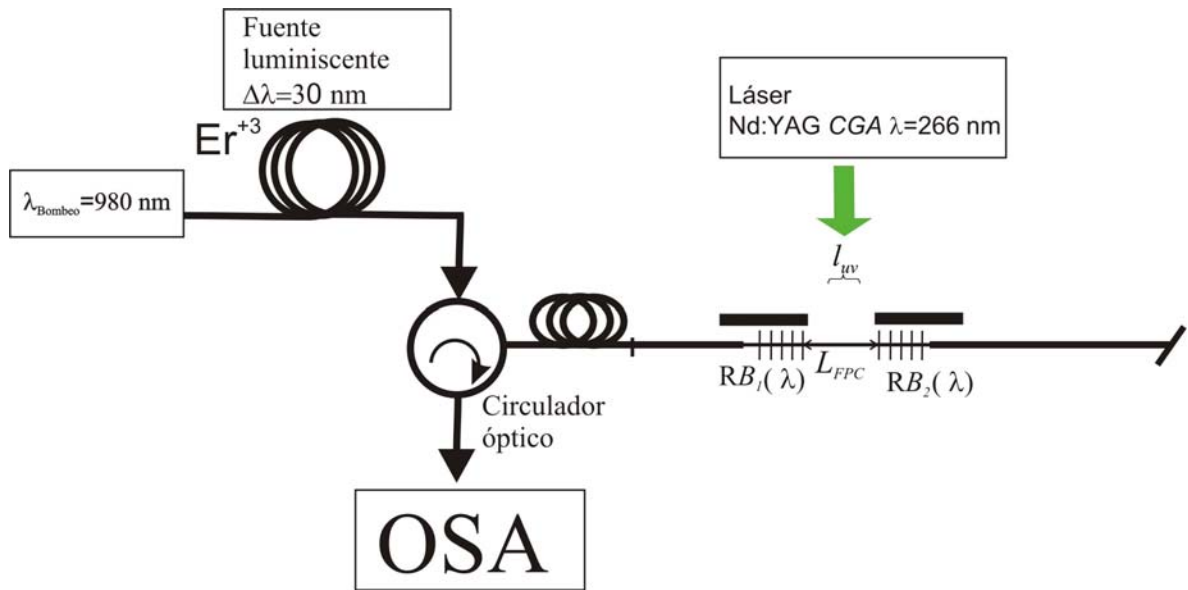


Figura 16. Arreglo utilizado para medir cambios de índice de refracción en fibras ópticas.

En la expresión (18), se puede ver que del argumento del término del coseno tiene una fase inicial denominada por φ_0 , esta fase puede ser calculada para el espectro de interferencia sin irradiación UV, o bien para la fase para el espectro de referencia y puede expresarse en la siguiente ecuación:

$$\varphi_0 = \frac{4\pi}{\lambda} (n_{orig} (L_{FP} - l_{uv}) + n_{orig} l_{uv}) + \varphi_{inic}, \quad (23)$$

donde n_{orig} es el índice de refracción efectivo de la fibra, L_{FP} es la distancia entre ambas rejillas y l_{uv} es el ancho del pulso UV que irradia a la fibra. Entonces para el interferómetro de referencia $l_{uv} = 0$ y se puede reducir a:

$$\varphi_0 = \frac{4\pi}{\lambda} n_{orig} L_{FP} + \varphi_{inic}, \quad (24)$$

y la fase cuando el interferómetro ha sido irradiado por un número de pulsos \mathcal{X} se expresa de la forma siguiente:

$$\varphi_{(x)} = \frac{4\pi}{\lambda} (n_{orig} (L_{FP} - l_{uv}) + n_{orig} l_{uv} + \Delta n_{uv} l_{uv}) + \varphi_{inic}, \quad (25)$$

entonces, reduciendo la ecuación (25) se tiene :

$$\varphi_{(x)} = \frac{4\pi}{\lambda} (n_{orig} L_{FP} + \Delta n_{uv} l_{uv}) + \varphi_{inic}, \quad (26)$$

por lo tanto, de las ecuaciones (24) y (26) se puede encontrar una diferencia de fase entre los espectros con y sin irradiación UV, expresada por:

$$\Delta\varphi_{uv} = \varphi_{(x)} - \varphi_0 = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta n_{uv} l_{uv}, \quad (27)$$

para cualquier $\Delta n_{uv} > 0$, por lo tanto en la expresión (27) se puede obtener directamente el cambio de índice inducido Δn_{uv} , como es expresado en la ecuación (28):

$$\Delta n_{uv} = \frac{(\varphi_{(x)} - \varphi_0)}{4\pi l_{uv}} \lambda. \quad (28)$$

III.4 Medición de fotosensibilidad utilizando interferómetro Fabry-Perot

El arreglo utilizado para los experimentos descritos en este capítulo es muy versátil, ya que permite realizar diferentes experimentos instalando diferentes componentes ópticos como la máscara de fase y la muestras de fibra óptica bajo prueba.

III.4.1 Características de dispositivos utilizados en arreglo experimental.

En esta sección se describen las características de los dispositivos utilizados en el arreglo experimental para realizar la medición del cambio de índice inducido por la irradiación de pulsos UV. El interferómetro Fabry-Perot está basado por dos RBG de reflectividad ultra baja. Este arreglo es mostrado en la figura 17.

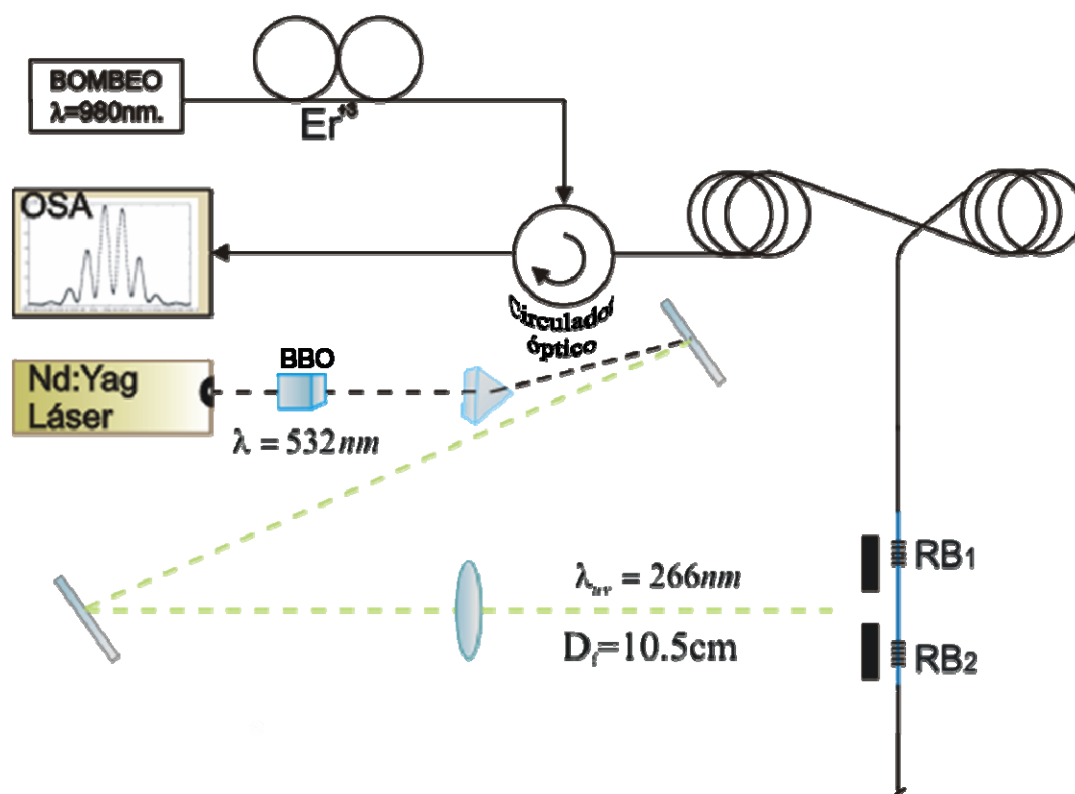


Figura 17. Arreglo experimental utilizado para medir cambio de índice de refracción en fibra ópticas.

Este arreglo permite obtener espectros de reflexión del interferómetro Fabry-Perot formado por las dos RBG antes y después de la irradiación UV, de tal forma que pueden ser grabados por el analizador de espectros ópticos, con el fin de ser procesados mediante un algoritmo que determina la fase relativa de los espectros irradiados por pulsos UV y de esta forma obtener el cambio de fase y el cambio de índice de refracción de los diferentes espectros irradiados con respecto al espectro de referencia.

Las características de los componentes del arreglo experimental mostrados en la figura 17, se describirán en diferentes etapas: Fuente, interferómetro Fabry-Perot, adquisición y fuente de irradiación UV.

a) Fuente: Está basada en una fuente luminiscente de amplio espectro y está formada por una fibra dopada con Er^{+3} de THORLABS que emite luz con un ancho espectral de $\Delta\lambda = 30\text{nm}$. Esta fuente utiliza como fuente de bombeo un diodo láser de NORTEL Networks P483720 a una longitud de onda de 980 nm , con una potencia aproximada de 55 mW y una corriente de 150mA . El diodo láser utiliza un controlador de corriente LDC 500 y un controlador de temperatura TEC 2000, ambos de la marca THORLABS. Se utilizó además un aislador óptico para asegurar que toda la señal de luz llegue al circulador para evitar retro reflexiones de la fibra dopada con erbio y evitar la formación de un efecto láser. La fuente luminiscente fue conectada a la entrada de un extremo de un circulador óptico. En la figura 18 se muestra un diagrama correspondiente para la fuente de amplio utilizada en el arreglo experimental utilizado para medir cambio de índice inducido.

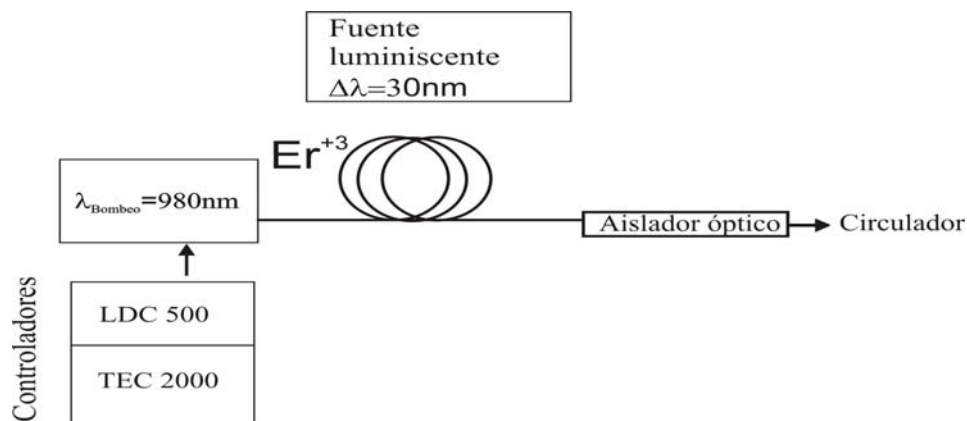


Figura 18. Esquema de fuente de amplio espectro basado en fibra dopada con Erbio.

b) Interferómetro Fabry-Perot: consistió en dos RBG grabadas bajo condiciones iguales sobre el núcleo de la fibra óptica en cada una de las muestras bajo prueba de fibra estándar SMF-28 de Corning y de la fibra fotosensible de Fibercore. La técnica utilizada para la grabación de RBG fue la de máscara de fase. El láser utilizado en esta técnica y para la irradiación UV a los interferómetros Fabry-Perot fue el láser de estado sólido de Nd:YAG con generación del cuarto armónico, emitiendo a una $\lambda=266 \text{ nm}$. Los parámetros para la RBG fueron: longitud $l = 2 \text{ mm}$ y longitud de onda de Bragg $\lambda_B = 1534.4 \text{ nm}$. Las longitudes de los interferómetros grabados en las muestras de fibra bajo prueba fueron entre 10 y 12 mm y serán descritos detalladamente en el capítulo IV donde se presentan los resultados experimentales.

c) La adquisición de datos fue realizada mediante el analizador de espectros ópticos de Advantest, modelo Q8384, y fue conectado a la salida del circulador óptico del arreglo experimental, para poder ser grabados. En la figura 19, se puede observar el espectro de reflexión de una sola RBG.

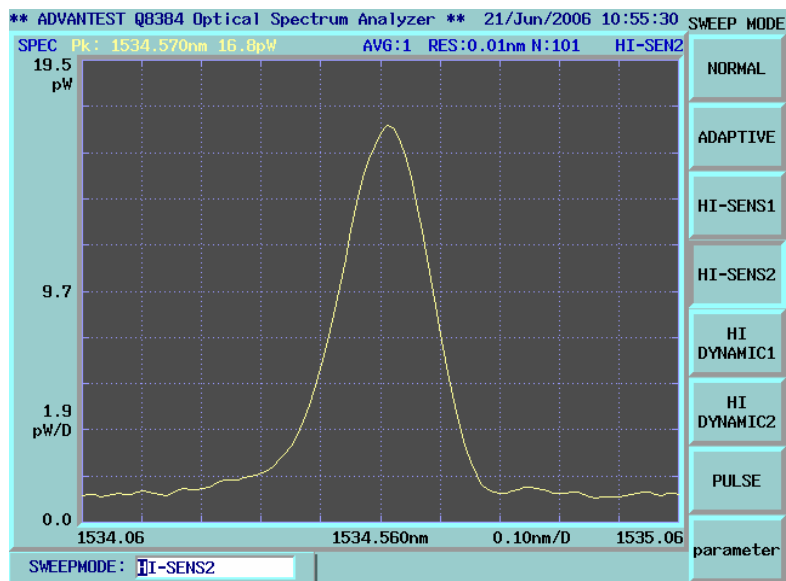


Figura 19. Espectro de reflexión de una RBG utilizando arreglo descrito en sección III.4.1.

Se puede observar también un espectro de reflexión para una cavidad o interferómetro de 9 mm de longitud grabada mediante el analizador de espectros ópticos como se muestra en la figura 20.

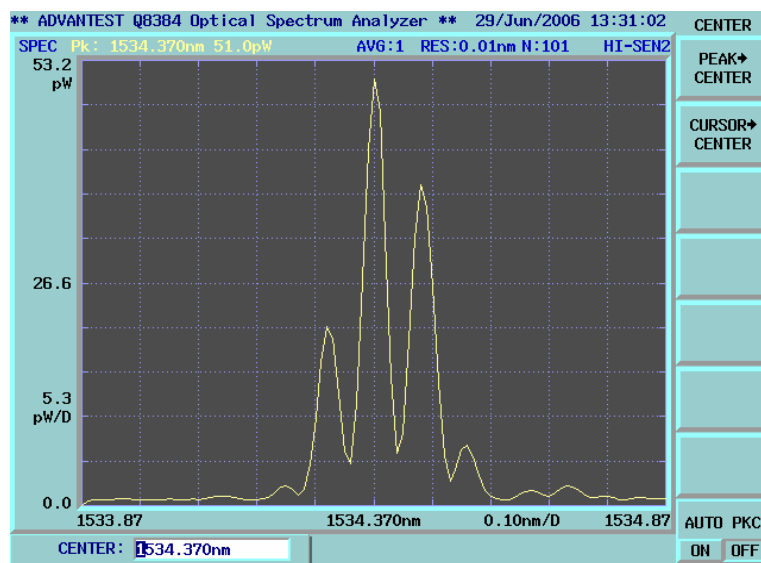


Figura 20. Espectro de reflexión de interferómetro Fabry-Perot formado por dos RBG de baja reflectividad.

d) La fuente de irradiación UV fue un láser de estado sólido Nd: YAG de Mini Lite II pulsado, a una longitud de onda fundamental $\lambda_0 = 1064nm$, pero su operación interna con generación de segundo armónico a $\lambda = 532nm$, por lo que para obtener la longitud de onda en la región UV $\lambda_{uv} = 266nm$ con la generación del 4to armónico de la longitud de onda fundamental. La duración de los pulsos fue de 4ns. Se utilizó además una lente cilíndrica para especificar la dosis de irradiación que con la que se afectaría a la fibra y como se observa en la figura 17.

III.4.2 Estabilidad del arreglo experimental

Un factor de gran importancia en la etapa experimental de este trabajo fue establecer la estabilidad del sistema, por lo que se determinó la estabilidad tanto para el analizador de espectros ópticos como para el láser utilizado para grabar las RBG e irradiar los interferómetros Fabry-Perot.

En primer lugar, se grabó una rejilla de Bragg en una muestra de fibra óptica para verificar la estabilidad del analizador de espectros ópticos respecto a variaciones de la circulación del aire dentro del laboratorio, es decir a las variaciones de la longitud de onda central, como se muestra en la figura 21. Se adquirieron 11 espectros muestra cada 3 minutos, para después ser procesados por un programa de MATLAB y obtener el promedio utilizando la siguiente ecuación:

$$C_{gr} = \frac{\sum Muestra_i(\lambda_i)}{\sum M_i}, \quad (29)$$

donde $Muestra_i(\lambda_i)$ es cada una de los espectros muestras y M_i es el número total de muestras.

Después del procesamiento de los espectros se determinó el promedio para los espectros muestras adquiridos con una desviación estándar $\sigma_{est} = 0.0012 \text{ nm}$, como se muestra en la figura 21.

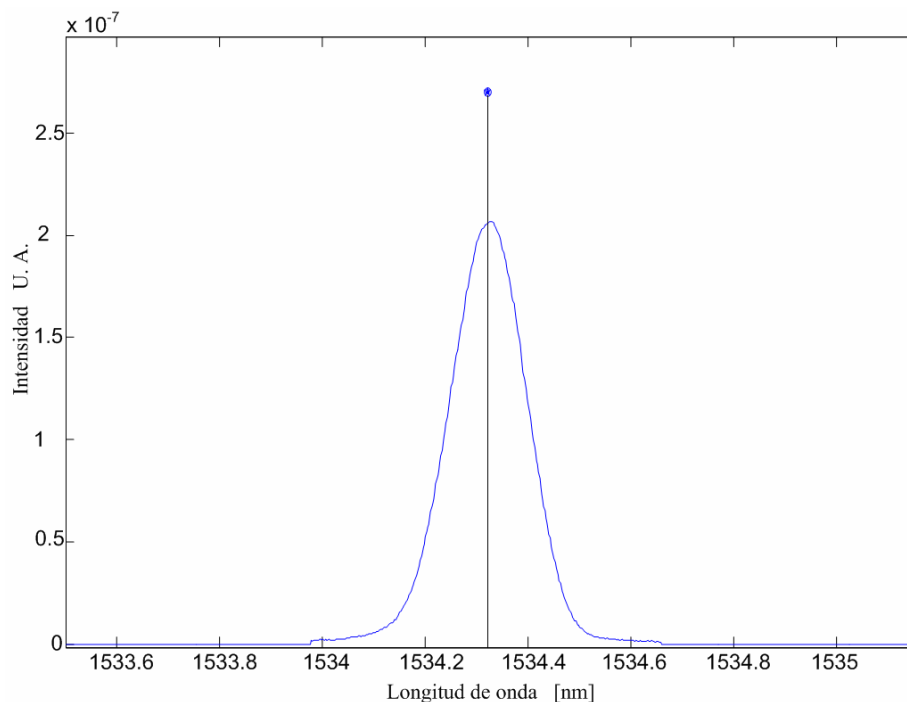


Figura 21. Representación de los promedios de 11 espectros adquiridos por el analizador de espectros ópticos.

También se observó durante el transcurso del tiempo que los espectros se desplazaban hacia la derecha, debido al aumento de temperatura del laboratorio debido al calentamiento producido por la operación continua del equipo durante al menos 4 horas. Entonces, para establecer la estabilidad del sistema, se realizó un experimento que consistió en grabar un interferómetro de 9 mm y aislarlo térmicamente de la circulación de aire dentro del laboratorio. Esta circulación de aire por convección puede afectar los resultados. El aislamiento consistió en envolver el interferómetro utilizando material de neopreno y

unicel. En este caso se adquirieron aproximadamente unos 30 espectros muestreados cada 3 minutos durante 1.5 Hrs.

Los espectros fueron procesados con un programa realizado en MATLAB para calcular el cambio de índice inducido por el desplazamiento de los espectros en función del tiempo transcurrido y por lo tanto determinar la estabilidad en términos de la desviación estándar, como es mostrado en la figura 22, donde se muestran los espectros muestreados No. 1, 15 y 30. En la figura 23 se muestra el comportamiento del cambio de índice determinado para todos los espectros muestreados debido al desplazamiento observado en la figura 22.

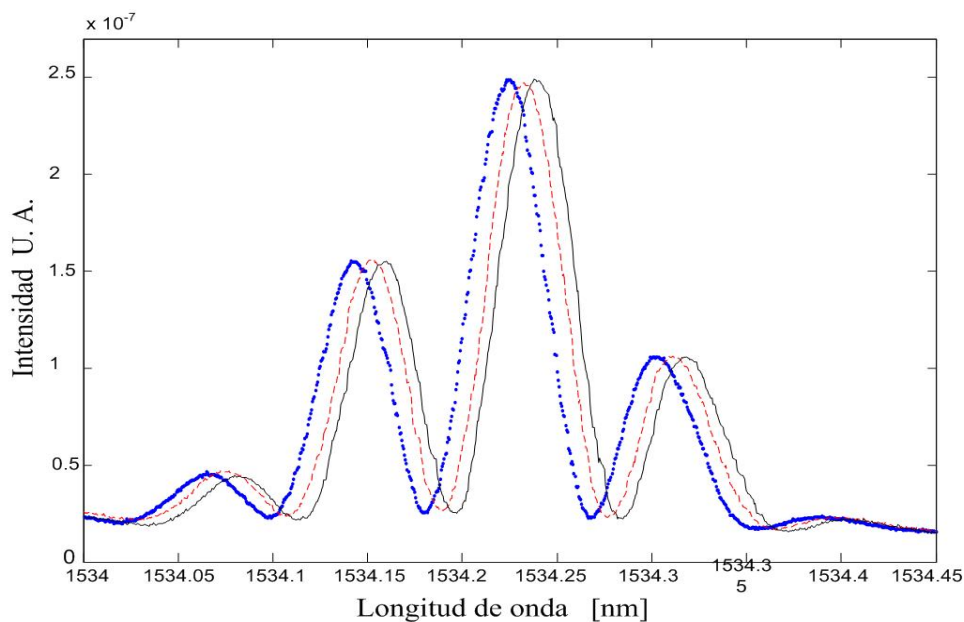


Figura 22. Interferómetro de 9 mm con desplazamiento de espectros.

De los espectros mostrados en la figura 22 se calculó la desviación estándar a partir del cambio de índice de los espectros muestreados adquiridos, siendo $\sigma_{est} = 6.93 \times 10^{-7}$, como es mostrado en la figura 23, lo que significa que la estabilidad del analizador de

espectros ópticos utilizado en el experimento es bastante aceptable. (Después de ~ 2 horas de calentamiento).

