



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN
INGENIERÍA**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**MODELADO MATEMÁTICO DE
LAS REJILLAS EN FIBRAS ÓPTICAS**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

INGENIERÍA ELÉCTRICA-TELECOMUNICACIONES

P R E S E N T A :

ALFREDO BELTRÁN HERNÁNDEZ



TUTOR:
DR. SERGUEI KHOTIAINTSEV

2011



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Jurado Asignado

Presidente: Dr. Neil Charles Bruce Davidson

Secretario: Dr. Mario Peña Cabrera

Vocal: Dr. Serguei Khotiaintsev

1^{er}. Suplente: Dr. José Ismael Martínez López

2^{do}. Suplente Dr. Oleksandr Martynyuk

Lugar o lugares donde se realizó la tesis:

Ciudad Universitaria, México D.F.

TUTOR DE TESIS

Dr. Serguei Khotiaintsev

FIRMA

Agradecimientos

A mi madre, mis abuelitos y toda mi familia por haberme apoyado incondicionalmente a lo largo de todos estos años.

Al Dr. Serguei Khotiaintsev por su apoyo, consejos y paciencia para la realización de este trabajo.

A la UNAM por la formación adquirida.

A la Coordinación de Estudios de Posgrado de la UNAM por el apoyo económico dentro de mis estudios de maestría.

A todas las personas que me han ofrecido su apoyo y amistad en esta etapa de mi vida.

Índice

1. Introducción	6
1.1 Antecedentes	6
1.2 Objetivos	7
1.3 Metas	7
1.4 Metodología de trabajo	8
1.5 Referencias	8
2. Rejillas en Fibras Ópticas (<i>Estado del Arte</i>)	10
2.1 Tipos de rejillas	10
2.2 Métodos de fabricación	14
2.3 Aplicaciones	16
2.4 Conclusiones	17
2.5 Referencias	18
3. Análisis y Síntesis de la Rejillas en Fibras Ópticas (<i>Estado del Arte</i>)	20
3.1 Métodos de análisis	20
3.2 Métodos de síntesis	23
3.3 Conclusiones	25
3.4 Referencias	25
4. Diseño Teórico de las Rejillas de Periodo Largo en Fibras Ópticas	27
4.1 Adaptación del Algoritmo Genético	27
4.2 Resultados de diseño	30
4.3 Pruebas de herramientas teóricas	36
4.4 Conclusiones	37
4.5 Referencias	38
5. Fabricación y Caracterización Experimental de las Rejillas de Periodo Largo en Fibras Ópticas	39
5.1 Descripción de la instalación experimental	39
5.1.1 Elementos del subsistema óptico	40
5.1.2 Elementos del subsistema mecánico	42
5.2 Metodología del experimento	43
5.3 Fabricación de Rejillas de Periodo Largo	43
5.4 Caracterización de las rejillas fabricadas	44
5.5 Análisis y caracterización de Rejillas de Bragg	45
5.6 Resultados	47
5.7 Comparación entre FBG y RPL	49

5.8 Conclusiones	49
5.9 Referencias	50
6. Discusión	51
7. Trabajo futuro	53
8. Conclusiones Generales	54
Anexos	
A. Algoritmo Genético adaptado	A.1
B. Publicaciones	B.1

1. Introducción

1.1 Antecedentes

Las rejillas en fibras ópticas, Rejillas de Bragg (FBG) [1-2] y Rejillas de Periodo Largo (RPL) [3-6], tienen propiedades especiales de filtrado de la radiación óptica. Estas propiedades son de suma importancia dentro de las telecomunicaciones, así como en el desarrollo de nuevos tipos de láseres, técnicas de medición óptica de diversas cantidades físicas, etc.

Las rejillas en fibras ópticas son estructuras muy complejas con un gran número de parámetros que afectan sus características. Dentro de estos parámetros se encuentran el tipo de fibra óptica y sus características de propagación, los materiales base del núcleo y del revestimiento, el tipo de impurezas y su concentración, el índice de refracción inicial de los materiales del núcleo y revestimiento antes de la grabación, y los parámetros de la rejilla: su periodo (constante o variable), la longitud total de la misma, la distribución del índice de refracción a lo largo de la fibra óptica después de la grabación, etc.