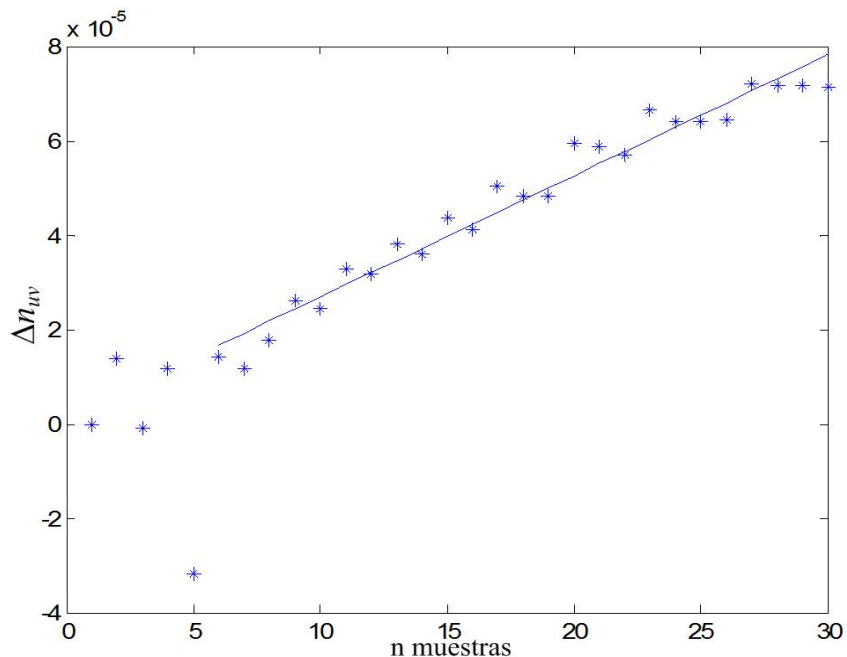


Figura 23. Estabilidad del sistema (corrimiento de índice durante 1.5 Hrs.).

Se realizó además un estudio sobre la estabilidad de la energía del láser, como se puede observar en la figura 24 se utilizó el láser descrito en sección III.4.1, también se utilizó un tramo de fibra óptica y un medidor de energía de Newport modelo 818-25B. El experimento consistió en medir energía de pulsos UV, utilizando la configuración del arreglo experimental mostrado en la figura 24, adquiriendo de esta forma un total de 30 mediciones con y sin fibra. La energía promedio por pulso fue de 0.598×10^{-3} J y obteniendo una desviación estándar de las mediciones $\sigma_{est} = 4.5 \times 10^{-6}$ J. Lo anterior permite determinar la estabilidad del láser de Nd:YAG pulsado, sí es aceptable.

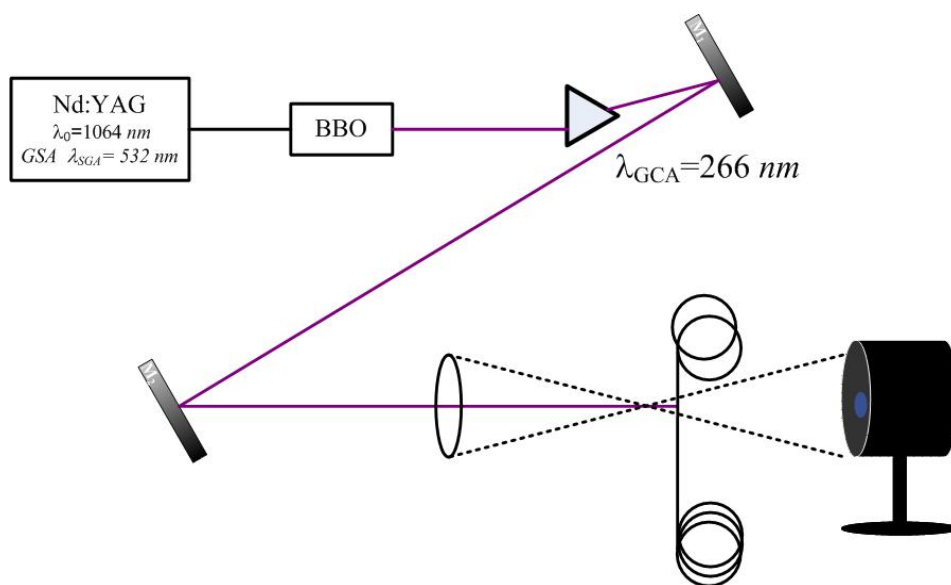


Figura 24. Arreglo experimental utilizado para determinar la estabilidad del láser UV.

III.4.3 Descripción de adquisición y procesamiento de datos.

En esta sección se describe como se realizó la adquisición de muestras y el procesamiento de datos experimentales para los experimentos de medición de fotosensibilidad en fibras ópticas. Inicialmente se grabó un interferómetro en el núcleo de la fibra bajo prueba con una longitud L_{FP} de 10 mm utilizando el arreglo mostrado en la figura 17. Las muestras de fibra óptica SMF-28 utilizada en los experimentos realizados en este trabajo fueron desforrados con una pistola de aire caliente, de la marca STEINEL modelo HL1502 S. La fibra óptica fue colocada de 5 a 10 s lo más cerca posible de la parte central de la tobera de salida de la pistola de aire caliente, que fue encendida 5 minutos antes del desforre de la fibra, para que la temperatura de esta se estableciera, evitando así que la fibra estuviera en contacto con la tobera de la pistola. La temperatura para este desforrado fue 1050°F y

debido a esta elevada temperatura el desforre de la cubierta plástica de la fibra óptica se puede remover fácilmente. La longitud de desforre en la fibra fue de unos 25 *mm* aproximadamente, en cambio para las muestras de la fibra óptica fotosensible de Fibercore utilizada, el desforre se realizó con alcohol y pinzas, las puntas o extremos de ambos tipos de fibras fueron clivadas a un ángulo mayor de 8°. Las rejillas impresas en el núcleo de la fibra para formar el interferómetro, fueron grabadas bajo condiciones iguales, es decir con un mismo número de pulsos e igual dosis de irradiación UV.

La adquisición de datos se realizó adquiriendo 5 espectros del espectro de reflexión del interferómetro sin irradiación de pulsos UV, para posteriormente ser promediados mediante un programa de MATLAB y establecer un espectro de referencia. Este mismo procedimiento fue repetido para los espectros de reflexión afectados por diferente número de pulsos UV, pero la adquisición fue realizada después de 3 minutos de haber realizado la irradiación UV al interferómetro, esto fue con el fin de que la fibra fuera reestablecida térmicamente. Cada espectro de reflexión fue adquirido con 1001 puntos espectrales de resolución para los diferentes espectros realizados.

Un ejemplo del procesamiento de datos es mostrado para el interferómetro #4, descrito posteriormente en el capítulo IV de resultados. En la figura 25 se muestran los espectros promedio del interferómetro irradiado por 15, 50 y 100 pulsos UV. Los cálculos de fase, cambio de fase y cambio de índice de refracción inducido fueron realizados mediante un programa de MATLAB, siguiendo el procedimiento descrito a continuación:

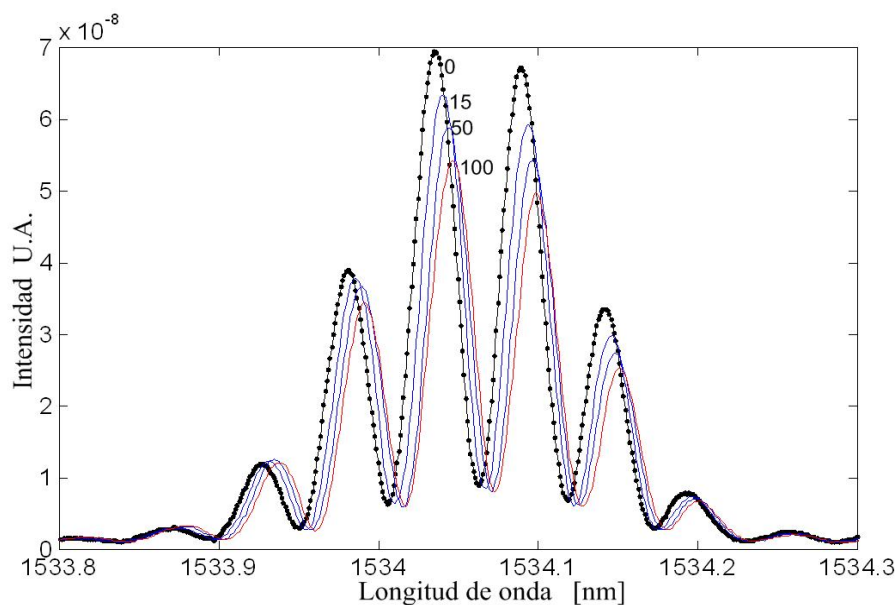


Figura 25. Espectros promedios del interferómetro # 4 irradiados con diferente número de pulsos UV.

Una vez procesados los espectros promedio correspondientes para un número dado de pulsos UV, se puede calcular la Transformada de Fourier para cada uno de ellos. Obteniendo las partes real e imaginaria de la Transformada de Fourier, se puede obtener información sobre la fase. La fase se determina en el punto máximo del espectro de potencia de la transformada de Fourier obtenida para cada espectro, como se muestra en la figura 26, donde se puede observar que este espectro de potencia tiene componentes diferentes de cero a bajas frecuencias para cada uno de los espectros bajo irradiación UV. Por lo tanto la fase puede ser calculada utilizando la ecuación (22). La fase calculada en función del número de pulsos irradiados es mostrada en la figura 27.

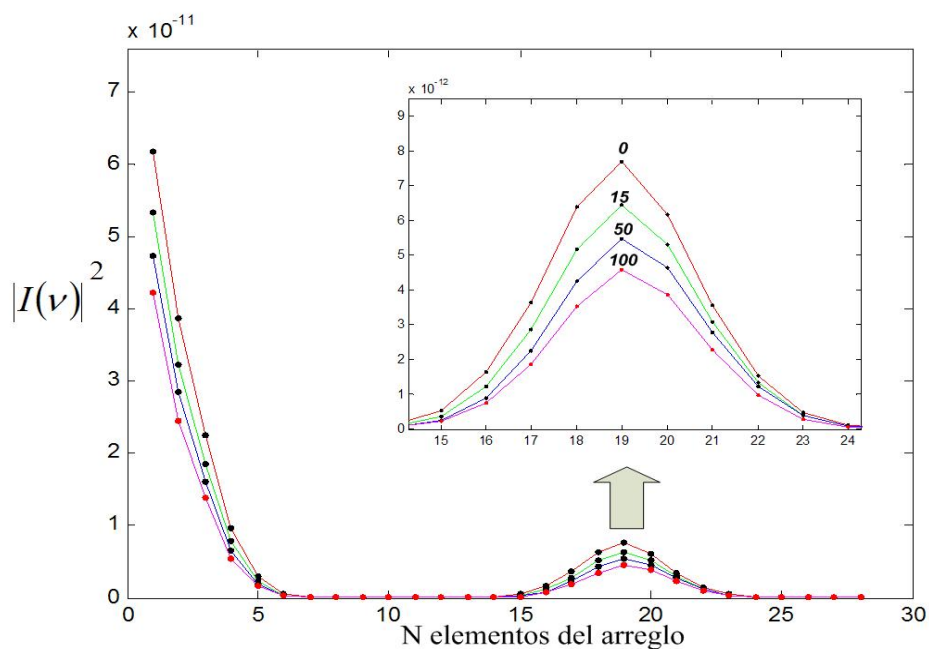


Figura 26. Módulo al cuadrado de la transformada de Fourier de los espectros correspondiente a 0,15, 50 y 100 pulsos UV.

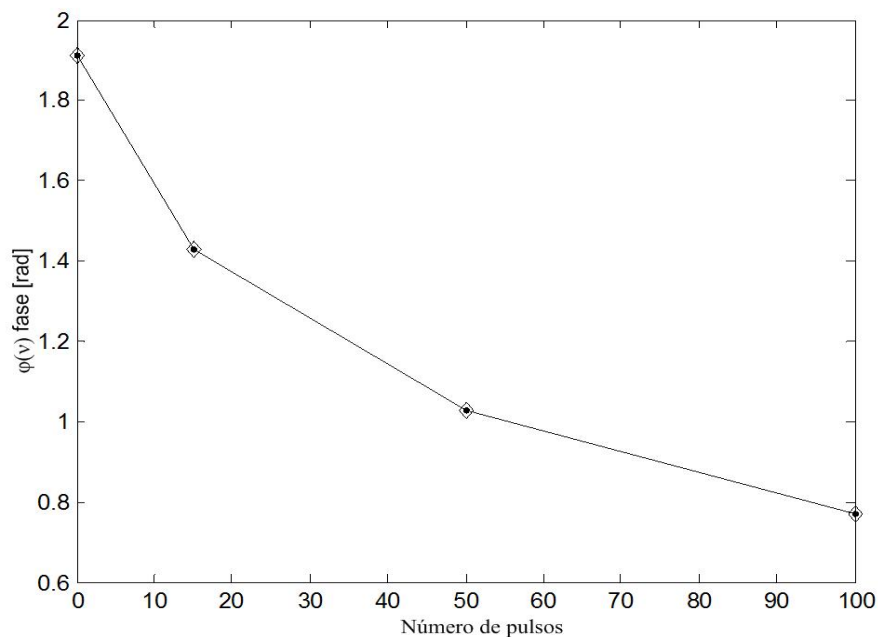


Figura 27. Comportamiento de fases relativas de espectro irradiado con 0, 5, 50 y 100 pulso UV.

Entonces el cambio de fase y el cambio de índice inducido pueden ser calculados por las ecuaciones (27) y (28) respectivamente. El comportamiento de ambos cambios puede observarse en las figuras 28 y 29, respectivamente.

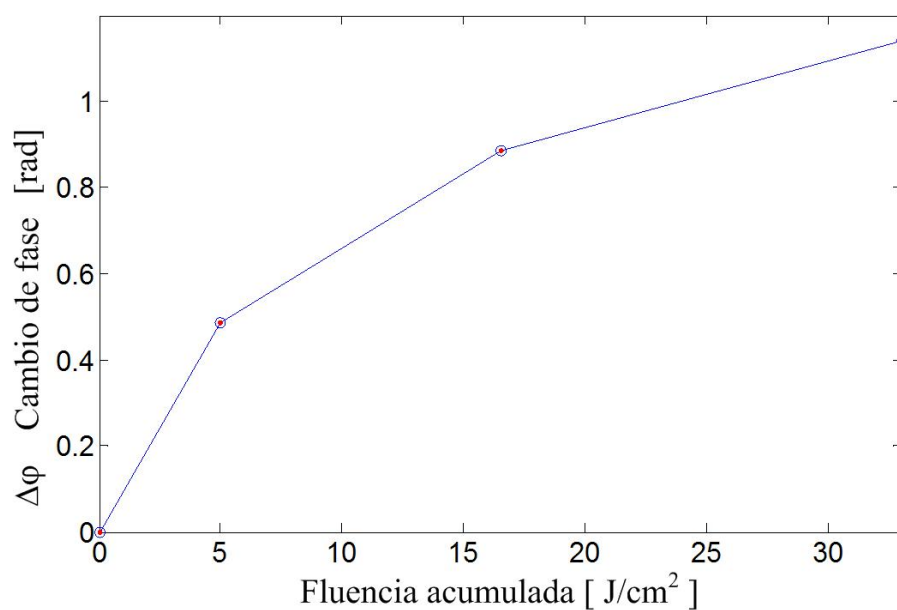


Figura 28. Cambio de fase de espectros con irradiación UV.

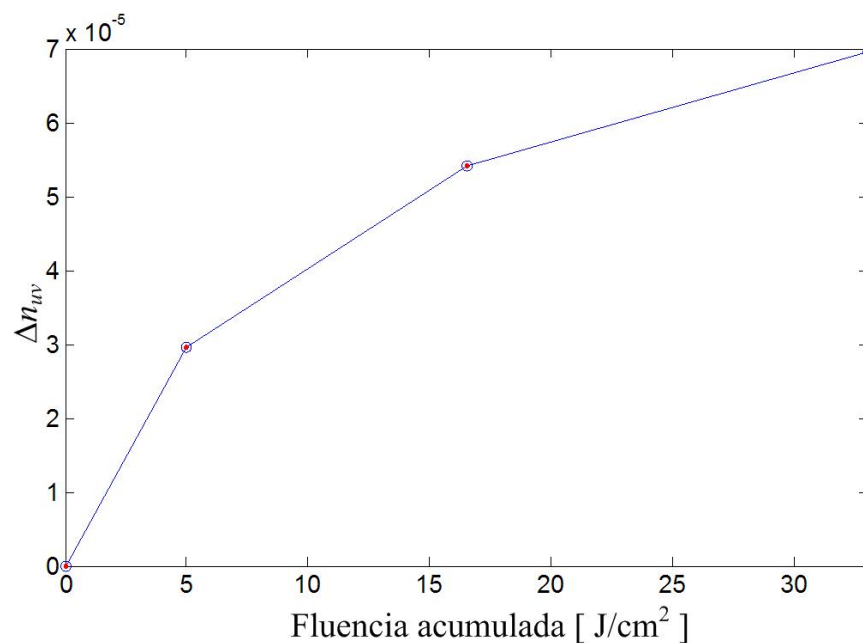


Figura 29. Cambio de índice inducido por 0, 15, 50 y 100 pulsos UV.

Capítulo IV *Resultados*

IV.1 Fotosensibilidad medida en fibra SMF-28 bajo diferentes dosis de irradiación UV.

En esta sección se muestran los resultados obtenidos utilizando el método interferométrico Fabry-Perot, descrito en capítulo III para la medición de la fotosensibilidad o el cambio de índice en fibra SMF-28 de Corning. Los experimentos fueron realizados utilizando el arreglo mostrado en la figura 17 y con el fin de que la fibra fuera reestablecida térmicamente, la adquisición de mediciones fue realizada aproximadamente 3 minutos después de la irradiación a cada interferómetro con pulsos UV.

IV.1.1 Fotosensibilidad medida bajo dosis de irradiación baja

En la figura 30 se muestra un espectro de reflexión del interferómetro Fabry-Perot (F-P) #1 con una longitud de 10 mm impreso en fibra óptica SMF-28 antes de ser irradiado por pulsos UV, dicho espectro fue adquirido por el analizador de espectros ópticos descrito en el capítulo IV,.

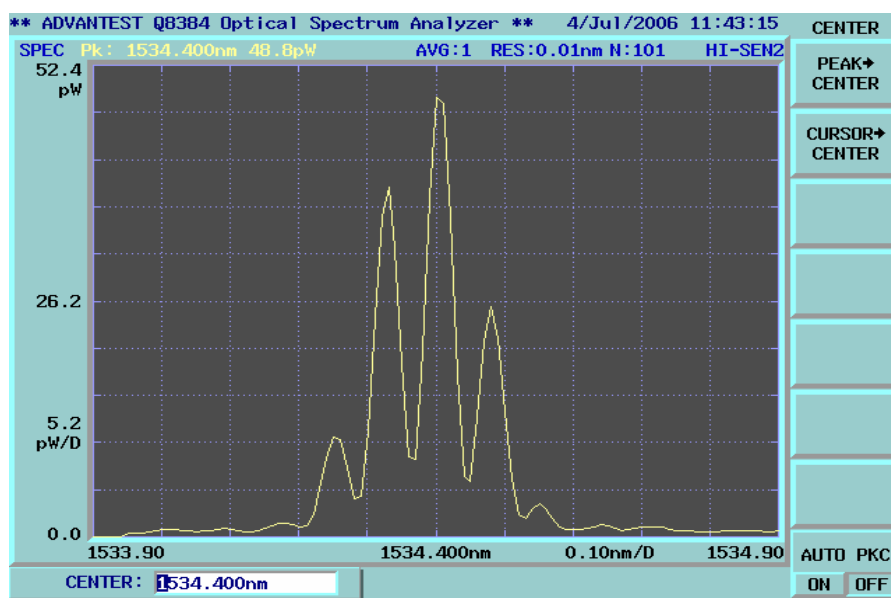


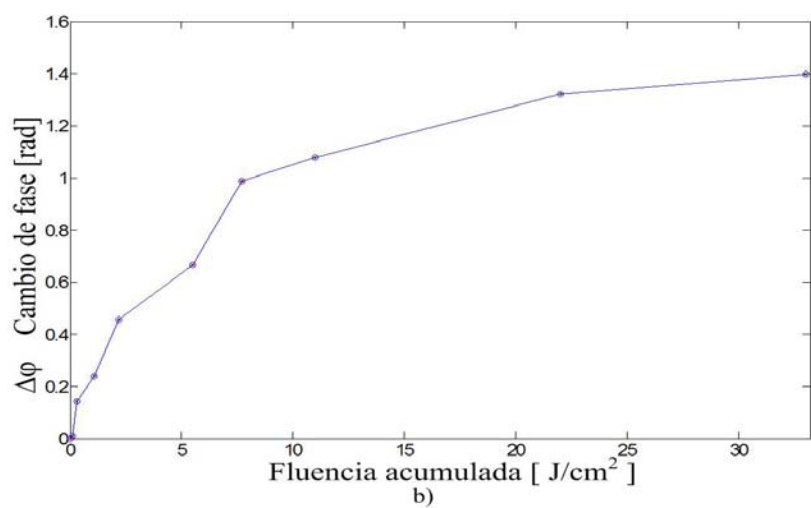
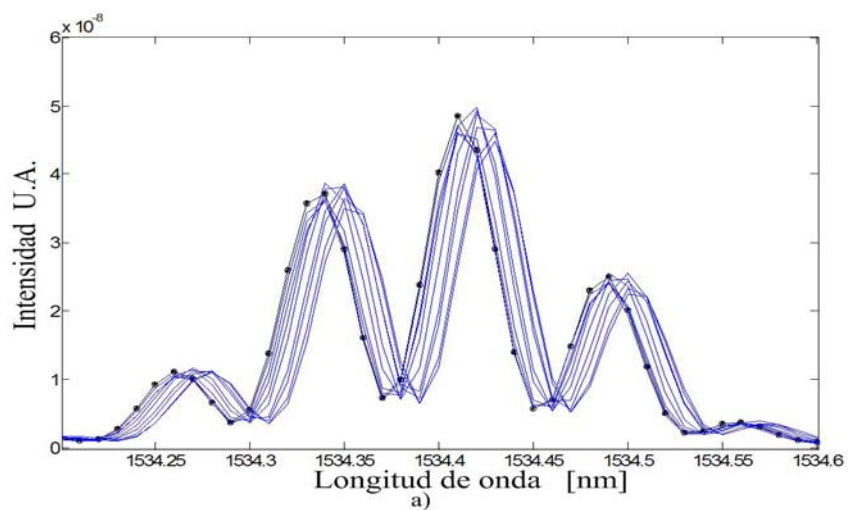
Figura 30. Espectro de reflexión de interferómetro Fabry Perot (F-P)#1.

Para simplificar la referencia de los diferentes resultados se irán nombrando a los interferómetros de acuerdo a su orden de aparición como interferómetro #1, interferómetro #2, etc. Todas las muestras utilizadas en estos experimentos fueron desforradas con pistola de aire caliente, como fue descrito en capítulo anterior.

Para el caso de fluencia por pulso baja se tienen tres resultados de medición de cambio de índice de refracción inducido con baja irradiación UV. Después de la irradiación de los pulsos UV sobre los interferómetros bajo prueba, fueron adquiridos 5 espectros mediante el analizador de espectros ópticos para posteriormente ser promediados y procesados mediante el programa MATLAB; para obtener la fase relativa de cada espectro de reflexión, el cambio de fase y por lo tanto el cambio de índice de refracción inducido por la irradiación UV, como fue explicado en el capítulo anterior. En las figuras mostradas en esta sección el espectro promediado de referencia es indicado con puntos, mientras que los espectros promediados de los interferómetros bajo la irradiación de diferente número de pulsos UV son mostrados por una línea continua y serán mencionados como espectros en vez de espectros promediados. Los resultados de cambio de fase y cambio de índice inducido mostrados en esta sección son expresados en función de la fluencia acumulada y del número de pulsos de irradiación UV, y son mostrados con una línea continua sólo como una unión de puntos.

El interferómetro # 1 fue grabado con una longitud de 9 mm bajo las siguientes condiciones: fluencia por pulso de 0.022 J/cm^2 . Este interferómetro fue irradiado por: 0, 5, 15, 50, 100, 250, 350, 500, 1000 y 1500 pulsos UV y los espectros de reflexión

correspondientes son mostrados en la figura 31 a). El cambio de fase se muestra en la figura 31 b) y el cambio de índice inducido por pulsos UV es mostrado en la figura 31 c).



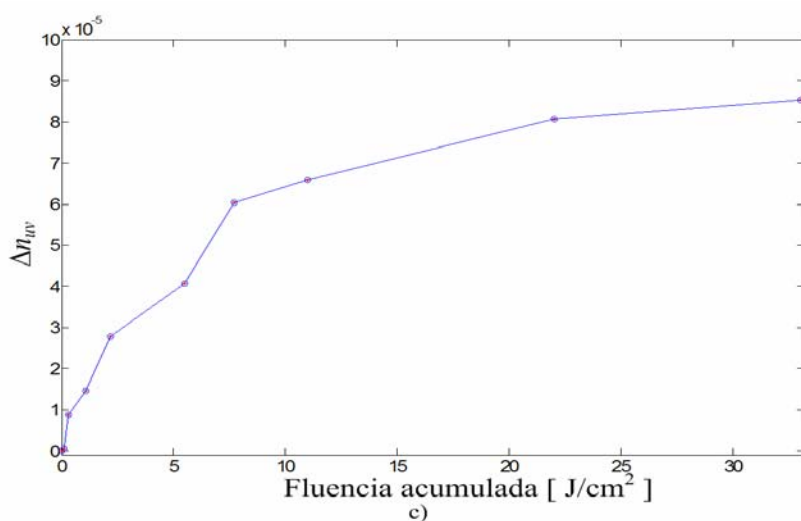
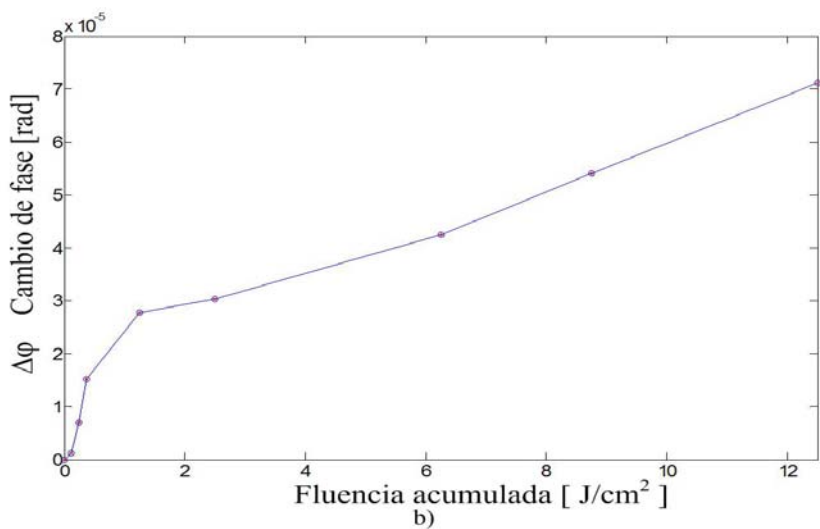
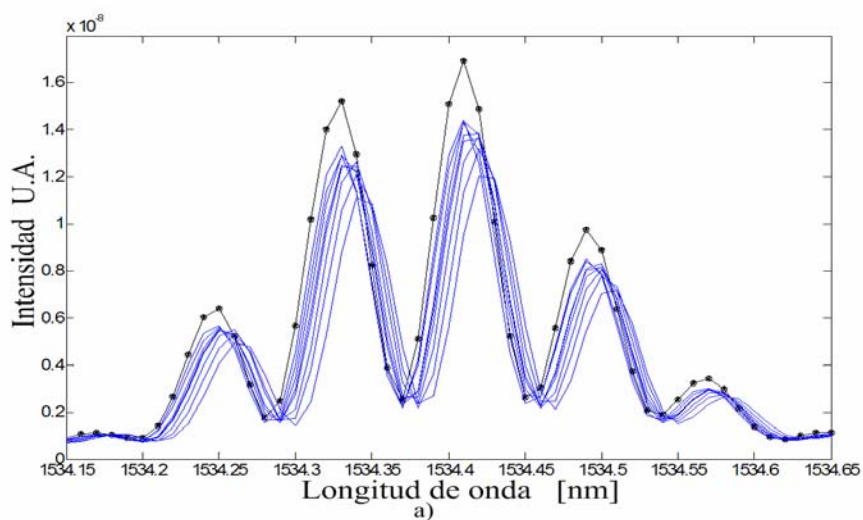


Figura 31. Interferómetro #1 a) Espectros del interferómetro bajo irradiación con diferente número de pulsos UV; b) cambio de fase, c) cambio de índice de refracción Δn_{UV} .

Se puede observar en la figura 31 a) que los espectros de reflexión correspondientes a 5, 15, 50, 100, 250, 350, 500, 1000 y 1500 pulsos UV, aparecen de izquierda a derecha, respectivamente, de forma similar aparecen para los interferómetros descritos posteriormente en esta sección, con excepción del interferómetro # 6. Estos desplazamientos hacia la derecha indican que el cambio de fase y de índice de refracción inducidos son positivos. Además se puede observar que en este interferómetro, el cambio de índice de refracción inducido por la irradiación UV es del orden de 10^{-5} para un nivel de fluencia acumulada de 33 J/cm^2 .

El interferómetro # 2 fue grabado en la fibra con una longitud de 10 mm bajo las siguientes condiciones: Un nivel de fluencia por pulso de 0.025 J/cm^2 . La irradiación de este interferómetro fue con 0, 5, 10, 15, 50, 100, 250, 350, 500 pulsos UV. Los espectros de referencia y el obtenido bajo irradiación son mostrados en la figura 32 a), el comportamiento de cambio de fase de cada espectro y el cambio de índice inducido por los pulsos UV son mostrados en las figuras 32 b) y c), respectivamente.

En el caso del interferómetro # 3 fue grabado en la fibra con una longitud de 10 *mm* bajo las mismas condiciones de fluencia por pulso que el interferómetro #2, sólo que fue irradiado por un número de pulsos UV mayor: 0, 100, 250, 350, 500, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500, 4000, 4500, 5000, 5500, 6000, 6500, 7000, 7500, 8000. Los espectros de referencia y los modificados por la irradiación de pulsos UV correspondientes, el cambio fase para cada uno de los espectros irradiados y cambio de índice inducido por los pulsos UV son mostrados en las figuras 33 a), b) y c) respectivamente.



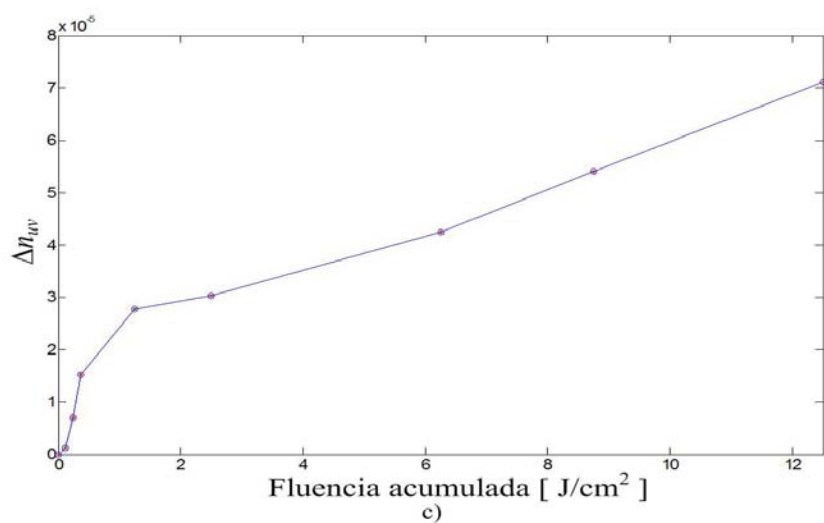
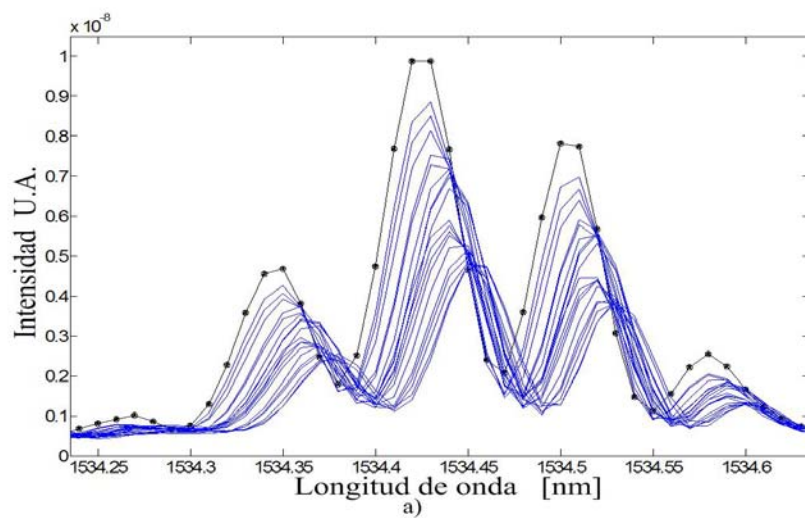


Figura 32. Interferómetro #2 a) Espectros de interferómetro irradiados con diferente número de pulsos UV; b) cambio de fase, c) cambio de índice de refracción inducido.



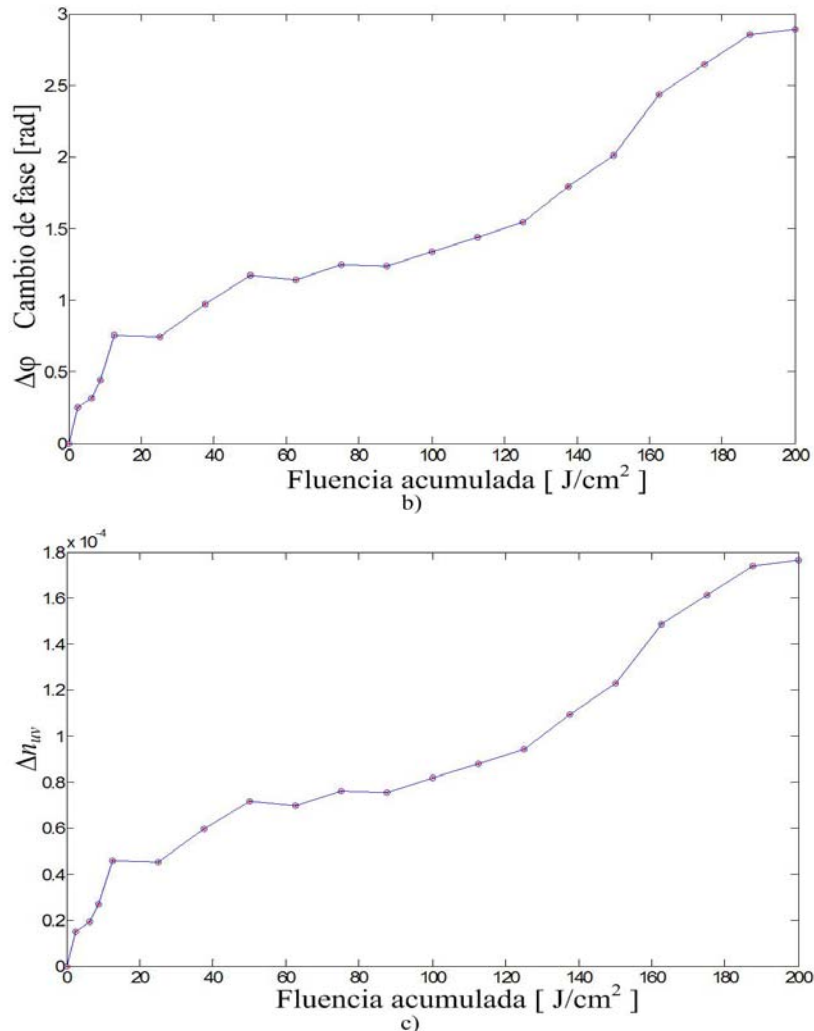


Figura 33. Interferómetro #3 a) Espectros de interferómetros irradiados con diferente número de pulsos UV; b) cambio de fase, c) cambio de índice de refracción inducido.

En el interferómetro #3 se obtuvo un Δn_{UV} del orden 10^{-4} para un nivel de fluencia acumulada de 200 J/cm^2 , como se observa en la figura 33 c). Este interferómetro fue irradiado por un número de pulsos mayor que para el interferómetro #2, en el cual se irradió a un nivel fluencia acumulada de 12.5 J/cm^2 , obteniendo un cambio de índice de refracción Δn_{UV} del orden de 10^{-5} , similar para el interferómetro # 1 donde se utilizó un nivel de fluencia acumulada fue de 33 J/cm^2 .

IV.1.3 Fotosensibilidad medida bajo dosis de irradiación intermedia

El interferómetro #4 fue grabado en fibra con una longitud de 12 mm bajo las siguientes condiciones: Un nivel de fluencia por pulso de 0.33 J/cm^2 . Este interferómetro fue irradiado por 15, 50 y 100 pulsos UV, como se muestra en la figura 34 a)

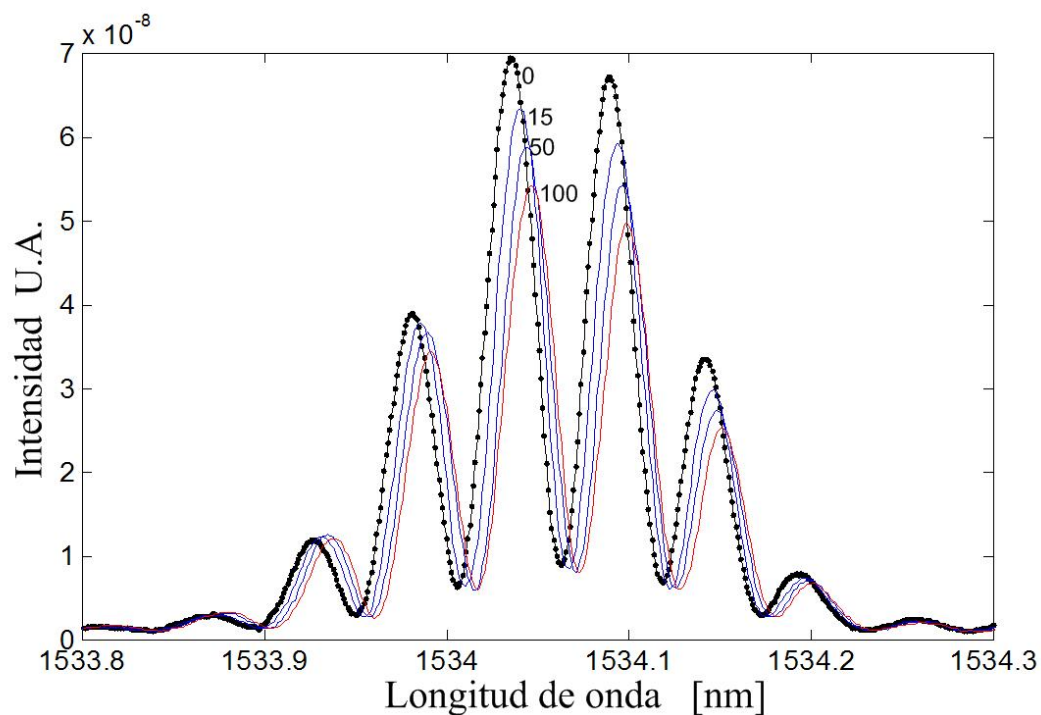
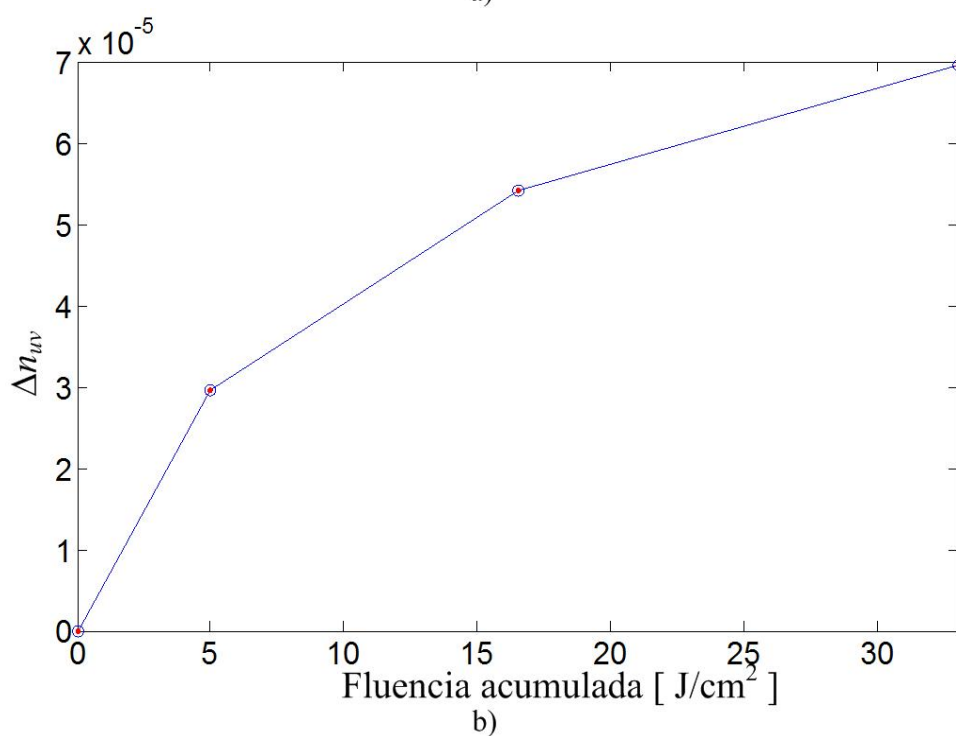
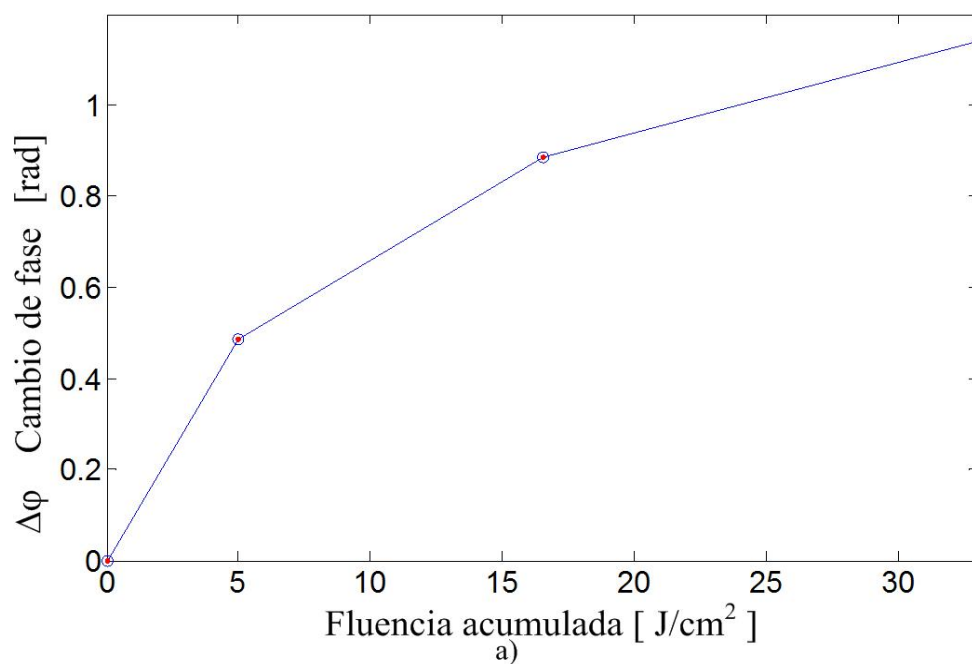


Figura 34. Interferómetro # 4 a) Espectros de interferómetros irradiados con diferente número de pulsos UV.

Los comportamientos de cambio de fase y cambio de índice inducido con pulsos UV, son mostrados en las figuras 35 a) y b).



Figuras 35. Interferómetro #4; a) cambio de fase, b) cambio de índice de refracción inducido Δn_{UV} .

Se puede observar que a dosis de irradiación por pulso de 0.33 J/cm^2 se tiene un cambio de índice inducido del orden de 10^{-5} . Este nivel de fluencia acumulada de 33 J/cm^2

es similar al interferómetro # 1, pero a diferencia de aquel, se utilizó un número menor de pulsos UV y una fluencia por pulso aproximadamente 16 veces mayor. Lo anterior significa que se puede obtener un Δn_{UV} similar para a un determinado nivel de fluencia acumulada sin importar que ésta sea compuesta por una fluencia por pulso baja y un número grande de pulsos, o bien utilizando fluencias por pulso intermedia y un número de pulsos pequeños

IV.1.4 Fotosensibilidad medida bajo dosis de irradiación alta

En este último caso de dosis de irradiación alta se muestran dos resultados. En el primero muestra un espectro de reflexión del sensor interferométrico Fabry-Perot #5 con una longitud de 10 mm. Este interferómetro fue irradiado por: 0, 1, 5, 10, 30 y 40 pulsos UV utilizando un nivel de fluencia por pulso de $0.66 J/cm^2$, los espectros de referencia y modificados por la irradiación correspondientes al interferómetro son mostrados en la figura 36 a), mientras que los comportamientos de cambios de fase y cambio de índice se pueden observar en las figuras 36 b) y c), respectivamente.

En este caso de alta dosis de irradiación UV no se tomaron en cuenta los espectros de los 30 y 40 pulsos irradiados para obtener el cambio de fase y cambio de índice inducido por la irradiación de pulsos UV, ya que se puede observar que dichos espectros tienen diferente periodicidad que los demás espectros. Se puede observar que los espectros presentan un desplazamiento hacia la derecha, obteniendo así un cambio de fase y de índice de refracción inducidos positivos, como en los casos de irradiación baja e intermedia.