La tecnología utilizada en la fabricación de la rejilla también tiene un efecto importante sobre sus características debido a los diferentes fenómenos físicos involucrados en cada tecnología. En el caso de fabricación de rejillas mediante el efecto de un haz laser [4-8], hay diferentes longitudes de onda utilizadas, distintos valores de energía y diferentes patrones espaciales y temporales de aplicación de la energía del rayo láser. Por otro lado, para diferentes campos y aplicaciones, es necesaria la fabricación de rejillas con longitud, periodo, amplitud y fase no uniformes en el espacio y/o tiempo, lo cual es difícil de lograr de forma precisa y bien controlada.

Las FBG en fibras ópticas presentan un área relativamente madura de conocimiento, por su parte las RPL aun se encuentran en la etapa de investigación y desarrollo tecnológico. Las aplicaciones de las RPL incluyen filtros ecualizadores de ganancia de amplificadores ópticos EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier), sensores de diferentes cantidades físicas basados en RPL, láseres de fibra óptica, etc. [9-12].

Por lo anterior es importante investigar las RPL, tanto en el marco teórico como experimental y tecnológico. En el Departamento de Ingeniería en Telecomunicaciones (DIT) de la Facultad de Ingeniería de la UNAM se trabaja sobre nuevas tecnologías de comunicaciones ópticas, en particular se desarrollan proyectos de investigación que abarcan varios temas de fibras ópticas. El presente trabajo de tesis fue realizado en el marco de uno de estos proyectos con la finalidad de preparar el terreno para nuevas aplicaciones de las RPL en amplificadores EDFA y sensores de nivel de líquidos.

Por tal motivo, el presente trabajo pretende realizar el síntesis teórica de RPL y así como verificar su eficiencia, probar y validar la metodología de fabricación de las RPL con base en la técnica de grabación punto por punto mediante el efecto térmico del haz de un láser de dióxido de carbono (CO₂) de alta potencia [4-6], así como comparar algunas características de las RPL y FBG.

1.2 Objetivos

Objetivo General

- Obtención de nuevos conocimientos teóricos y prácticos sobre la eficiencia del método de síntesis teórica de las Rejillas de Periodo Largo en Fibras Ópticas basado en un Algoritmo Genético, así como pruebas y verificación de la metodología de fabricación de estas rejillas mediante el efecto térmico del haz de un láser de CO₂ de alta potencia.

Objetivos Particulares

- Pruebas y verificación de las características del método de síntesis teórica de las RPL utilizando el Algoritmo Genético.
- Implementación de un proceso tecnológico de grabación de RPL, en fibras ópticas de sílice, bajo la incidencia del haz de un láser de CO₂ de alta potencia de una longitud de onda de 10.6 μm.
- Pruebas y verificación de la metodología y parámetros óptimos del proceso de grabación por medio del haz de un láser de CO₂.
- Comparación de las características de las RPL y FBG.

1.3 Metas

- Pruebas y adaptación del software para la simulación de rejillas en fibras ópticas.
- Diseño teórico de algunas variantes de las RPL con características adecuadas para su uso en los EDFA.
- Fabricación de muestras de RPL en fibras ópticas mediante el efecto del haz infrarrojo de un láser de CO₂ de alta potencia de una longitud de onda de 10.6 micrómetros.
- Caracterización experimental de las fibras ópticas con las RPL.
- Caracterización de las muestras de las FBG.
- Evaluación de los resultados obtenidos en el desarrollo del presente trabajo.

1.4 Metodología de trabajo

- Se incluyen métodos teóricos, para la simulación de las rejillas, basados en la utilización de software existente y trabajos anteriores desarrollados en el DIT.
- En la fabricación y caracterización de muestras, se utilizarán los métodos experimentales descritos en la bibliografía existente sobre le presente tema.
- En la investigación experimental, se emplearán sistemas de control computarizado de las instalaciones para lograr una mejor calidad y cantidad de datos experimentales.