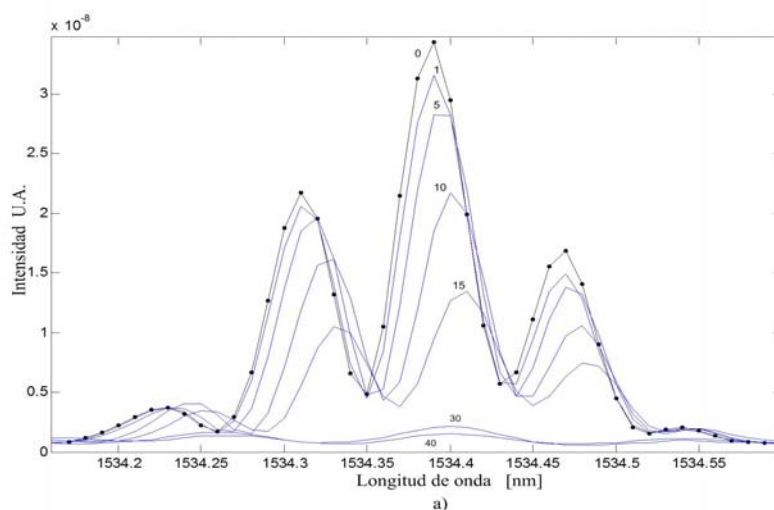


Figura 36. a) Espectros promedios de interferómetro #5 bajo irradiación UV pulsada

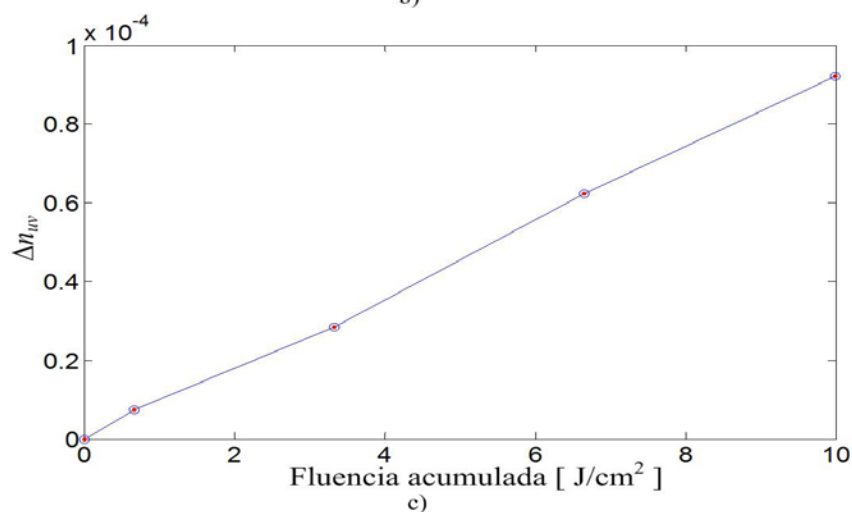
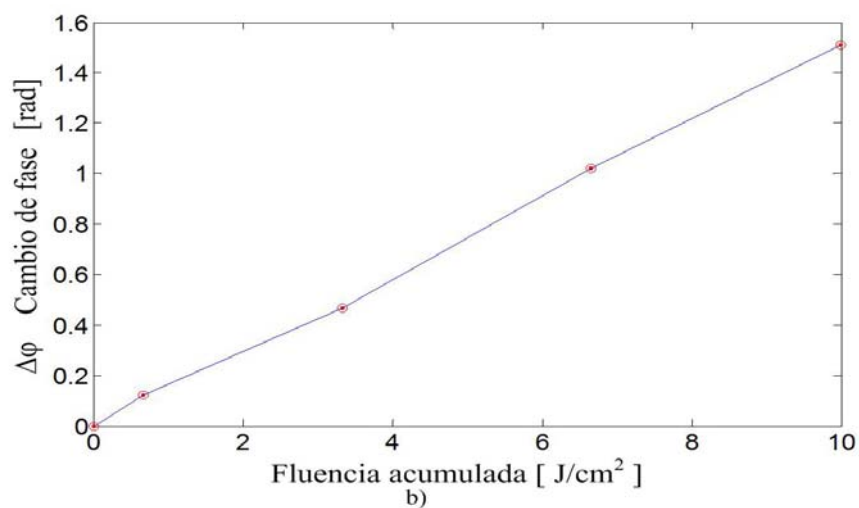


Figura 36. Interferómetro #5 b) Cambio de fase, c) Cambio de índice de refracción inducido.

El interferómetro #6, fue impreso en la fibra bajo las mismas condiciones de interferómetro # 5, sólo que fue irradiado por 1, 5, 10, 20 y 40 pulsos. Los espectros correspondientes se pueden observar en la figura 37 a).

De manera similar que en interferómetro #5, se puede observar que los espectros de reflexión bajo 10, 20 y 40 pulsos UV, tuvieron un cambio en la periodicidad, por lo que tampoco fueron considerados para obtener el cambio fase y el cambio de índice inducido, como puede ser observado en las figuras 38 b) y c).

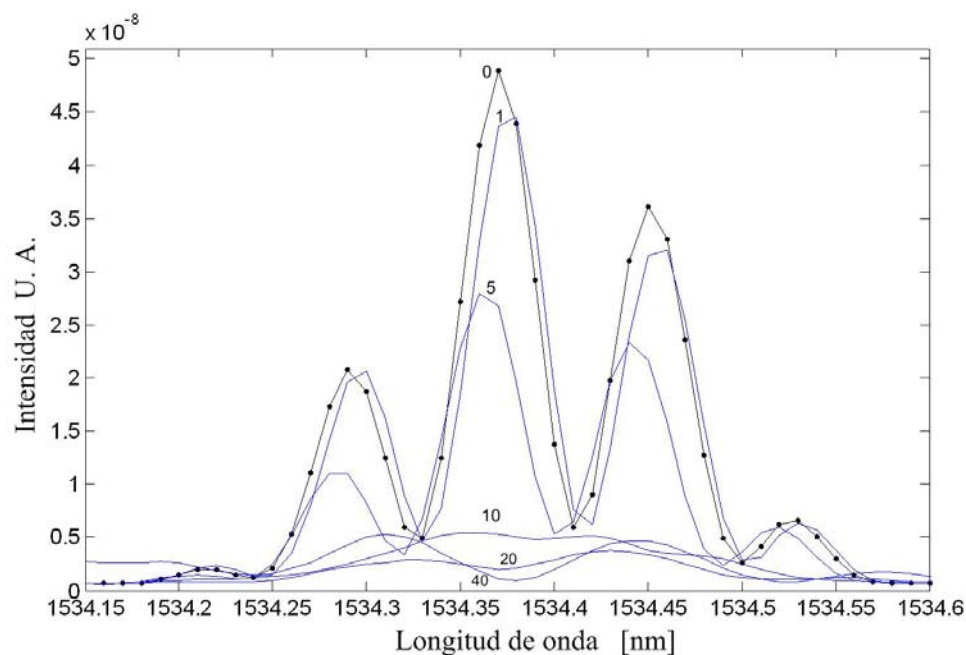


Figura 37. Interferómetro #6 a) Espectros de interferómetro irradiado con diferente número de pulsos UV.

En este caso de alta dosis de irradiación UV, se observa que los espectros irradiados tuvieron un corrimiento hacia la izquierda, causando así cambios de fase negativos y por consiguiente cambios índice de refracción inducidos también negativos.

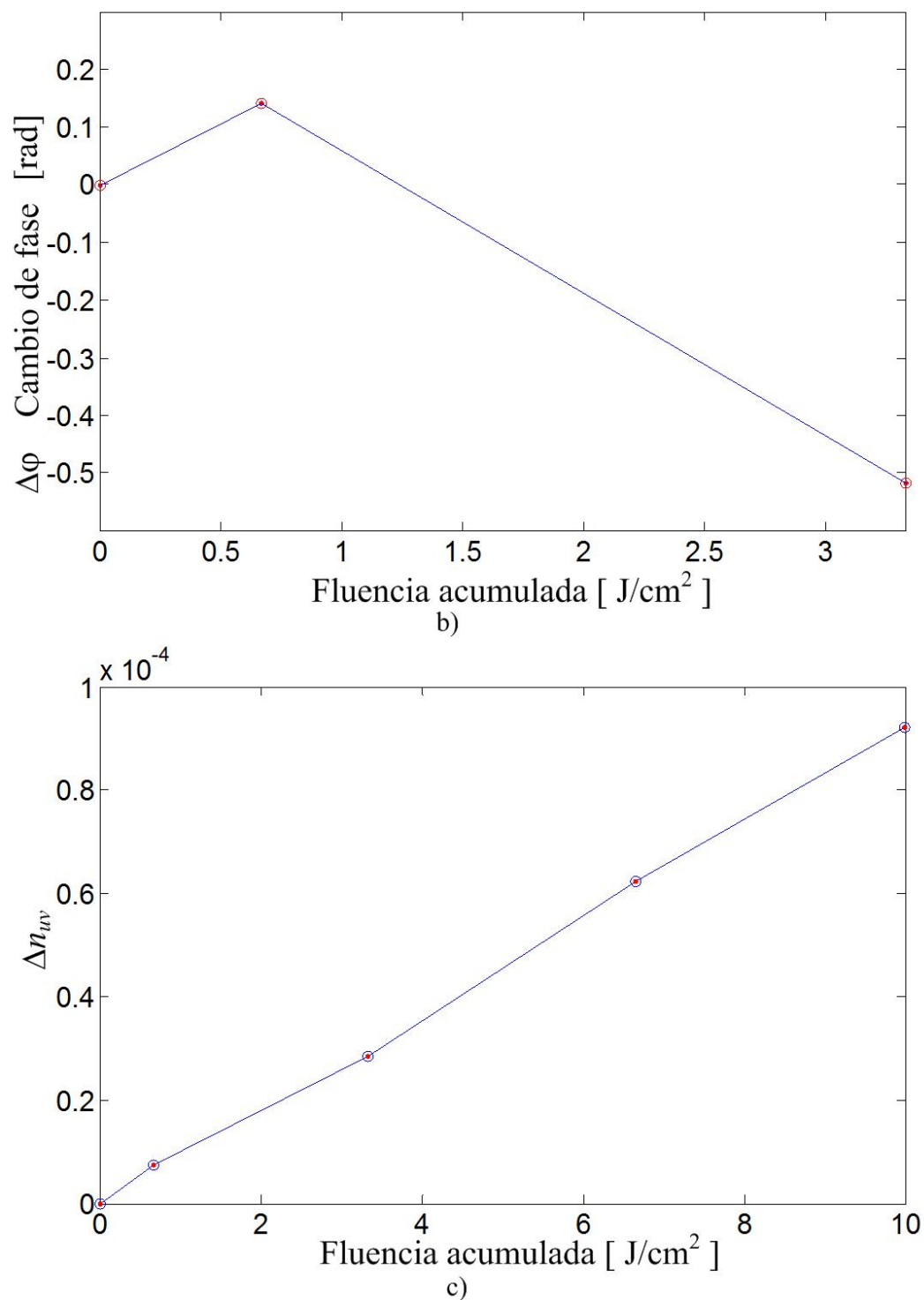


Figura 38. Interferómetro #6 b) Cambio de fase, c) Cambio de índice de refracción inducido.

En el interferómetro #5 se pudo obtener con un nivel de fluencia acumulada de 9.9 J/cm^2 y un cambio de índice Δn_{uv} de casi 10^{-4} , pero está en el límite de daño de fibra, por lo que para dosis de irradiación altas la fibra puede sufrir daños físicos como son fracturas y rompimiento. Estas fracturas o desprendimiento físico del núcleo de la fibra bajo irradiación UV pueden formar un nuevo interferómetro dentro del interferómetro original y de esta forma cambiar la periodicidad del interferómetro. La irradiación para nivel de fluencia por pulso alta es difícil de controlar, ya que la fibra puede romperse durante los primeros o un cierto número de pulsos y también dependiendo de la calidad de la fibra o de la distribución de la fluencia del haz láser sobre la fibra óptica, que en este tiene perfil gaussiano, es decir, tiene más fluencia en el centro que en los extremos. Esta característica del haz del láser impide controlar de manera precisa la distribución de irradiación sobre la fibra.

IV.2 Fotosensibilidad medida en fibra óptica fotosensible de Fibercore utilizando método interferométrico Fabry-Perot de RBG.

La medición de cambio de índice inducido también fue realizada en la fibra óptica fotosensible de Fibercore. Los interferómetros grabados en esta fibra se fabricaron con una mayor longitud, con el fin de verificar los efectos de disminución de franjas observados en los interferómetros grabados en fibra óptica SMF-28. Los dos interferómetros fueron grabados con 20 mm de longitud y fueron irradiados por: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 140 y 200 pulsos UV. En el caso del interferómetro # 7 fue grabado bajo las siguientes condiciones de irradiación UV: fluencia por pulso de $0.190 J/cm^2$. Para una mejor apreciación, los espectros de el interferómetro bajo irradiación de: 0, 1, 5, 10, 50, 80 y 200 pulsos UV son mostrados en las figuras 39 a) y b) respectivamente. Los comportamientos de cambio fase y cambio de índice inducido por irradiación UV son mostrados en las figuras 40 c) y d), respectivamente.

El interferómetro #8 fue irradiado bajo las condiciones siguientes: fluencia por pulso de $0.255 J/cm^2$. Los espectros del interferómetro correspondientes a antes y después de la irradiación son mostrados en las figuras 41 a) y b). El cambio de fase y cambio de índice inducido por los pulsos UV son mostrados en las figuras 42 c) y d), respectivamente.

En las figuras 40 y 42 d) se pueden observar cambios abruptos del cambio de índice inducido marcados por líneas discontinuas. Este comportamiento se debe a que los primeros 10 pulsos fueron irradiados uno por uno cada 3 minutos, mientras para los 20 a 90 pulsos fueron irradiado en trenes de 10 pulsos, y para los 140 y 200 pulsos fueron

irradiados en trenes de 50 y 60 pulsos, donde cada tren de pulsos fue suministrado a una frecuencia de repetición de 1 Hz.

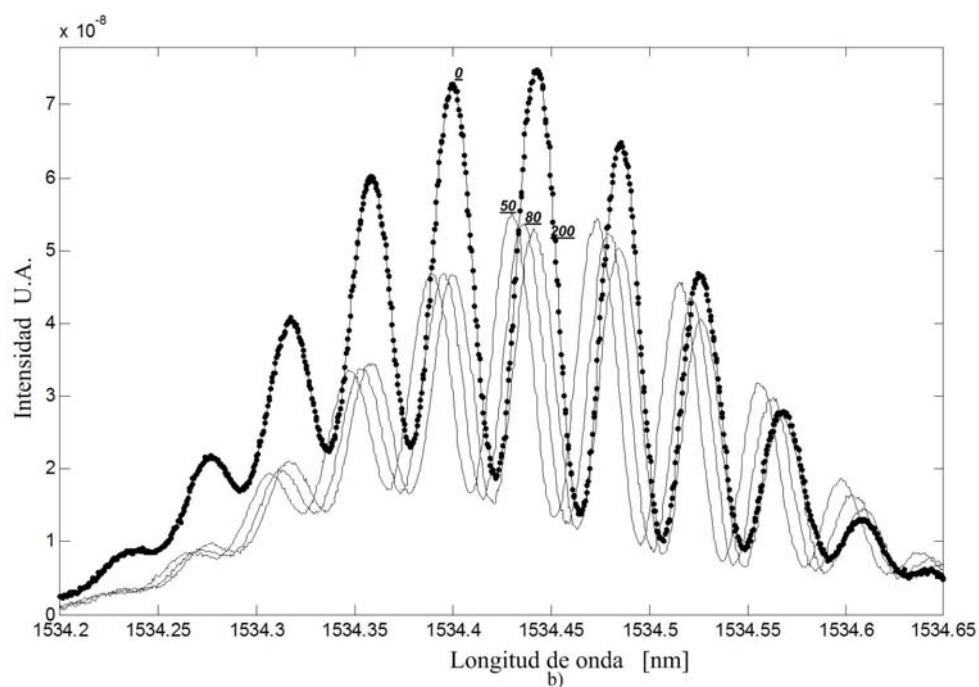
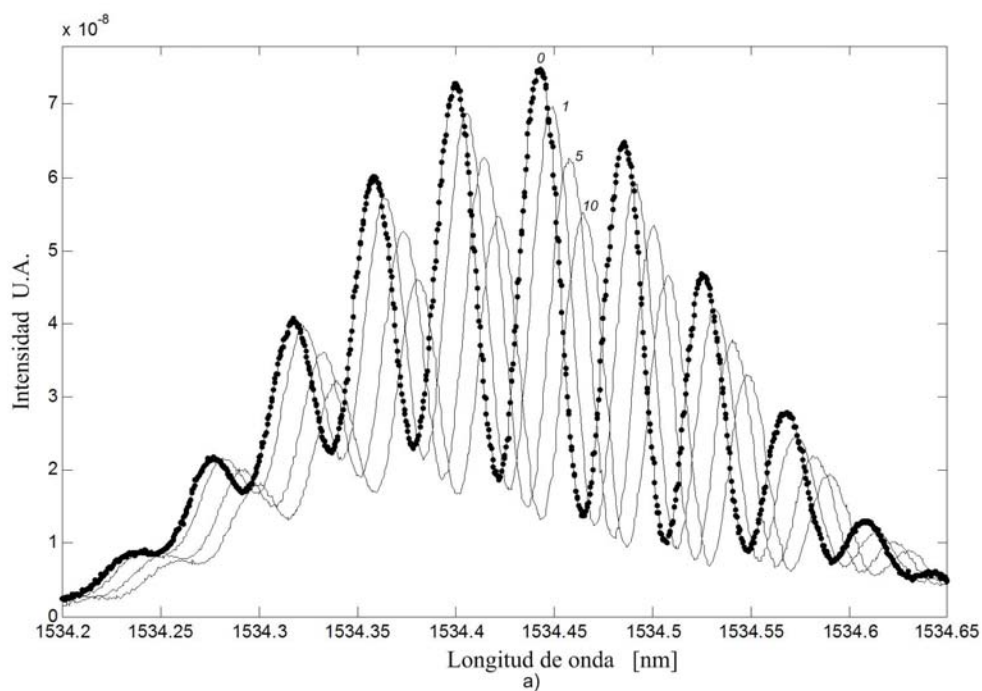
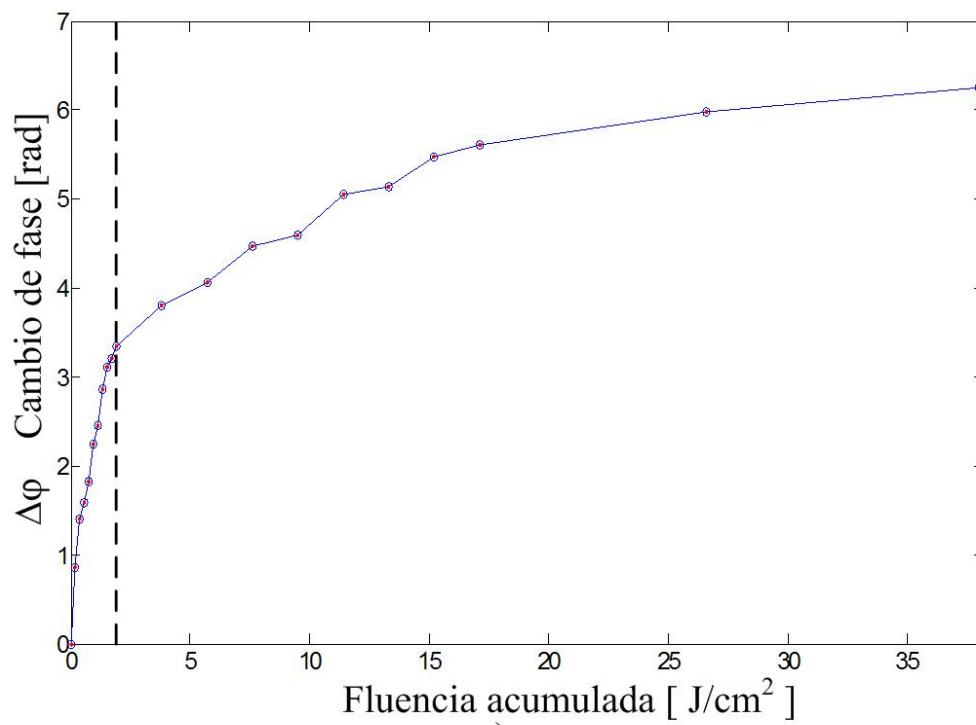
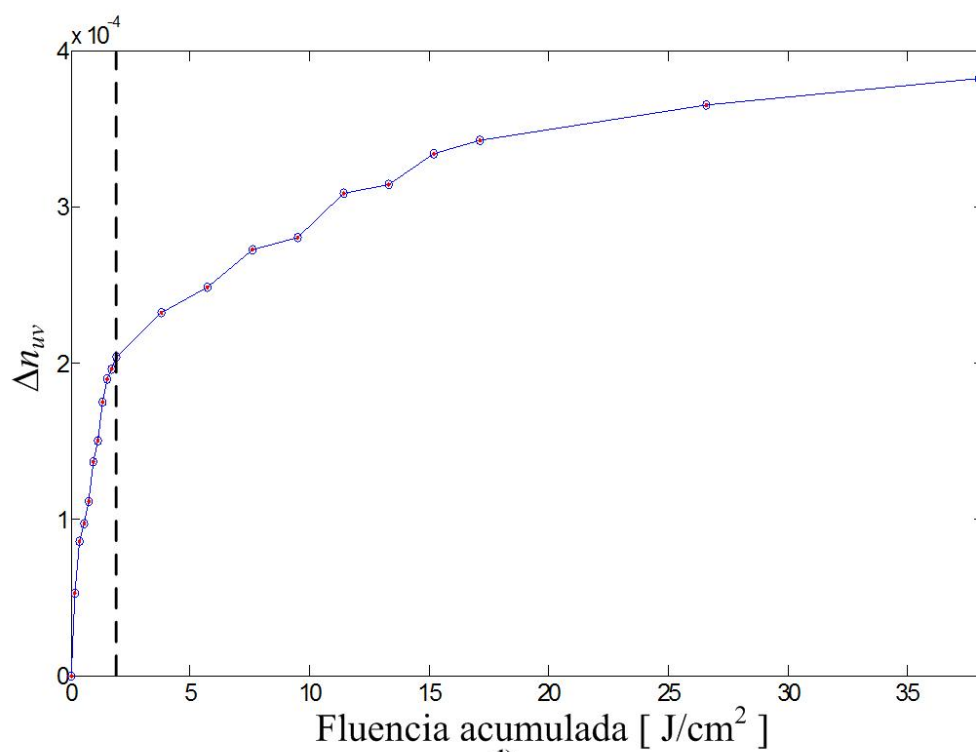


Figura 39. Interferómetro #7 a) Espectros de interferómetro irradiados con 1, 5 y 10 pulsos UV. b) Espectros de interferómetro irradiados con 50, 80 y 200 pulsos UV.



c)



d)

Figura 40. Interferómetro #7 b) Cambio de fase, c) Cambio de índice de refracción inducido.