1.5 Referencias

- [1] Hill K.O., Malo B., Bilodeau F., Johnson D.C., Albert J., "Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phase mask," *Appl. Phys. Lett.* 62(10), 1035-1037(1993).
- [2] Hill K.O., Meltz G., "Fiber Bragg Grating Technology Fundamentals and Overview," *J. Lightw. Technol.* 15(8), 1263-1276(1997).
- [3] Vengsarkar A.M., Lemaire P.J., Judkins J.B., Bhatia V., Erdogan T., Sipe J.E., "Long-period fiber gratings as band-rejection filters," *J. Lightw. Technol.* 14(1), 58-68(1996).
- [4] Davis D.D., Gaylord T.K., Glytsis E.N. *et al.*, "Long-period fibre grating fabrication with focused CO₂ laser pulses," *Electron. Lett.* 34(3), 302-303(1998).
- [5] Davis D.D., Gaylord T.K., Glytsis E.N. *et al.*, "CO₂ laser-induced long-period fibre gratings: Spectral characteristics, cladding modes and polarisation independence," *Electron. Lett.* 34(14), 1416-1417(1998).
- [6] Rao Y.J., Zhu T., Ran Z.L., Wang Y.P., Jiang J., Hu A.Z., "Novel long-period fiber gratings written by high-frequency CO₂ laser pulses and applications in optical fiber communication," *Opt. Commun.* 229(1-6), 209-221(2004).
- [7] Zagorulko K., Kryukov P., Larionov Yu., Rybaltovsky A., Dianov E., Chekalin S., Matveets Yu., Kompanets V., "Fabrication of fiber Bragg gratings with 267 nm femtosecond radiation," *Opt. Express* 12(24), 5996-6001(2004).
- [8] Zhang H., Eaton S.M., Li J., Herman P.R., "Femtosecond laser direct writing of multiwavelength Bragg grating waveguides in glass," *Opt. Lett.* 31(23), 3495-3497(2006).
- [9] Liu Y., Zhang L., Bennion I., "Fiber-optic load sensors with high transverse strain sensitivity based on long-period gratings in B/Ge co-doped fiber," *Electron. Lett.* 35(8), 661-662(1999).
- [10] Flores-Llamas I., Kolokoltsev O., Svyryd V., "Refractometric sensors based on long period optical fiber gratings," *Revista Mexicana de Física* S 52(2), 75-78(2006).
- [11] Lin C.Y., Wang L.A., "A Wavelength- and Loss-Tunable Band Rejection Filter Based on Corrugated Long-Period Fiber Grating," *Photon. Technol. Lett.* 13(4), 332-334(2001).

- [12] Ni N., Chana C.C., Tanb K.M., Tjinb S.C., Dong X.Y., *“Broad-band EDFA gain flattening by using an embedded long-period fiber grating filter,”* Opt. Commun., 271(2), 377-381(2007).

2. Rejillas en Fibras Ópticas (*Estado del Arte*)

Introducción

La constante evolución de los sistemas de telecomunicaciones ha generado un desarrollo significativo de las tecnologías existentes debido a la necesidad de un ancho de banda mayor, servicios integrados, mayores aplicaciones, etc. El uso de sistemas de comunicaciones ópticas es la base de la comunicación moderna ya que cumple con los requisitos necesarios para ofrecer una mejor calidad a los usuarios. El avance de esta tecnología ha generado un desarrollo muy importante tanto en los dispositivos ópticos como en las nuevas técnicas de modulación, transmisión, procesamiento de información, etc.

Muchos y diversos elementos usados en los sistemas ópticos están basados en Rejillas de Bragg (FBG) y en Rejillas de Periodo Largo (RPL), esto se debe a las ventajas que presentan tales dispositivos ya que se encuentran en una longitud de fibra óptica no muy grande. Esta característica los hace de fácil inserción y compatibilidad con los sistemas, lo que genera una mayor facilidad al momento de realizar cualquier proceso ya que este será a nivel óptico. Dispositivos como láseres, amplificadores, multiplexores, demultiplexores, ecualizadores de ganancia, filtros ópticos, etc., al igual que algunos sensores ópticos de diferentes parámetros físicos tienen como base las rejillas en fibra óptica.

Desde este punto de vista, es importante estudiar el comportamiento de las FBG y las RPL para tener conocimiento sobre las tecnologías de fabricación, los métodos de análisis y síntesis, etc.

2.1 Tipos de rejillas

De forma general, una rejilla en fibra óptica es una modificación, o perturbación, de la estructura interna (modulación del índice efectivo de los modos del núcleo y/o la cubierta, Ec. 2.1) en una determinada longitud de la fibra L ; esta modificación es lograda gracias a la propiedad del material de ser fotosensible [1].

$$n(z) = n_0 + \Delta n \cos\left(\frac{2\pi z}{\Lambda}\right) \quad \text{Ec. 2.1}$$

donde n es el índice de refracción, z es el eje longitudinal, Δn es la variación del índice de refracción y Λ es el periodo de la rejilla. Dependiendo de su característica espectral, se tienen dos tipos de rejillas:

- a. **Rejillas de Bragg:** estas rejillas tienen un periodo, Λ , menor a un micrómetro [2] y acoplan luz entre el modo fundamental del núcleo (HE_{11}) de una fibra óptica monomodo y el mismo modo con propagación contraria, produciendo un espectro de reflexión del modo fundamental. La longitud de onda de resonancia, λ_r , es aquella en la que ocurre el máximo acoplamiento o la máxima reflexión y está dada por:

$$\lambda_r = 2n_{co}\Lambda \quad \text{Ec. 2.2}$$

donde n_{co} es el índice efectivo del modo del núcleo.

- b. **Rejillas de Periodo Largo:** en este tipo de rejillas el periodo, Λ , es del orden de centenas de micrómetros [3]; existe un acoplamiento de la luz entre el modo fundamental del núcleo (HE_{11}) y varios modos de la cubierta, originando un amplio espectro de transmisión del modo fundamental con distintas bandas de atenuación. La longitud de onda de resonancia, λ_r , donde ocurre el máximo acoplamiento o máxima atenuación para cierta banda, está dada por:

$$\lambda_r = n_{co} - n_{cl} \Lambda \quad \text{Ec. 2.3}$$

donde n_{co} es el índice efectivo del modo del núcleo y n_{cl} es el índice efectivo del modo de la cubierta.

Debido a que las FBG acoplan el modo fundamental del núcleo con el mismo modo pero con propagación contraria, su respuesta espectral es similar a la de un filtro supresor de banda; de forma general la respuesta suele representarse en función de la longitud de onda resonante, es decir mediante el espectro de reflexión, Fig. 2.1. Para el caso de las RPL, que acoplan el modo fundamental del núcleo con varios modos de cubierta su respuesta espectral suele ser representada por la banda suprimida que se genera, Fig. 2.2.

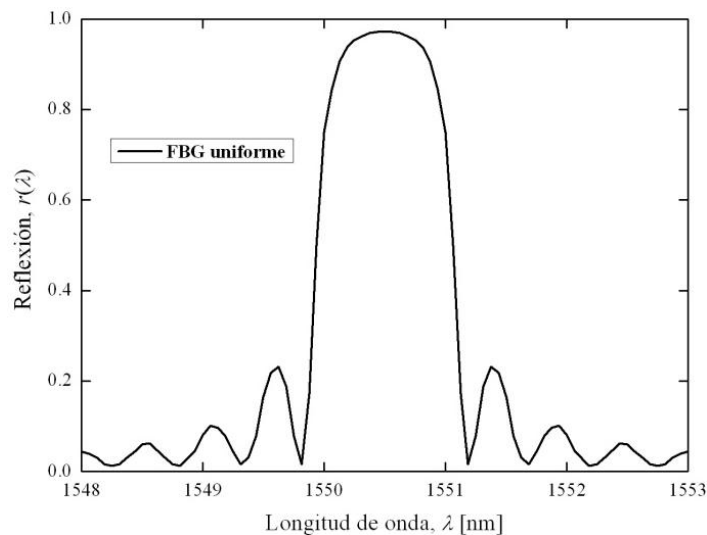


Figura 2.1. Espectro de reflexión de una FBG uniforme.