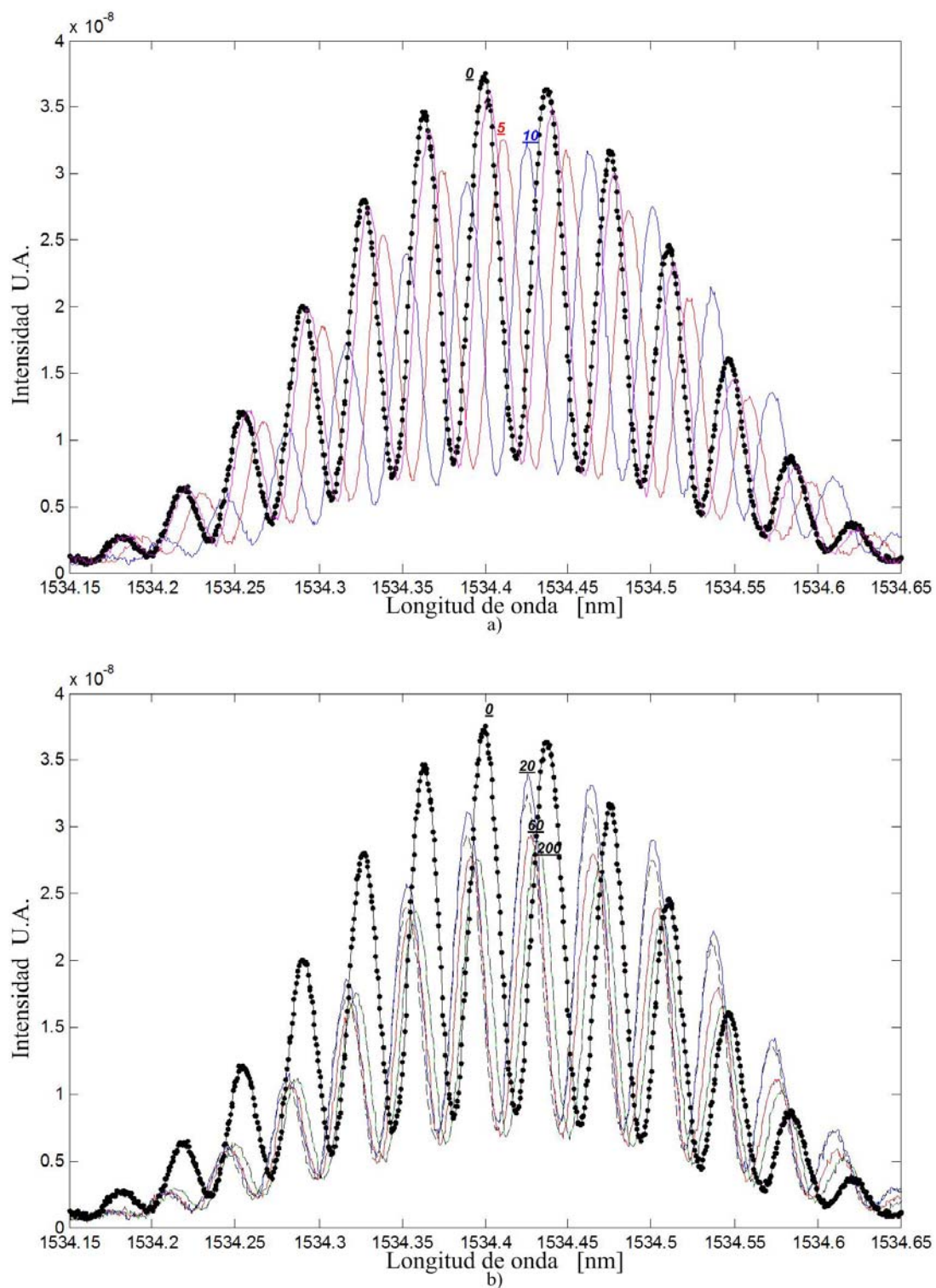


Figura 41. Interferómetro #8 a) Espectros del interferómetro irradiados con 1, 5 y 10 pulsos UV; b) espectros irradiados con 20, 60 y 200 pulsos UV.

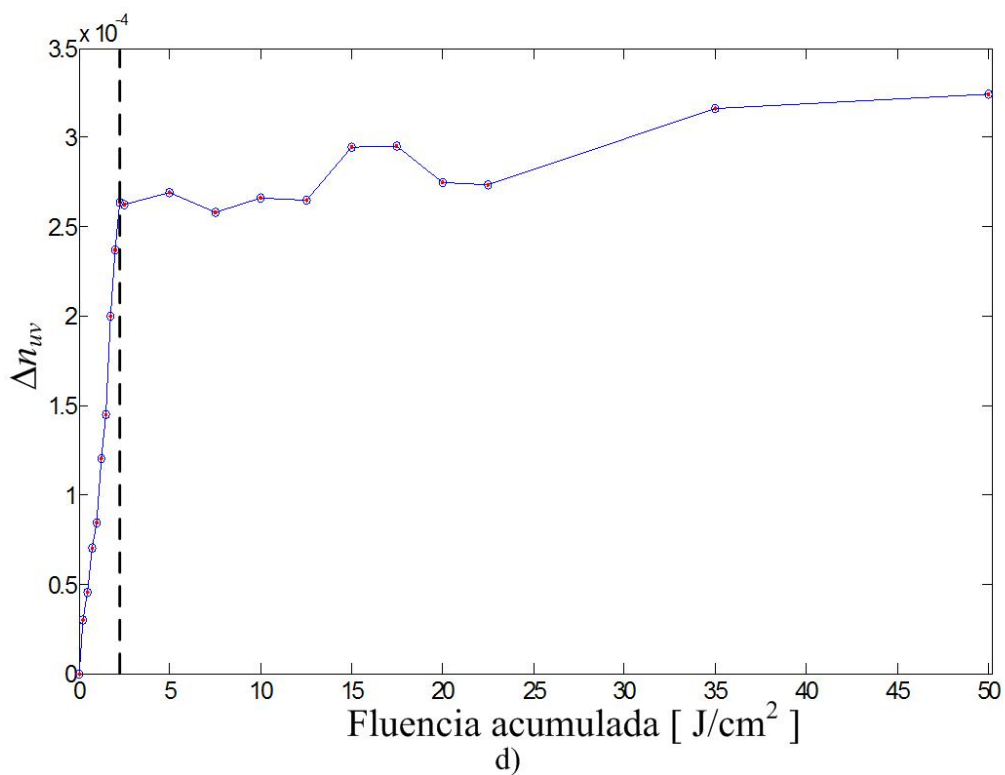
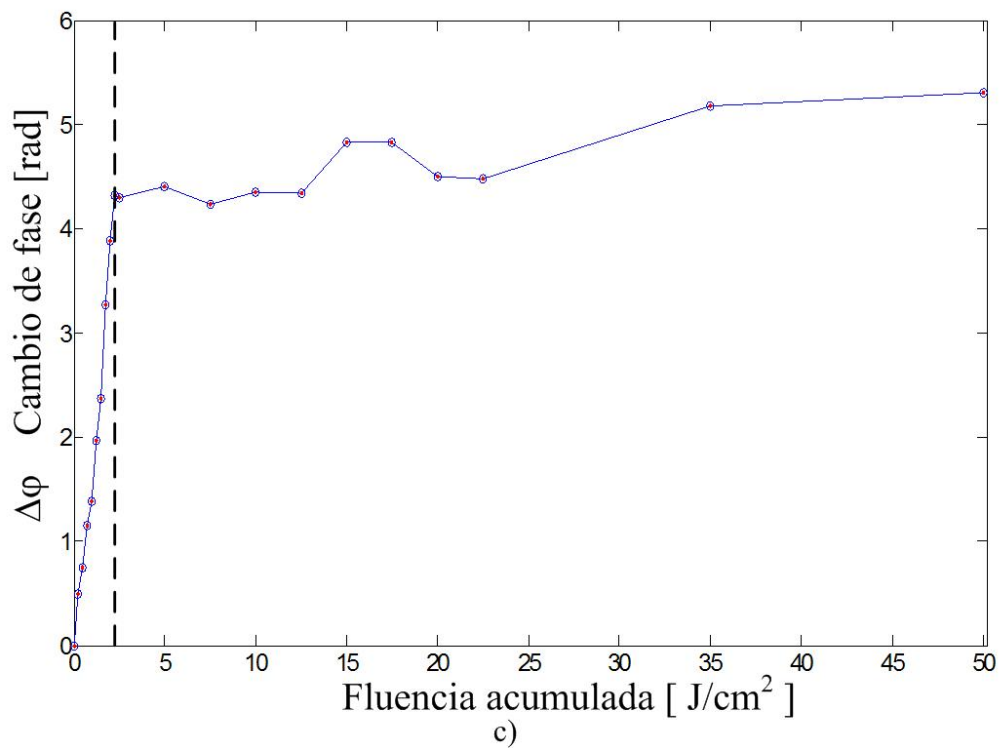


Figura 42. Interferómetro #8 c) Cambio de fase; d) cambio de índice de refracción inducido por pulsos UV.

Lo anterior indica que ocurrió un cambio de régimen en la irradiación de los pulsos UV, provocando un cambio en el comportamiento tanto de fase y en el cambio de índice. La irradiación de pulsos UV en etapa inicial fue de pulso por pulso para los interferómetros #7 y #8. Cuando es utilizado el régimen de tren de pulsos, después de los primeros 10 pulsos, se pueden observar un efecto de saturación, es decir el comportamiento de cambio de índice tuvo un crecimiento más lento en el caso de irradiación con trenes de pulsos.

Los cambios de índice inducidos fueron del orden $\Delta n_{uv} 10^{-4}$ para la fibra fotosensible, con una fluencia acumulada de $38 J/cm^2$ y $52 J/cm^2$ para los interferómetros #7 y #8. En ambos interferómetros se pudieron observar corrimientos de los espectros irradiados hacia la derecha, y por lo tanto, se obtuvieron cambios tanto de fase y de índice de refracción positivos inducido similares. En el interferómetro #7 se obtuvo un Δn_{uv} de 3.8×10^{-4} utilizando una dosis de irradiación por pulso y fluencia acumulada menor que en interferómetro #8, donde se obtuvo Δn_{uv} de 3.24×10^{-4} .

En la fibra SMF-28 se logró obtener también un $\Delta n_{uv} 10^{-4}$ utilizando una fluencia por pulso baja y un número grande de pulsos UV, pero el nivel de fluencia acumulada fue de $200 J/cm^2$. En cambio para la fibra fotosensible el nivel de fluencia acumulada fue sólo 20 a un 25 % de la utilizada para la fibra SMF-28.

Se puede observar, que todos los interferómetros bajo irradiación UV presentados en esta sección presentan una disminución en la amplitud de las franjas interferométricas hasta llegar al punto de ruptura de la fibra, para niveles altos de fluencia por pulso. Sin embargo con niveles bajos de fluencia por pulso este efecto también fue observado, así como también se pudo observar tal efecto en los espectros de reflexión de los

interferómetros grabados en fibra óptica fotosensible. Esto hizo suponer que el área irradiada por los pulsos UV es afectada de tal forma que se produce una asimetría en la fibra y por lo tanto un cambio de polarización del haz que se refleja en la segunda RBG del interferómetro. Debido a lo anterior se realizaron experimentos adicionales para explorar la existencia de un cambio de polarización y por lo tanto una atenuación inducida por la irradiación con pulso UV. Estos experimentos serán descritos en la secciones IV.4 y IV.5 respectivamente.

IV.3 Dependencias de reflectancias de Rejillas de Bragg en fibra óptica SMF-28 de Corning bajo diferentes dosis de irradiación UV.

El experimento consistió en grabar dos RBG en fibra óptica SMF-28 utilizando la técnica de grabación de máscara de fase utilizando el mismo nivel de fluencia por pulso, a diferentes regímenes de irradiación. El experimento fue realizado para los niveles de fluencia por pulso: 0.006, 0.09, 0.015, 0.023 y 0.031 J/cm^2 . Primero se grabaron las rejillas con el régimen de irradiación de pulso por pulso, esperando un tiempo de 2 minutos entre cada pulso. Cada muestra de fibra óptica utilizada para la grabación de rejillas estuvo libre de tensión o esfuerzo y el extremo final fue clivado con ángulo para evitar reflexiones dentro de la fibra. La medición de reflectancia fue realizada inmediatamente después de la irradiación de cada pulso UV a través del analizador de espectros ópticos, que permite medir espectros a velocidades altas. Las características de la medición fueron: resolución de 0.01 nm , un span por división de 0.1 nm/div . En la figura 43 se muestra el espectro de reflexión de una sola rejilla de Bragg.

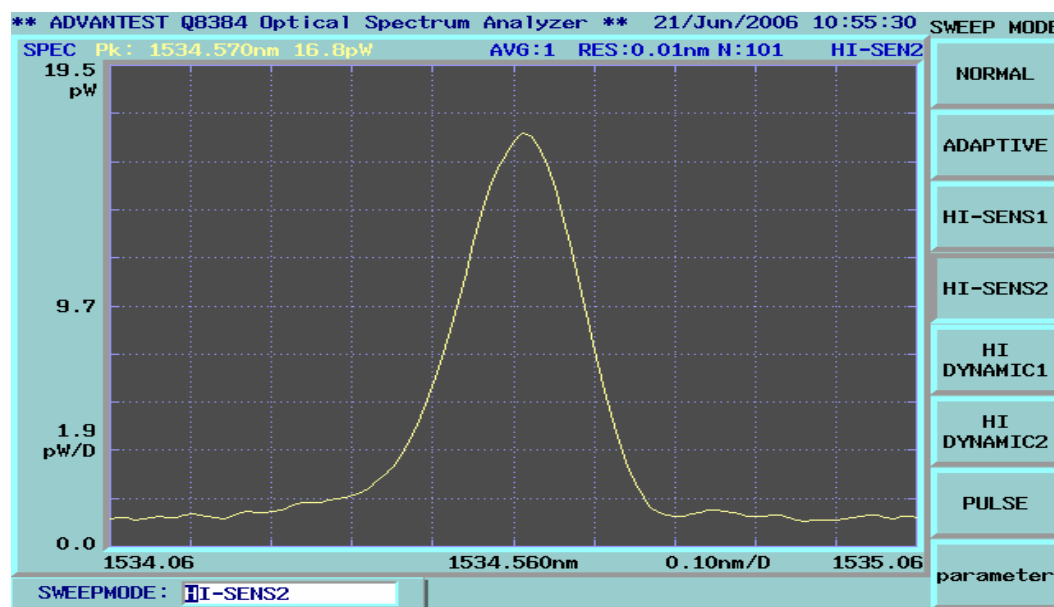


Figura 43. Espectro de reflectancia de una rejilla de Bragg grabada en fibra SMF-28.

Los espectros adquiridos mediante el analizador de espectros ópticos para estos experimentos fueron adquiridos con 101 muestras de resolución espectral. La razón para disminuir el número de muestras obedece a la sincronización con la velocidad del modo de barrido del analizador de espectros, para poder adquirir los espectros inmediatamente después de la irradiación de cada pulso UV sobre la fibra óptica. El comportamiento de la reflectancia en función del número de pulsos, que en este caso fue de 20 pulsos UV, es mostrado en la figura 44 para las diferentes dosis de irradiación mencionadas anteriormente.

Después de la medición de la reflectancia para la rejilla grabada con el régimen de pulso por pulso, el paso siguiente del experimento fue grabar una segunda rejilla utilizando el mismo nivel de fluencia por pulso. En la segunda rejilla, la irradiación fue por un tren de 10 pulsos (1 pulso por segundo). La adquisición de mediciones de reflectancia fue realizada por analizador de espectros ópticos en forma automática, adquiriendo lecturas de potencia del pico máximo de los espectros de reflexión modificados cada 10 segundos, lo que permitió adquirir datos para un número mayor de pulsos, en este caso 200 pulsos UV. En la figura 45 se muestran los diferentes comportamientos de las RBG en función del número de pulsos de irradiación UV.

En la figura 44, cada punto de la grafica representa el suministro de un sólo pulso, mientras que en la figura 45 cada punto representa el suministro de 10 pulsos, donde se puede observar diferentes niveles de saturación, proporcionales a la cantidad de irradiación, es decir, a mayor fluencia por pulso utilizado mayor fue el nivel de saturación.

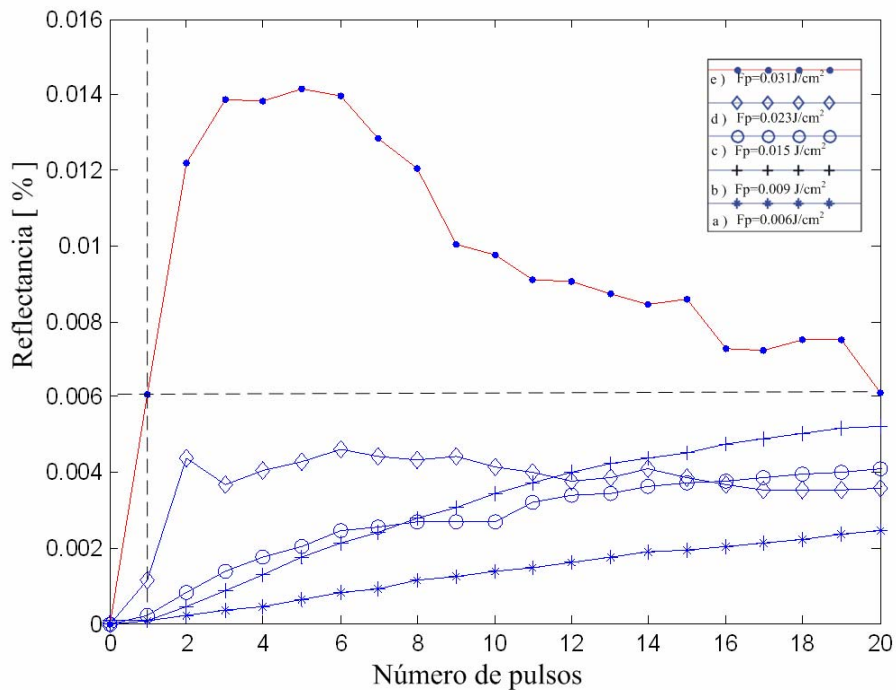


Figura 44. Dependencias de reflectancias de diferentes RBG bajo diferentes niveles de fluencias por pulso utilizando el régimen de grabación de pulso por pulso.

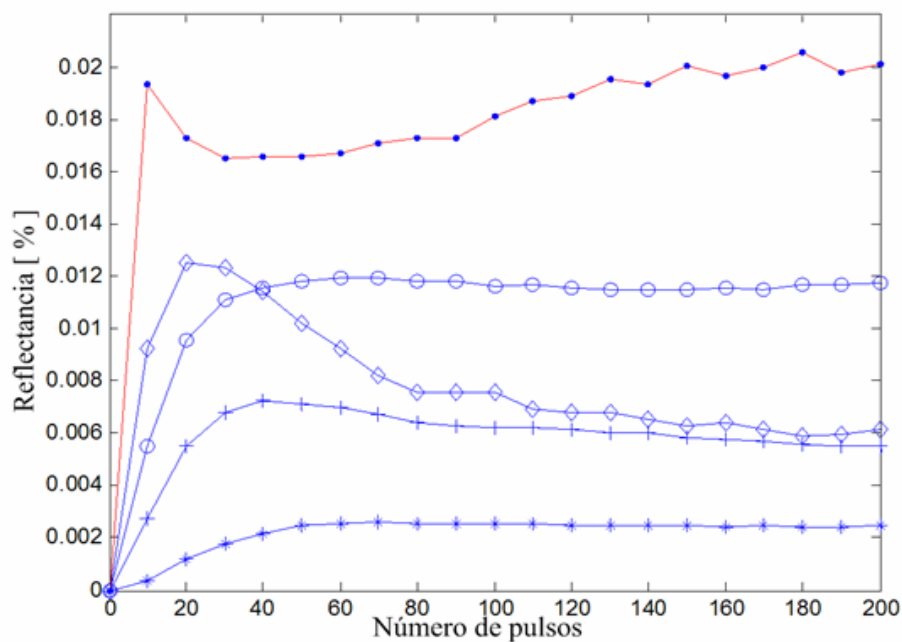


Figura 45. Dependencias de reflectancias de diferentes RBG bajo diferentes niveles de fluencias por pulso utilizando el régimen de grabación de tren de pulsos.

Se puede observar que aunque en ambos casos se utilizaron regímenes de grabación diferentes hay comportamientos similares. Como por ejemplo, las rejillas pueden alcanzar su máximo nivel de reflectancia antes de los primeros 10 pulsos para valores de fluencia por pulso altos y experimentar un decremento entre los 20 y 60 pulsos, como se muestra en la figura 45.

IV.4 Observación de efecto de atenuación en fibra SMF-28 con diferentes dosis de irradiación.

El efecto observado de disminución de amplitud de franjas de los espectros de reflexión de los interferómetros o interferogramas fue interpretada en función de atenuación debido a la irradiación con pulsos UV a la fibra óptica. Esto afecta directamente a la reflectancia de la segunda rejilla del interferómetro, provocando de esta forma una disminución en la amplitud de las franjas de los interferogramas, como se puede observar en las secciones IV.1 y IV.2. Entonces se realizó un experimento para observar el efecto de atenuación inducida utilizando el arreglo mostrado en la figura 46.

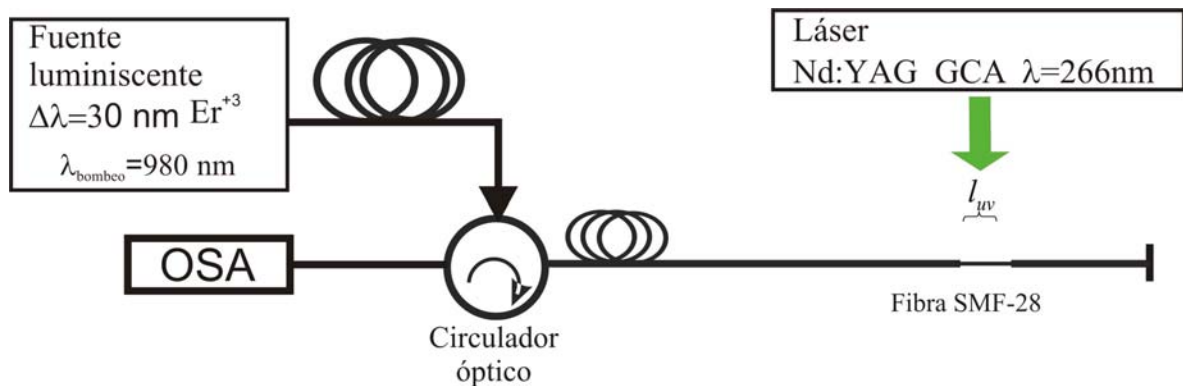


Figura 46. Arreglo experimental utilizado para observar el efecto de atenuación inducida en fibra SMF-28 utilizando diferentes niveles de fluencia por pulso.

En este experimento fue utilizada sólo la fibra óptica SMF-28 y sin interferómetro impreso en la fibra. Los pulsos fueron suministrados a una frecuencia de 1Hz. El desforre de la cubierta plástica de la fibra fue realizado con alcohol y pinzas. En la figura 47 se muestran las respuestas de la fibra SMF-28 cuando fue irradiada con pulsos de diferentes niveles de fluencia.

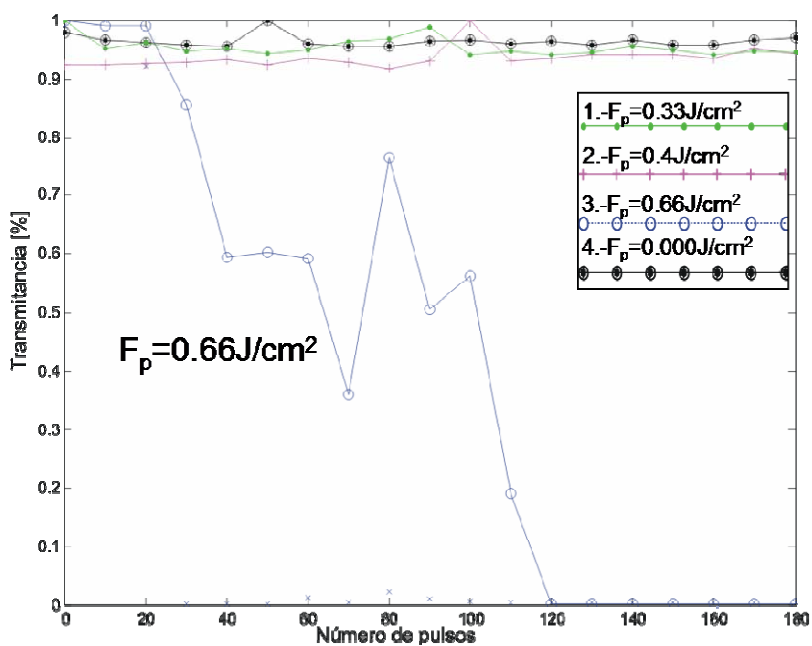


Figura 47. Resultados del efecto de atenuación inducida por diferentes dosis de irradiación.

Se puede observar en la figura 47, que utilizando niveles de fluencia por pulso bajos e intermedios, no se observa disminución en la transmitancia de las muestras irradiadas. En cambio para el nivel de fluencia por pulso $F_p = 0.66 \text{ J/cm}^2$ se puede observar que si hay atenuación inducida, debido a la disminución de la transmitancia. La transmitancia nula indica el rompimiento de la fibra óptica.

IV.5 Observación de efecto de birrefringencia inducida dentro interferómetro Fabry-Perot bajo irradiación UV.

Debido a la disminución en la amplitud de franjas en los interferogramas mostrados después de que el interferómetro es irradiado por pulsos UV, se realizó además un experimento adicional para observar si ocurre un cambio de polarización inducido en el interferómetro debido a la irradiación con los pulsos UV.

El arreglo utilizado para este experimento es mostrado en la figura 48 y consistió en irradiar con pulsos UV la parte interna del interferómetro, como en el arreglo utilizado para inducir un cambio de índice de refracción descrito en el capítulo IV. El equipo utilizado en este experimento fue el siguiente: diodo láser JDS de Uniphase con una potencia de 10 mW y operando a una longitud de onda $\lambda=1550 \text{ nm}$, un analizador de polarización de Agilent modelo 8509C con intervalo espectral de $\Delta\lambda = 1280\text{-}1640 \text{ nm}$; fotodiodo PDA 400 InGaAS, con ancho de banda 10 MHz $\Delta\lambda=800\text{-}1800 \text{ nm}$. El Láser utilizado para la irradiación de pulsos UV, y en experimentos anteriores fue el láser de estado sólido de Nd:YAG pulsado con $\lambda= 266 \text{ (FHG)}$, con una duración de pulsos de 4 ns. El controlador de polarización utilizado fue construido en un extremo de la misma fibra SMF-28. También se utilizó un conector temporal FC a uno de los extremos de la fibra bajo prueba para ser conectado al analizador de polarización con un cable de fibra óptica de 10 m de longitud; se utilizaron además dos placas cerámicas para evitar que la irradiación de pulsos UV afectara al interferómetro Fabry-Perot. Las muestras de fibra SMF-28 bajo prueba fueron desforradas con pistola de aire caliente. La irradiación con pulsos UV, se realizó en la parte interna de un interferómetro de 12 mm de longitud, como es mostrado en la figura 48.

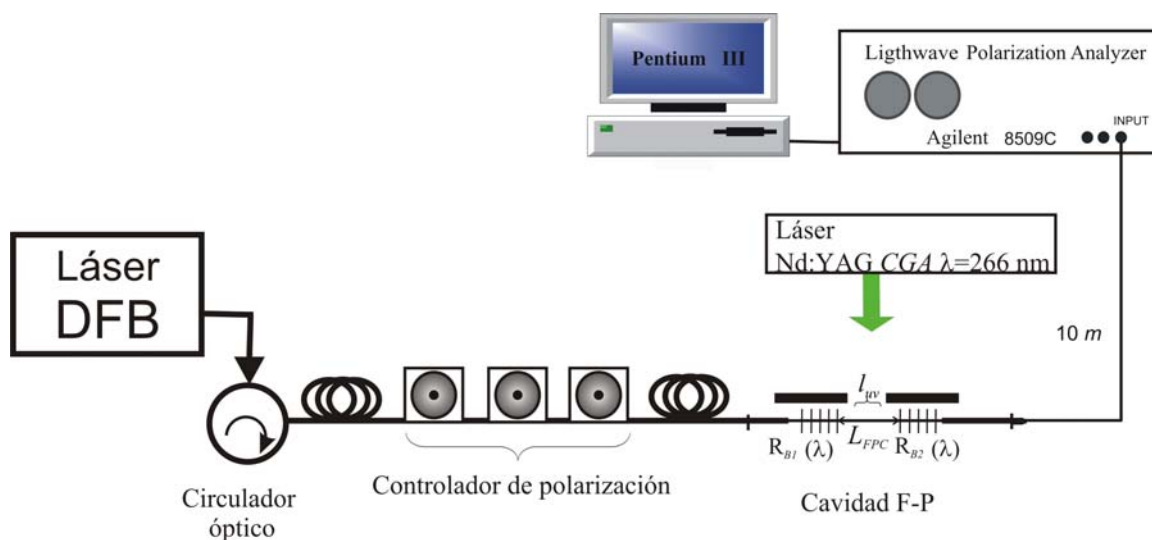
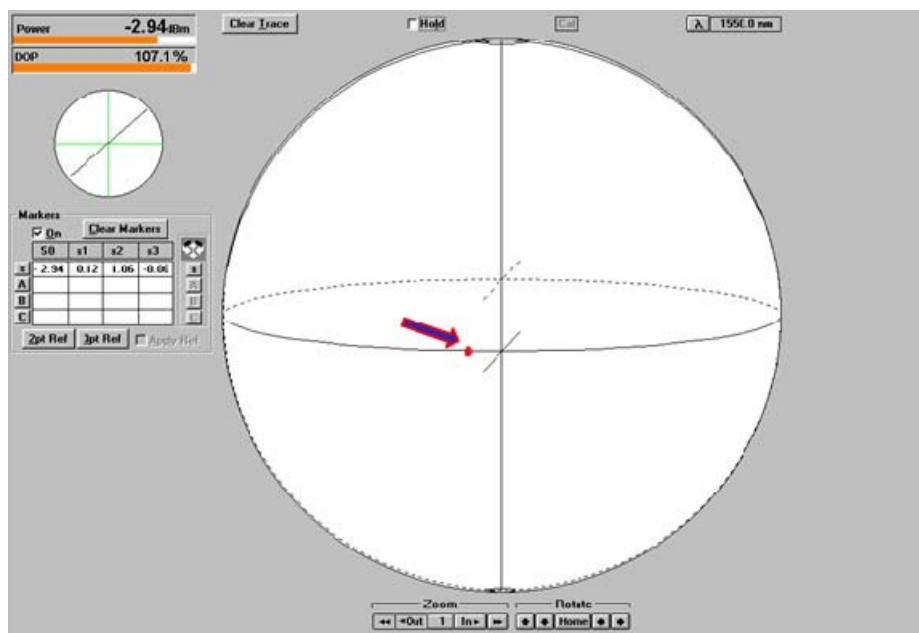


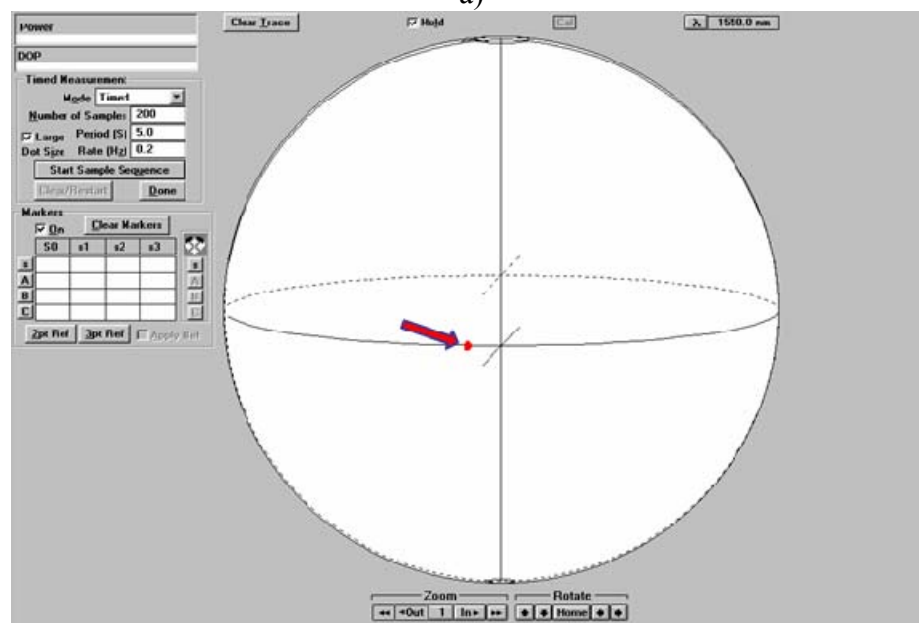
Figura 48. Arreglo experimental utilizado para observar el efecto de cambio de polarización en fibra óptica.

El experimento consistió en fijar con el controlador de polarización, el estado de polarización de la luz que viaja a través en la fibra bajo prueba, a la entrada del analizador de polarización, de tal forma que ésta quedara estable antes de irradiar el interferómetro. El primer experimento se realizó fijando un estado de polarización lineal en la fibra antes de la irradiación de pulsos UV, para tomar unas 100 muestras como referencia. Después de esto el interferómetro fue irradiado con 300 pulsos UV emitidos a una frecuencia de 3Hz a una fluencia por pulso de 0.33 J/cm^2 ; adquiriendo un total de 100 muestras durante la irradiación, además se adquirieron 150 muestras más después de que el láser fue apagado, con el fin de observar si ocurría algún cambio. La adquisición de las muestras fue realizada cada 5 s. Los resultados de antes y después de la irradiación son mostrados en las figuras 49 a) y b). El segundo caso fue realizado fijando un estado de polarización circular en la fibra óptica a la entrada del analizador. El interferómetro fue irradiado por 120 pulsos UV, las

condiciones de adquisición de muestras fueron iguales que en el primer caso, los resultados antes y después de que el interferómetro fue sometido a la irradiación UV son mostrados en las figuras 50 a) y b) respectivamente.

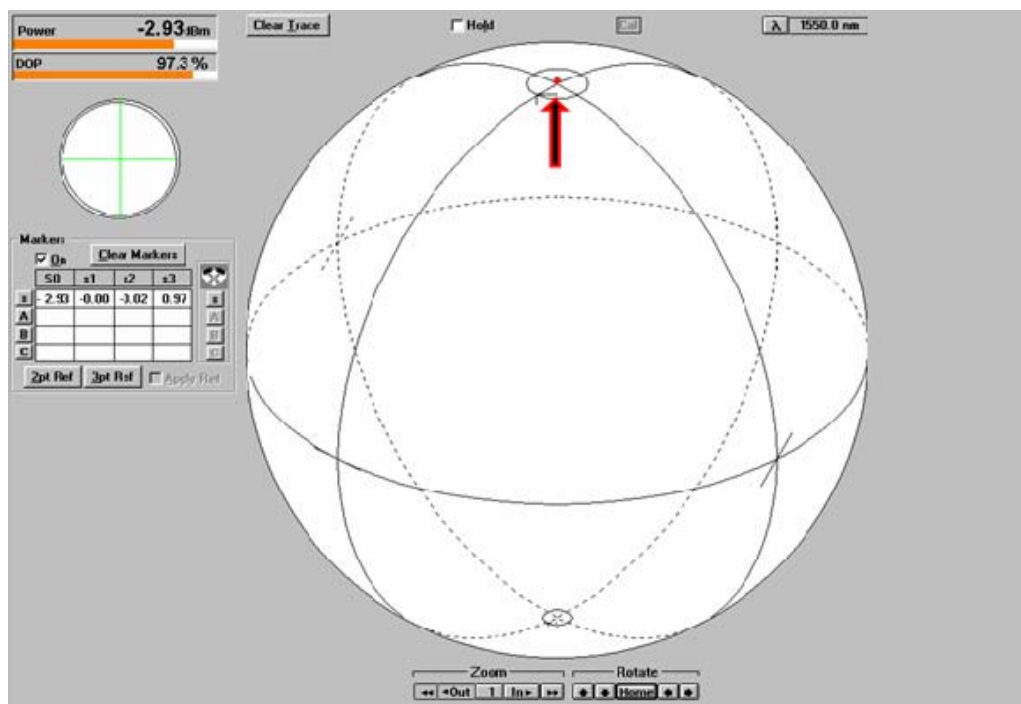


a)

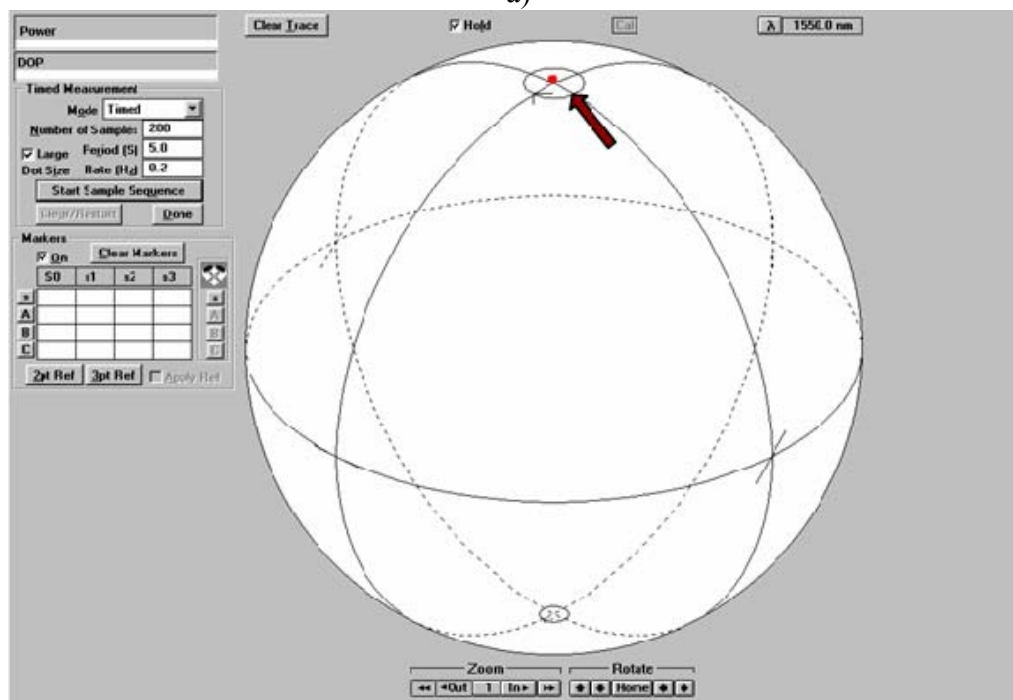


b)

Figura 49. a) Polarización lineal sin irradiación UV. b) Después de irradiación y de apagar el láser UV.



a)



b)

Figura 50. a) Polarización circular sin irradiación UV b) Después de irradiación y de apagar el láser UV.

Se puede observar que la irradiación de pulsos UV sobre la parte interna del interferómetro Fabry-Perot no ocasionó cambio alguno en el estado de polarización de la luz en la fibra, por lo que la disminución en la amplitud de las franjas de interferencia de los interferómetros mostrados en secciones *IV.1* y *IV.2* no se debe a un efecto de birrefringencia inducida por irradiación con pulsos UV a $\lambda=266 \text{ nm}$. Este experimento también fue realizado para fibra fotosensible de Fibercore a una fluencia por pulso de 0.66 J/cm^2 sin interferómetro impreso en el núcleo, pero tampoco fue observado cambio de polarización alguno.

IV.6 Observación de efectos térmicos (Transitorios) en fibra fotosensible.

En esta sección se describe un experimento realizado para observar el cambio de temperatura inducido en la fibra fotosensible de Fibercore causado por la irradiación de pulsos UV, con el fin de determinar si este tipo de irradiación afecta a la fibra, de tal forma que ocasiona un cambio en la reflectancia de la rejilla y en la magnitud del cambio de índice de refracción.

El arreglo utilizado en este experimento es mostrado en la figura 51, las modificaciones que se realizaron al arreglo utilizado para inducir un cambio de índice de refracción por la irradiación de pulsos UV, como fue descrito en el capítulo IV. En este caso se tiene un foto detector PDA 400 de InGaAs de THORLABS, con un ancho de banda de 10MHz, un intervalo espectral ente 800-1800 nm y un osciloscopio de la compañía Agilent 54622A BW=100 MHz.

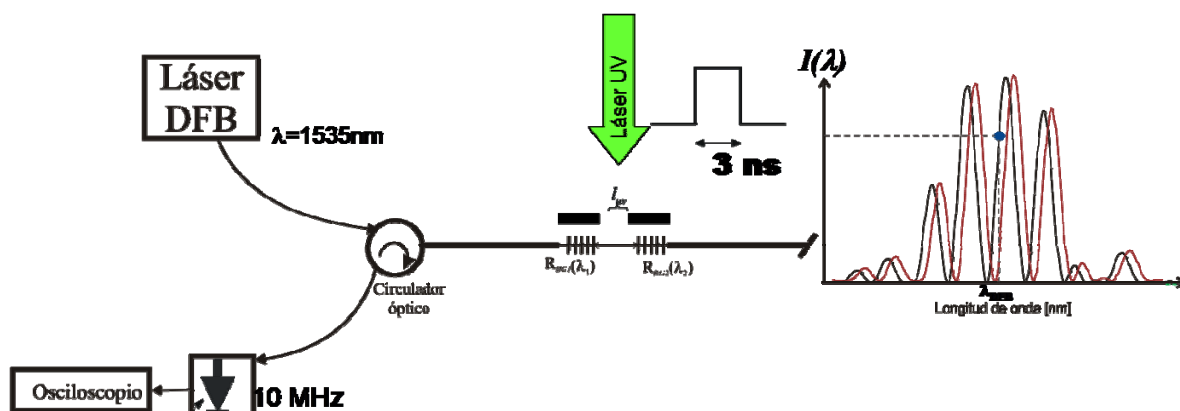
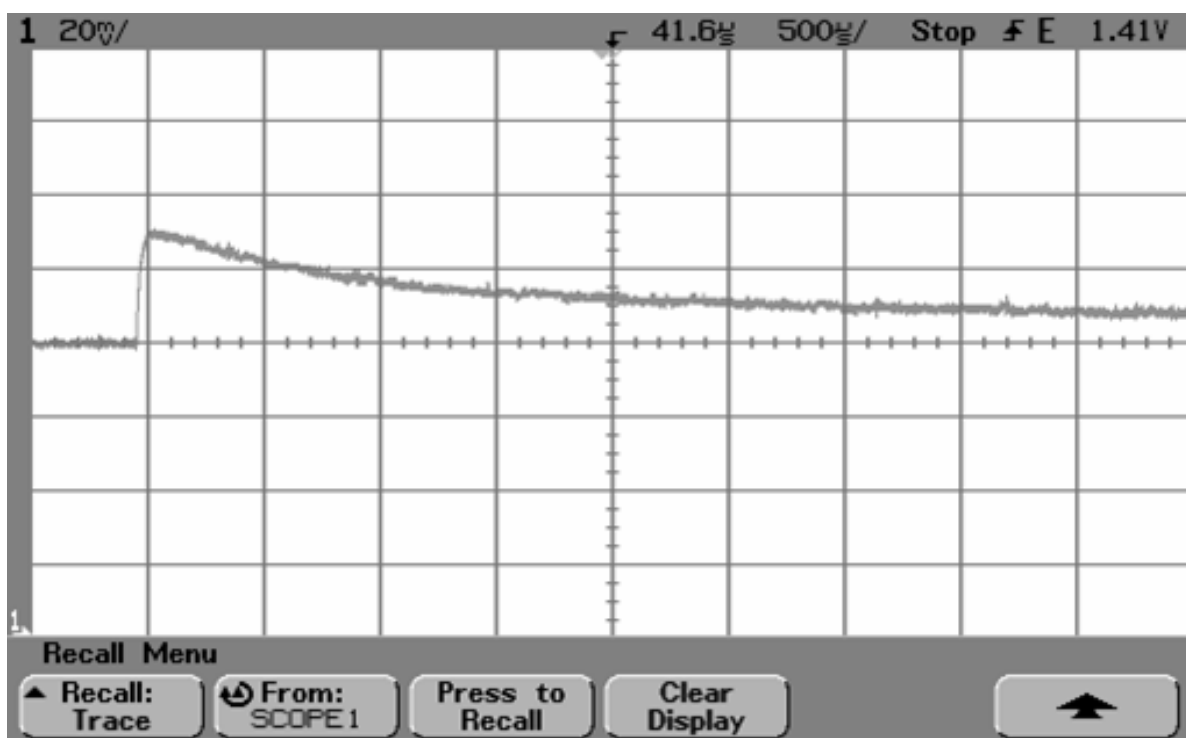
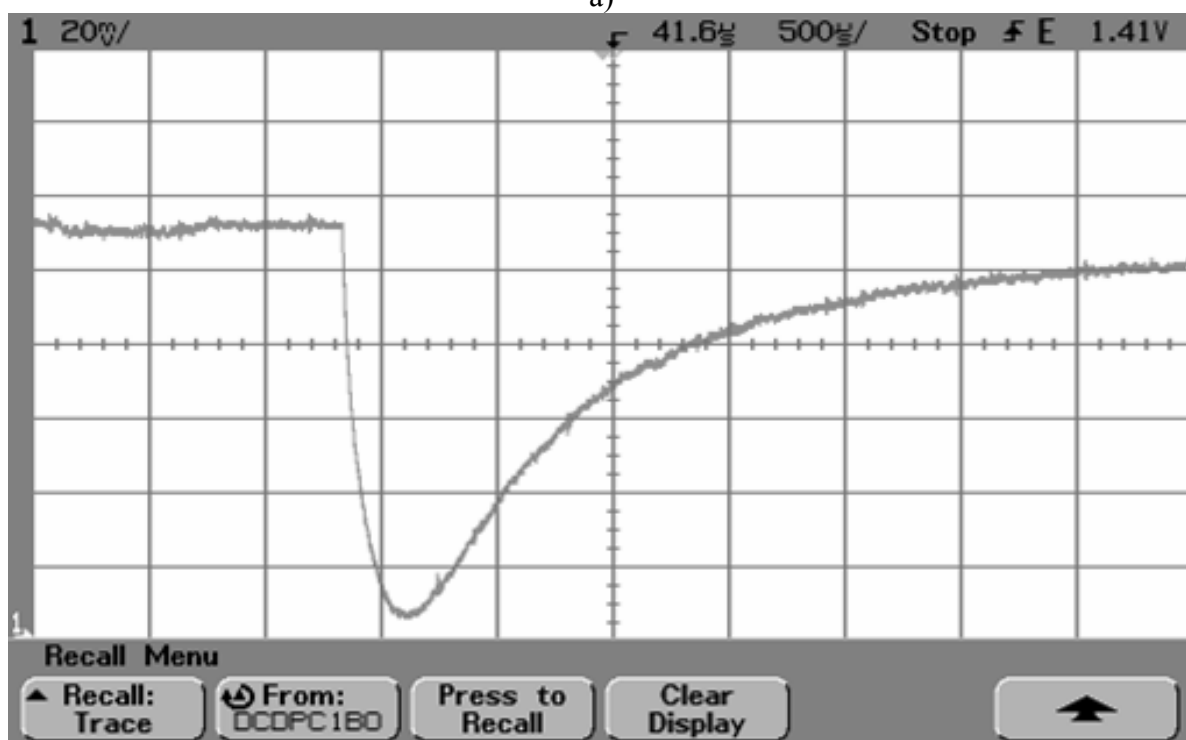


Figura 51. Arreglo experimental utilizado para observar el cambio de temperatura en fibra fotosensible.

En este experimento si se utilizó un interferómetro grabado en la fibra óptica, y consistió en fijar un punto en el espectro de reflexión del interferómetro a una longitud de onda, y hacer incidir dentro de él un sólo pulso UV, para observar si hay corrimiento de franjas del interferograma debido a un efecto térmico causado por la irradiación pulsada del láser utilizado en el experimento, es decir si en la marca de la longitud de onda de referencia ocurre un cambio del nivel de reflectancia causado por la irradiación pulsos UV. Debido a que la duración del pulso UV es de 4 ns y el analizador de espectros ópticos no permite adquirir la respuesta rápida del cambio en el interferograma. Debido a lo anterior se utilizó un foto detector y un osciloscopio. Las fluencias por pulso utilizadas fueron: $F_p=0.66 \text{ J/cm}^2$ y con $F_p=0.4 \text{ J/cm}^2$, las cuales producen diferentes respuestas en la fibra óptica, como se muestran en las figuras 52 a) y b), respectivamente.



a)



b)

Figura 52. Respuesta de efectos térmicos en fibra fotosensible FiberCore, a) Fluencia del pulso UV $F_p = 0.4 \text{ J/cm}^2$ y b) fluencia por pulso UV 0.66 J/cm^2 .

En los resultados mostrados en las figuras 52 a) y b), se puede observar que a mayor fluencia por pulso absorbida por el núcleo de la fibra, mayor es la respuesta en la fibra fotosensible. En la figura 52 a) se puede observar que la respuesta observada en el osciloscopio fue de 37 mV , utilizando una fluencia por pulso de $F_p=0.4\text{ J/cm}^2$, mientras que en la figura 52 b) la respuesta al pulso fue de 100 mV , donde se utilizó una fluencia por pulso $F_p=0.6\text{ J/cm}^2$. Sin embargo, se pudo demostrar que sí hay un cambio en el núcleo de la fibra óptica durante la irradiación UV pulsada, pero este efecto es de carácter transitorio, ya que la respuesta de la fibra tiende a regresar a su estado térmico inicial, como antes de ser irradiada por pulsos UV pero en un periodo de tiempo considerable. El tiempo de reestablecimiento de la fibra mayor unos 4.5 ms , mientras que la duración de pulso del haz láser es de 4 ns . Entonces el tiempo de reestablecimiento es suficiente para ocasionar la fibra un desfase ya sea en la grabación de rejillas o en la medición de cambio de índice, como fue observado en los resultados de las secciones *IV.2* y *IV.3*, respectivamente, donde ocurrió un cambio de régimen de irradiación de pulsos UV. Lo anterior indica el reestablecimiento térmico en la fibra óptica es muy importante cuando es utilizada la irradiación UV pulsada del orden de nanosegundos; ya que sí es afectada por un efecto térmico de tipo transitorio como es observado en la figuras 52 a) y b), respectivamente.

Capítulo V *Discusión, conclusiones y trabajo a futuro.*

V.1 *Discusión de resultados*

En este capítulo se presenta una discusión de los resultados experimentales mostrados en el capítulo anterior, en el cual se describieron dos técnicas diferentes de medición de fotosensibilidad. En estas técnicas se utilizó el mismo láser pulsado de Nd:YAG ($\lambda=266\text{ nm}$) bajo diferentes dosis de irradiación UV, pero utilizando la distribución de intensidad del haz del láser en forma diferente, lo cual afecta también de diferentes formas al núcleo de la fibra óptica. Es decir en la técnica para la medición de fotosensibilidad se utilizó la intensidad del haz uniforme (gaussiano), tanto para las fibras de telecomunicación estándar SMF-28 de Corning y fotosensible de Fibercore. La segunda técnica, consistió en la grabación de diferentes RBG, donde la distribución del haz láser es a través de un patrón de interferencia. En estas dos técnicas, como se puede observar en la figura 53.

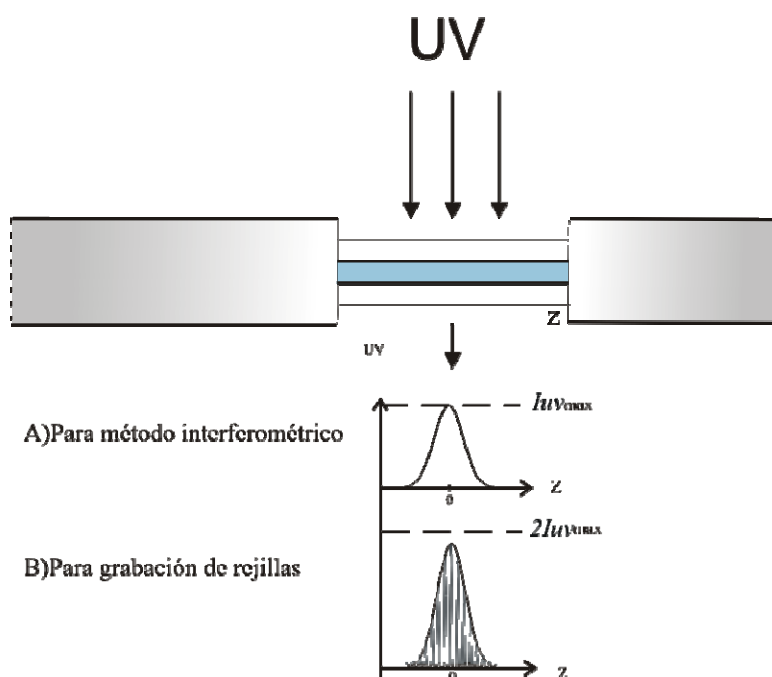


Figura 53. Distribución de intensidad de irradiación ultravioleta sobre núcleo de la fibra para método interferométrico Fabry-Perot y grabación de RBG.

Los resultados de ambas técnicas pueden ser comparados, entre sus principales diferencias debido a las condiciones de irradiación UV sobre el núcleo de la fibra. En el caso de la grabación de diferentes RBG puede deberse a que en el núcleo de la fibra, el patrón de interferencia del haz UV formado atrás de la máscara de fase es $2I_{UV} \max > I_{UV} \max$. Lo anterior significa que utilizando la técnica de grabación de RBG es más fácil observar la fotosensibilidad a niveles bajos de fluencias por pulso, debido a la modulación del haz del láser utilizado para la grabación de RBG, ya que en cada periodo del patrón de interferencia es de $0.5\mu\text{m}$. En cambio cuando es utilizado el método de medición interferométrico, el ancho del haz es de aproximadamente 2 mm .

Para la grabación de rejillas es mucho más fácil observar fotosensibilidad tipo IIA como se observa en la figura 45 de capítulo IV, cuyos resultados fueron procesados para observar el comportamiento de la reflectancia en función de fluencia acumulada, como se muestran en las figuras 54 y 55 respectivamente.

Se puede observar que en ambos regímenes de grabación de RBG: el régimen de irradiación UV de pulso por pulso y el de tren de 10 pulsos para niveles de fluencia por pulso baja, los comportamientos de reflectancia son muy similares para niveles de fluencia por pulso de $0.06, 0.09, 0.015\text{ J/cm}^2$. Sin embargo para el método de irradiación pulso por pulso a una fluencia por pulso baja (0.06 J/cm^2), sí se presentan algunas diferencias: El nivel de reflectancia más bajo (casi un 50 % menos) en comparación cuando es utilizado el régimen de tren de pulsos. En cambio para niveles de fluencia por pulso alta y utilizando ambos métodos de irradiación se obtuvieron niveles de reflectancia máximos después de varios pulsos, es decir, antes de los diez primeros pulsos y posteriormente ocurre un

decremento en la reflectancia, y sólo para el método de irradiación de tren de pulsos se observa un incremento como en las rejillas tipo IIA.

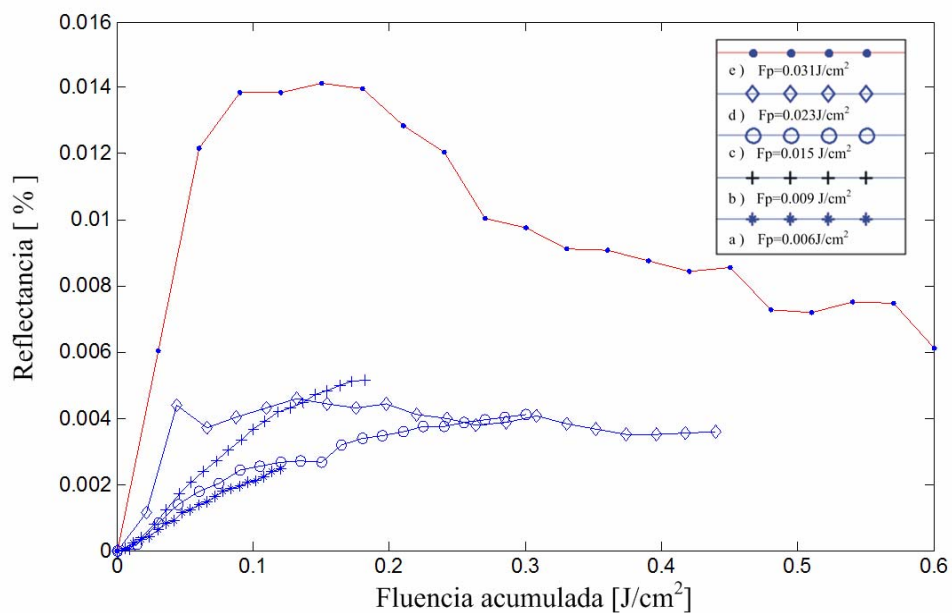


Figura 54. Comportamiento de reflectancia de diferentes RBG bajo diferentes dosis de irradiación utilizando la adquisición de espectros cada 2 minutos.

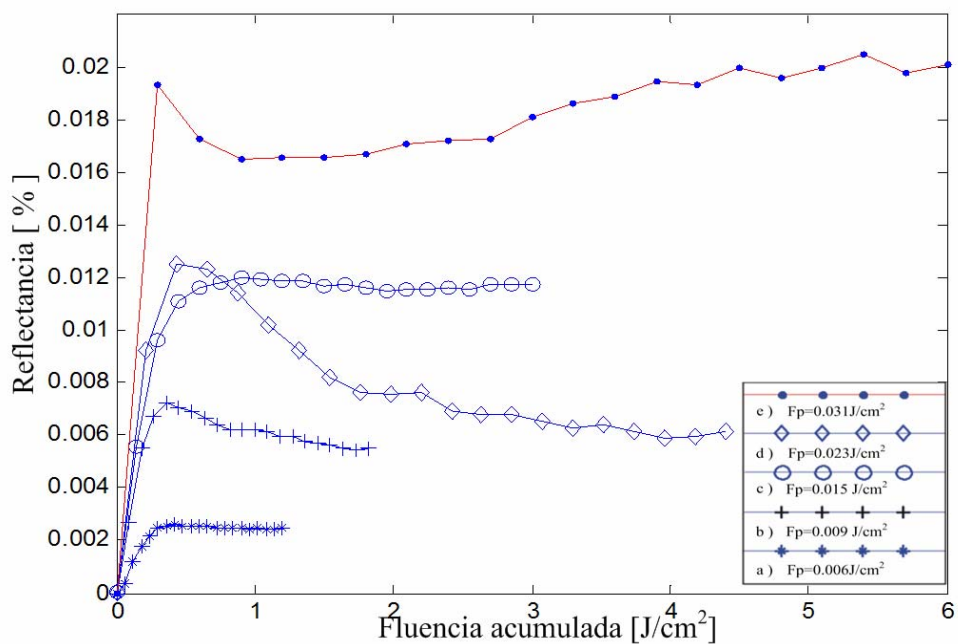


Figura 55. Comportamiento de reflectancia de diferentes RBG bajo diferentes dosis de irradiación utilizando régimen de adquisición de espectros cada 10 s.

En las figuras 54 y 55, se puede observar que a un determinado nivel de fluencia acumulada utilizando diferentes niveles de fluencia por pulso UV, mientras que a niveles bajos de fluencias por pulso y una dosis de fluencia acumulada $< 0.1 J/cm^2$, las gráficas son muy similares. Lo anterior permite determinar que si funciona la ley de intercambio:

$$F_1 m N_p = m F_1 N_p, \quad (25)$$

donde F_1 es el nivel de fluencia por pulso, $m F_1$ es la fluencia por pulso afectada por coeficiente o múltiplo m y N_p es el número de pulsos.

En cambio para fluencias niveles altos de fluencias por pulsos, la fotosensibilidad es mayor y la reflectancia crece más rápido en función de la fluencia acumulada, lo cual indica además que diferentes mecanismos de fotosensibilidad participan en este comportamiento.

En cambio con la técnica de medición interferométrica de fotosensibilidad o de cambio de índice de refracción inducido, se observaron diferentes comportamientos para diferentes dosis de irradiación, los cuales indican también que diferentes mecanismos están involucrados, encontrando notables diferencias entre los cambios de índice de refracción obtenidos en fibra SMF-28 y fotosensible de Fibercore.

En los espectros de reflexión de los interferómetros grabados en fibra estándar SMF-28 mostrados en capítulo IV, se observaron desplazamientos espectrales hacia la derecha, lo cual generan cambios de fase y por lo tanto cambios de índice inducido positivos, caso contrario sucedió cuando estos corrimientos espectrales fueron hacia la izquierda. Estos corrimientos hacia la izquierda están directamente relacionados con dos mecanismos: la compactación y la dilatación de la estructura vítrea de la fibra. [Kashyap 2003].

En cambio para los niveles altos de fluencia por pulso, sí se pudo observar cambios en visibilidad de las franjas de los interferogramas antes de los primeros 20 pulsos de irradiación, como se puede observar en los interferómetros #5 y #6.

En los interferómetros grabados en fibra fotosensible, se observaron comportamientos de cambio de régimen en las figuras 40 y 42 d), donde en el primer régimen de grabación, fue el suministro de pulso por pulso hay un rápido crecimiento de Δn_{uv} para un nivel de fluencia acumulada de $0.30 J/cm^2$. En este mismo nivel se puede observar que inicia el segundo régimen que es caracterizado por un crecimiento lento de cambio de índice inducido, debido al cambio de régimen de irradiación de pulsos UV, es decir los pulsos son suministrados en un tren de 10 pulsos con una tasa de repetición de 1Hz. Lo anterior se debe a que la fibra experimenta un cambio transitorio de temperatura después de la irradiación de un pulso UV y tarda en reestablecerse térmicamente entre 90-120 s. Si la fibra es irradiada antes de este tiempo, se provoca que el cambio de índice inducido Δn_{uv} no crezca tan rápido como cuando si se reestablece térmicamente.

Se observó también una disminución en la amplitud de franjas de los interferogramas bajo niveles bajos, intermedio y altos de fluencia por pulso, para la fibra estándar SMF-28 y en la fibra especial fotosensible, lo cual fue motivo para investigar si este efecto correspondía al efecto de atenuación inducida o un cambio del estado de polarización en el núcleo de la fibra, debido a la influencia por pulsos UV a los interferómetros F-P. Estos experimentos fueron descritos en secciones *IV.5* y *IV.6* respectivamente, donde sólo se pudo observar disminución de transmitancia a niveles altos de fluencia por pulso, como se mostró en la figura 47.

Cómo una hipótesis sobre el efecto observado de disminución de amplitud de franjas de los interferómetros, se asoció a dos factores principales: el tiempo y la temperatura. Estos experimentos requirieron de un poco más de 3 horas, desde la adquisición del espectro de referencia y el último espectro irradiado por pulsos UV. Durante este intervalo de tiempo hubo un cambio de temperatura en el laboratorio, debido al calentamiento del equipo en general utilizado para realizar los experimentos (las fuentes de poder, de los láseres: de bombeo y el de irradiación). El elemento principal afectado por la temperatura en este caso fue el acoplador, ya que este tenía un enrollado con curvaturas pequeñas pero suficientes como para excitar los dos modos de propagación de la fibra, de tal forma que éstos se pudieran acoplarse entre sí y provocar en forma de pérdidas una reducción de amplitud de las franjas.

Este efecto de amplitud de franjas reducidas se puede recuperar con un factor de compensación. El factor de compensación de las franjas reducidas de los interferogramas, se refiere a que se puede encontrar un factor tal que al multiplicarse por el interferograma se pueda obtener la amplitud del espectro de referencia. En la figura 56, se muestra el caso del interferómetro #3, donde se utilizó una fluencia baja por pulso. El interferograma de referencia es mostrado con puntos y en este caso se muestran dos interferogramas: uno afectado con 500 pulsos UV que fue compensado por un factor de 1.37, que se muestra indicado con una línea discontinua, y otro interferogramas afectado con 8000 pulsos UV, compensado por un factor de 2.06, que es indicado con línea continua. En la figura 56 se puede observar la compensación de ambos interferogramas. En cambio para niveles intermedios de fluencia por pulso, también se puede compensar la amplitud mediante un

factor, como en caso del interferómetro # 7 impreso en fibra fotosensible, como se muestra en la figura 57

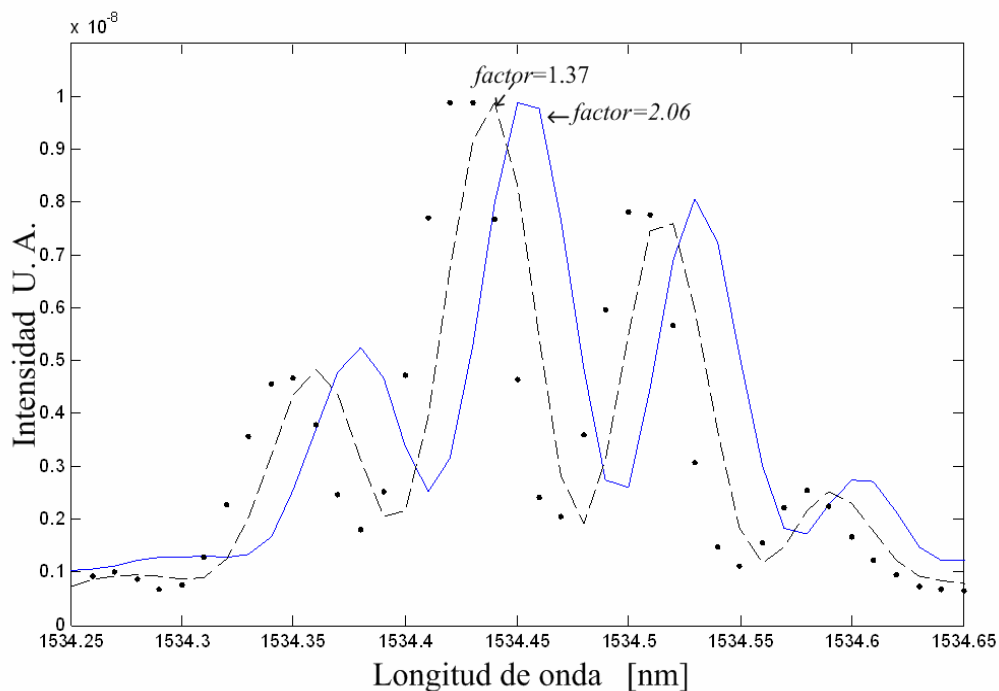


Figura 56. Espectros irradiados con 500 y 8000 pulsos de interferómetro #3 son compensados por factores de 1.37 y 2.06 respectivamente.

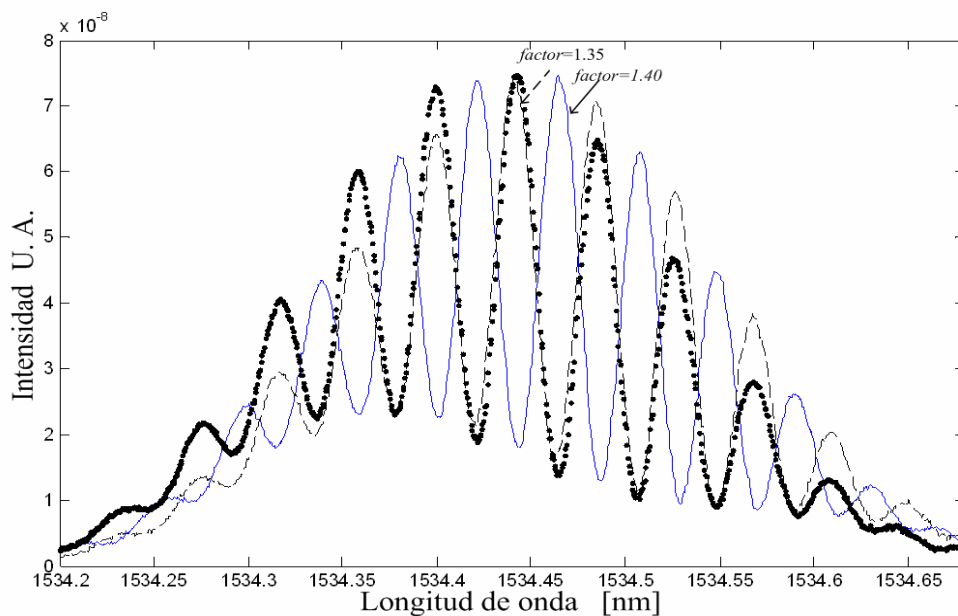


Figura 57. Espectros de interferómetro # 7 impreso en fibra fotosensible compensado con factores de 1.35 y 1.40.

En cambio para niveles altos de fluencia por pulso, no se puede compensar la amplitud de las franjas de los interferogramas, como en el caso de los interferómetros #5 y #6, donde se observó un cambio de visibilidad hasta llegar a un cambio de periodicidad en el patrón de interferencia, como se mostró en la figura 37. Se puede apreciar que el periodo del patrón de interferencia para niveles altos de fluencia por pulso es de casi el doble en comparación para niveles intermedios y bajos de fluencia por pulso, lo cual indica que el tamaño del interferómetro es dos veces más chico. Este cambio se puede asociar a la formación de micro-fracturas en el núcleo de la fibra. Estas funcionan como un espejo, formando así un nuevo interferómetro y favorecen a la pérdida de integridad de la fibra y si la irradiación continúa la fibra puede llegar a romperse.

No se observó efecto de birrefringencia inducida, para $\lambda=266 \text{ nm}$ en fibra SMF-28, debido a que ésta absorbe sólo el 2 % de la irradiación UV, es decir tiene un nivel bajo de absorción, mientras que la fibra fotosensible de Fibercore absorbe 6% de la luz UV, lo cual indica que la intensidad dentro del núcleo es altamente uniforme, pero no es suficiente para causar un cambio de simetría en la estructura cilíndrica de la fibra [Atkins 1992].

Se puede observar para niveles altos de fluencia por pulso ocurre un cambio de visibilidad en los interferogramas, como en el caso de los interferómetros #5 y # 6, mostrados en capítulo IV. Este cambio está relacionado con el cambio de transmitancia de la fibra como se mostró en la figura 47. También estos niveles altos fluencia por pulso corresponden a la fluencia necesaria para observar la fotosensibilidad tipo IIA y provocar daños físicos en el núcleo de la fibra hasta llegar al punto de ruptura o formar micro-

fracturas, sin llegar desprenderse física o totalmente, pero si pueden cambiar las propiedades estructurales y ópticas de la fibra.

Los desplazamientos espectrales hacia la izquierda, como los observados en la figura 37, permiten asociar que la fibra se encuentra menos densa por causa de las microfracturas, que están asociadas al mecanismo de micro poros, por lo que en caso de niveles altos de fluencias por pulsos intervienen dos mecanismos principales densificación y micro poros.

La formación de la Rejilla de Bragg tipo IIA puede ser explicada según [Kukushkin 2005], que cuando la fibra es irradiada por pulsos UV en forma pulsada (del orden de ns), se producen una tensión transitoria durante $\sim 10^{-5} s$ y un efecto térmico de forma simultánea entre el núcleo y cubierta de la fibra, entonces debido a que éstas tienen propiedades ópticas ligeramente diferentes afectan de cierta forma a las franjas interferométricas. Suponiendo que esta tensión y efecto térmico ocurren en los máximos o franjas brillantes del interferómetro que son oprimidas por los mínimos o franjas oscuras, por lo que se provoca un incremento de la compactación. Cuando el incremento de compactación llega a cierto nivel de tensión umbral se produce un efecto contrario debido a una nucleación de poros ocasionando un efecto de dilatación.

Otro aspecto importante en la formación de la rejilla IIA, es que no todos los defectos de la red vítrea del núcleo de la fibra que son irradiados absorben energía, sino que una parte de la energía ultravioleta es absorbida mientras que la otra es disipada como luminiscencia a través de ondas elásticas y por el calentamiento de la fibra, cada pulso UV irradiado se induce una tensión transitoria debido a que no hay una distribución de intensidad de haz láser de forma uniforme a través de la fibra, por lo que esta tensión puede

ser la causa de la nucleación o formación de micro poros. Estos micro poros pueden incrementarse de tamaño hasta llegar a colisionarse y fusionarse con otros, de tal forma que pueden disminuir directamente la reflectancia, la cual es restada a la reflectancia de la RBG inicial, la cual experimenta un mínimo seguido de un segundo incremento, pero tiene la desventaja de que la fibra puede romperse por un nivel umbral de la irradiación ultravioleta pulsada.

Una diferencia entre este trabajo experimental y el de [Kukushkin 2005] es que en la formación de rejilla tipo IIA, la fibra no fue intervenida por ninguna tensión, ni fue sometida a ningún tratamiento térmico o hidrogenación para aumentar la fotosensibilidad de la fibra.

Se puede resumir que se observaron comportamientos de rejillas tipo I y tipo IIA dependientes de diferentes niveles de fluencia por pulso utilizada. Para niveles bajos de fluencias por pulso actúa un sólo mecanismo llamado formación de centros de color, observando rejillas tipo I y para niveles intermedios-altos de fluencia por pulso funciona un mecanismo adicional llamado compactación, en cambio para niveles altos umbrales de fluencias por pulso es posible observar la fotosensibilidad tipo IIA que puede ser asociado con el mecanismo de micro poros.

También se puede observar, como es afectada la reflectancia cuando se cambia el régimen de grabación de RBG, como es observado en la figura 58, donde se utilizó un nivel alto de fluencia por pulso de $F_p=0.66 \text{ J/cm}^2$ y se pueden observar cambios abruptos que indican que un proceso térmico ocurre en el núcleo de la fibra óptica, es decir, sí existe una gran influencia de régimen transitorio cuando es utilizado régimen de suministro de tren de pulsos.

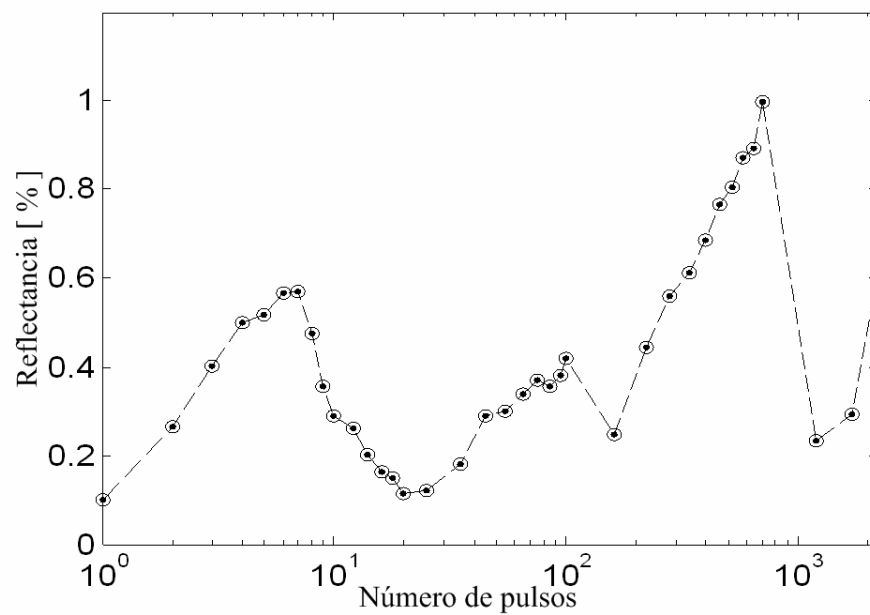


Figura 58. Cambios de reflectancia por efectos transitorios de temperatura observados en la grabación de una RBG a niveles altos de fluencia por pulso.

V.2 Conclusiones

- Se desarrolló una técnica para medición de fotosensibilidad utilizando método interferométrico Fabry-Perot para fibras ópticas con baja concentración de germanio, como en la fibra estándar para telecomunicaciones SMF-28 y en la fibra especial fotosensible de Fibercore para diferentes regimenes de irradiación UV.
- También se utilizó el método de máscara de fase para la grabación de rejillas de Bragg, observando su variación de reflectancia para diferentes regimenes de grabación, así como también se observó la presencia de diferentes mecanismos: formación de centros de color, compactación, micro fracturas en función de diferentes niveles de fluencia por pulso.
- El régimen térmico de la fibra es muy importante debido a efectos transitorios de temperatura en los primeros pulsos de grabación de RBG, que por efecto termo óptico se pueden provocar cambios tanto en la reflectancia en RBG como en la fase de los interferómetros y por lo tanto afecta directamente en la medición de cambio de índice.
- Primera observación de rejilla tipo IIA en fibra estándar tipo SMF28 con baja concentración de Ge. Este comportamiento de rejilla se observa cuando se excede de nivel umbral de fluencia por pulso.
- Para niveles altos de fluencias por pulsos, sí es posible observar los efectos de atenuación y micro fracturas en el núcleo de la fibra, hasta llegar al punto de ruptura mecánica de la fibra, por lo cual, para niveles altos de fluencias por pulsos se recomienda que la irradiación sea dentro de un intervalo de 3 minutos y para niveles bajos de fluencias por pulsos si se puede utilizar el régimen de tren de pulsos.

V.3 Trabajo a futuro

Entre los objetivos principales de este trabajo de tesis surgieron también temas interesantes de estudio, que son presentados a continuación:

- Investigar la influencia del proceso de hidrogenación para la formación de RBG y los mecanismos que intervienen, ya que sólo hay la hipótesis de que no es posible observar comportamiento de fotosensibilidad tipo IIA.
- Estudiar la fotosensibilidad en diferentes tipos de fibras, utilizando la irradiación UV pulsada para niveles bajos de fluencia por pulso e investigar la posibilidad de separar los mecanismos de formación de centros de color y densificación.

Bibliografía:

- Archambault, J. L., Reekie, L. y Russel, P. St. J. 1993. 100% Reflectivity Bragg reflectors produced in optical fibres by single excimer laser pulses. *Electronics Letters*. 29(5): 453-455p.
- Atkins, R.M. 1992. Measurement of the ultraviolet absorption spectrum of optical fibers. *Optics Letters*. 17(7): 469-471 p.
- Betz, D. y Staudigel, L. Trutzel M. N. 2002. Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest, OFS, 15th. 1: 55-58 p.
- Dianov, E.M., Vasiliev, S.A., Frolov, A. A. y Mendevkov, O. I. 1997. Germanosilicate glass refractive index change under singlet and triplet excitation of germanium oxygen deficient centers. *OSA Tech. Dig. Ser., Bragg gratings, Photosensitivity, Poling in Glass Fibres Waveguides*. 17: 175-177 p.
- Dianov, E.M., Golant, K. M., Khrapko, R. R., Kurkov, A. S.; Leconte, B., Douay, M., Bernage, P. y Niay, P. 1997. Grating formation in a germanium free silicon oxynitride fibre. *Electronics Letters*. 33(3): 236-237 p.
- Dianov, E. M., Mashinsky, V. M., Neustruev, V. B., Sazhin, O. D., Brazhkin, V.V. y Sidorov V. A. 1997. Optical absorption and luminescence of germanium oxygen-deficient centers in densified germanosilicate glass. *Optics Letters*. 22(14): 1089-1091 p.
- Dong, L., Cruz, J. L., Reekie, L., Xu, M. G. y Payne D. N. 1995. Enhanced photosensitivity in tin-codoped germanosilicates optical fibers. *Photonics Technology Letters, IEEE*. 7(9):1048-1050 p.
- Dong L., Archambault, L., Reekie L., Russel, P. St. J y Payne, D. N. 1995. Photoinduced absorption change in germanosilicate performs: evidence for the color center model of photosensitivity. *Applied Optics*. 34(18): 3436-3440 p.
- Dong, L. y Liu, W. F. 1997. Thermal decay of fiber Bragg gratings of positive and negative index changes formed at 193 nm in a boron co-doped germanosilicate fiber. *Applied Optics*. 36(31): 8222-8226 p.
- Douay, M., Ramecourt, D., Tanuay, T., Bernage, P., Niay, P., Dacosta, D. Matihue, C., Bayon, J. F. y Poullemec B. 1995. Microscopic investigations of Bragg gratings photowritten in germanosilicate fibers: in *Photosensitivity and Quadratic Nonlinearity in Waveguides: Fundamentals and Applications*. O.S.A. Technical Digest Series. 22: 48-51 p.

- Fernandez, A., Brichard, B., Berghmans, F. y Decréton, M. 2002. Dose-Rate Dependencies in Gamma-Irradiated Fiber Bragg Grating Filters. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 49(6): 2874-2878 p.
- Fernandez A., Brichard, B., Borgermans B., Berghmans, F., Decreton, M., Megret P., Blondel M. y Delchambre, A. 2002. Optical Fiber Sensors Conference, Technical Digest 15th. Portland, Oregon, USA. 1: 63-66 p.
- Fernando, H. N. J., Canning, J., Wosinski1, L., Jaskorzynska, B. y Dainese, M. 2003. Characterization of ultra-violet-induced changes in planar waveguides. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* 5: 335-340 p.
- Fiori, C. y Devine, R. A. B 1986. Evidence for a wide continuum of polymorphs in a Si-O₂. *Physical Review B*. 33: 2972-2974 p.
- Fiori, C. y Devine, R. A. B. 1986. Ultraviolet irradiation induced compaction and photoetching in amorphous thermal SiO₂. *Materials Research Society Symposium Proceeding*. Pittsburgh, USA. 61: 187-195 p.
- Fonjallaz, P. Y., Limberger, H. G. y Salathé, R. P. 1995. Tension increase correlated to refractive-index change in fibers containing UV-written Bragg gratings. *Optics Letters*. 20(11): 1346-1348 p.
- Friebele, E. J., Griscom, D.L. y Siegel, G. H., Jr. 1974. Defect centers in germania doped silica-core optical fiber. *Journal of Applied Physics*. 45:3424-3428 p.
- Friebele, E. J. y Griscom, D.L., 1986. Color centers in glass optical fibers waveguides. *Materials Research Society Symposium Proceedings*. Pittsburgh, USA. 61: 319-331 p.
- Grubsky, V. y Feinberg J. 2005. Rewritable densification gratings in boron-doped fibers. *Optics Letters*. 30(11): 1279-1281 p.
- Gusarov, A., Fernandez, A., Vasiliev, S., Medvedekov O., Blondel, M. y Berghmans F. 2002. Effect of gama-neutron nuclear reactor radiation on the properties of Bragg gratings written in photosensitive ge-doped optical fibre. *Nucl. Intr. Methods in Phys. Res. B*. 187(1): 79-86 p.
- Hand, D. P., Russell, P. St, J. y Wells, P. J. 1990. Topical meeting on Photorefractive Materials, effects and devices II. Ausois, France, OSA Technical Digest. 239 p.
- Hand, D. P. y Russell, P St. J. 1990. Photoinduced refractive index changes in germanosilicate optical fiber. *Optics Letters* 15(2):102-104p.

- Hill, K.O, Fuji, Y., Johnson, D.C., Kawasaki, B.S. 1978. Photosensitivity in optical waveguides: Application to reflection filter fabrication. *Applied physics Letters*. 32(10): 647-649 p.
- Hillmer, H., Zhu, H. L., Grabmaier, A., Hansmann S. y Burkhard H. 1994. Novel tunable semiconductor laser using continuously chirped distributed feedback gratings with ultrahigh spatial precision. *Applied Physics Letters*. 65(17): 2130-2132 p.
- Homoelle, D., Wielandy, S., Gaeta, A. L., Borrelli, N. F. y Smith Ch. 1999. Infrared photosensitivity in silica glasses exposed to femtosecond laser pulses. *Optics Letters*. 24(18): 1311-1313p.
- Hosono, H., Mizuguchi, M. y Skuja, L. 1999. Fluorine-doped SiO₂ glasses for F2 excimer laser optics: fluorine content and color-center formation. *Optics Letters*. 24(22): 1549-1551p.
- Illy, E. K., Booth H. J., Knowles M. R. H. 2003. Laser processing of photonics components using multiple UV wavelength source. *SPIE proc. ser. 4977*: 241-249 p.
- James S. W., Tatam R. P, Twin A., Morgan, M. y Noonan, P. 2002. 15th Optical Fibre Sensors Conference, Technical Digest. Portland, Oregon, USA. 1: 87-90 p.
- Kawazoe, H. 1985. Effects of modes of glass formation on structure of intrinsic of photo induced defects centered in III, IV, or V cations in oxide glasses. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 71: 213-234 p.
- Kersey, A. D., Davis, M. A., Patrick, H.J., Leblanc, M. Koo, K.P., Askins C.G, Putnam, M.A. y Friebele E.J. 1997. Fiber gratings sensor: Fiber grating, photosensitivity, and poling. *Journal Lighthwave Technology*. 15(8): 1442-1463 p.
- Kukushkin S. A. 2005. Nucleation of pores in brittle solids under load. *Journal of Applied Physics*. 98(3): 033503-033512 p.
- Ky. N. H., Limberger, H. G.; Salathe, R. P., Cochet, F. y Dong, L. 1998. Effects of drawing tension on the photosensitivity of Sn-Ge- and B-Ge-codoped core fibers. *Optics Letters*. 23(17): 1402-1404 p.
- Ky, N. H., Limberger, H. G., Salathe, R. P., Cochet, F., Dong, L. 2003. UV-irradiation induced stress and index changes during the growth of type-I and type-IIA fiber gratings. *Optics Communications*. 225(4): 313-318 p.
- Lam, D. K. W. y Garside B. K., 1981. Characterization of single mode-optical fiber filter. *Applied Optics*. 20: 440-445 p.

- Lee, J., Junhee, K., Young-Geun H., Sang-Hyuck K. y Lee S. 2004. Investigation of Raman fiber laser temperature probe based on fiber Bragg gratings for long distance remote sensing applications. *Optics Express*. 12(8): 1747-1752 p.
- Legoubin, M., Douay, M., Bernage, P. Niay, P., Boj, S. y Delevaque E. 1992. Free spectral range variations of grating-based Fabry-Perot filters photowritten in optical fibers. *J. Opt. Soc. Am. A*. 12(8): 1687-1694 p.
- Liu, Y., Williams, J.A. R., Zhang, L. y Bennion, I. 2002. Abnormal spectral evolution of fiber Bragg gratings in hydrogenated fibers. *Optics Letters*. 27(8): 586-588 p.
- Mashinsky, V. M., Neustruev, V. B., Dvoyrin, V.V., Vasiliev, S.A., Medvedkov, O.I.;Bufetov, I. A., Shubin, A. V.; Dianov, E.M., Guryanov, A. N. y Khopin, V.F. Germania glass core silica glass-cladding MCVD optical fibers: optical losses, photorefractivity, and Raman amplification. 2004. *Optics Letters*. 29(22): 2596-2598 p.
- Meltz G, Morey, W. W. y Glenn W. H. 1989. Formation of Bragg gratings in optical fibers by transverse holographic method. *Optics Letters*. 14(15): 823-825 p.
- Miridonov, S.V., Shylagin M. G. y Tentori D. 2001. Twin grating fibre optic sensor demodulation. *Optics Communications*. 191(3): 253-262 p.
- Mizunami, T., Itoh, T., Gupta, S. y Shimmura, T. 1996. Interferometric measurement of KrF-Laser-induced refractive index changes in germanosilicate fibers. *Optics Communications* 125: 226-230 p.
- Nishii, J., Fukumi K, Yamanaka, H., Kawamura, K., Hosono, H. y Kawazoe, H. 1995. Photochemical reactions in GeO₂-SiO₂ glasses induced by ultraviolet irradiation: comparison between Hg lamp and excimer laser. *Physical Review*. B. 52:1661-1665 p.
- Nishii, J. y Yamanaka, H. 1997. Bragg gratings printed upon thin glass films by excimer laser irradiation and selective chemical etching. *Applied Optics*. 36(27): 6852-6856 p.
- Othonos, A. y Kalli, K. 1999. *Fiber Bragg Gratings Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing*. Artech House, Boston. 422 p.
- Paccou, L., Lancry, M. y Douay, M. 2005. Kinetics of UV-induced blue luminescence linked with the observation of the local mean index in fiber Bragg gratings. *Optics Express* 13(19): 7342-7349 p.
- Pissadakis S. y Konstantaki M. 2005. Photosensitivity of germanosilicate fibers using 213nm, picosecond Nd: YAG radiation. *Optics Express*. 13(7): 2605-2610 p.

- Pureur, D.; Martinelli, G.; Bernage, P.; Niay, P.; Douay, M.; Delevaque, E. 1996. Characterization of the light scattered from type IIA phase gratings. Proceedings of the SPIE, Conference: Doped Fiber Devices, Ouellette, Francia. 2841: 121-131 p.
- Rao, Y., J. Henderson, P.J. Jackson, D. A., Zhang, L. y Bennion, I. 1997. Simultaneous strain, temperature and vibration measurement using a multiplexed in fibre Bragg grating/fibre-Fabry-Perot sensor system. Electronics Letters. 33(24):2063-2064 p.
- Russel, P. St. J. y Ulrich, R. 1985. Grating fiber-coupling as high-resolution spectrometer. Optics Letter. 10(6):291-293p.
- Sceats, M. G., Atkins, G. R. y Poole, S. B. 1993. Photoinduced index changes in optical fibers. Annual Reviews in Material Science. 23: 381-410 p.
- Shlyagin, M. G., Miridonov, S.V., Tentori, D. 1997. Revista Mexicana de Física. 43: 533-544 p.
- Shlyagin, M. G., Miridonov, S. V., Márquez, I. y Spirin, V. V. 2003. Bragg grating-based interferometric fiber optic sensors. 19th Congress of the International Commission for Optics: Optics for the Quality of Life. Proceedings of the SPIE. 4829: 976-977 p.
- Swart, P. L., Shylagin, M. G., Chtcherbakov, A. A. y Spirin, V.V. 2002. Photosensitivity measurement in optical fibre with Bragg grating interferometers. Electronics Letters. 38(24):1508-1510 p.
- Taunay, T., Niay, P., Bernage, P., Douay, M., Xie, W. X., Pureur, D., Cordier, P., Bayon, J. F., Poignant, H., Delevaque, E. y Poumellec, B. 1997. Bragg grating inscriptions within strained monomode high NA germania-doped fibres: part I. Experimentation. J. Phys. D: Appl. Phys. 30. 40–52 p.
- Trukhin, A. y Poumellec, B. 2003. Photosensitivity of silica glass with germanium studied by photoinduced of thermally stimulated luminescence with vacuum ultraviolet radiation. Journal of Non-Crystalline Solids. 324 (1-2): 21-28 p.
- Tsai, T. E. y Griscom, D. L. 1911. Defect centers and photoinduced self organization in Ge-doped silica core fiber. International WorkShop on Photoinduced Self Organization Effects in optical Fibers, SPIE. 1515: 14-28p.
- Tsai, T. E., Griscom, D.L. y Fiebrele. 1987. On structure of Ge associated defect centers in irradiated high purity GeO₂ and Ge doped SiO₂ glasses. Diffusion and defect data.53: 469-476 p.

- Uchino, T., Takahashi, M. y Yoko T., 2002. Correlation between macro-and microstructural changes in Ge: SiO₂ and SiO₂ glasses under intense ultraviolet irradiation. *Journal of the American Ceramic Society*. 85(5): 1089-1092 p.
- Washburn, B.R., Diddams, S. A., Newbury, N. R., Nicholson, J. W., Yan, M. F., Jrgensen C.G. 2004. Phase-locked, erbium-fiber-laser-based frequency comb in the near infrared. *Optics Letters*. 29(3): 250-252 p.
- Xie, W. X., Niay, P., Bernage, P., Douay, M., Bayon, J.F., Georges, T., Monerie, M. y Poullemec. 1993. Experimental evidence of two types of photorefractive effects occurring during photoinscriptions of Bragg gratings written within un germanosilicate fibres. *Optics Communications*. 104: 185-195 p.