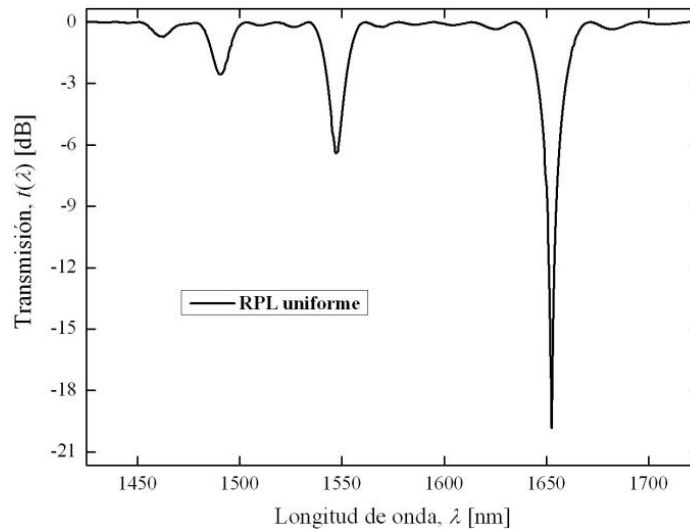


Figura 2.2. Espectro de transmisión una RPL uniforme.

Los parámetros que describen a una rejilla en fibra óptica son:

- a. **Longitud de la rejilla, L :** es la distancia física de la fibra óptica donde se encuentra la rejilla; es decir, es la zona donde se ha realizado la modificación del índice de refracción del núcleo y/o cubierta.
- b. **Periodo, Λ :** es la relación con la cual se realiza la modificación interna de la fibra para poder obtener el comportamiento espectral deseado.
- c. **Coefficiente de acoplamiento:** es el grado de reflexión (FBG) o atenuación (RPL) en cada banda y depende del coeficiente de acoplamiento entre los modos de propagación. Se trata de un coeficiente complejo, es decir tiene una componente de magnitud y una de fase. Debido a que las rejillas son fabricadas generando una modulación se puede tener una variación de la magnitud, κ (directamente proporcional a la amplitud de modulación del índice de refracción) o de la fase, ϕ (representa cambios de fase en la rejilla, es decir, en la misma modulación periódica del índice).

Otra de las clasificaciones de las rejillas en fibras ópticas radica en las características de sus parámetros, es decir con base en características físicas. De esta forma se tienen los siguientes tipos:

- a. **Rejilla Uniforme:** una rejilla uniforme en fibra óptica tiene la particularidad de mantener constantes todos sus parámetros a lo largo de la sección donde se encuentra dicha rejilla. El periodo y el coeficiente de acoplamiento (en magnitud y fase) mantienen su valor en toda la rejilla [4]. Este tipo de rejillas presentan

espectros simétricos, Fig. 2.1 y Fig. 2.2; se observa que las bandas de atenuación son simétricas con respecto a su longitud de onda de resonancia.

- b. **Rejillas no uniformes:** las rejillas no uniformes tienen variación de algún o alguno de sus parámetro a lo largo de la longitud de la rejilla. Tal variación puede ser de periodo, del coeficiente de acoplamiento o de la longitud en cada sección (si se considera que la rejilla se compone de secciones y cada una puede tener una longitud distinta). Las variaciones pueden ser controladas (incrementos fijos de algún parámetro) o arbitrarias, esto depende de las necesidades y aplicaciones a desarrollar debido a que son diseñadas para un comportamiento particular y no general como en el caso de las rejillas uniformes [5]. Los espectros de las rejillas no uniformes pueden ser simétricos o asimétricos; cuando se introducen cambios de fase en algún punto de la rejilla su espectro se modifica, pudiendo ser espectros simétricos o asimétricos, Fig. 2.3.
- c. **Rejillas Apodizadas:** estas rejillas son un caso particular de las rejillas no uniformes. La apodización es la variación gradual de la magnitud del coeficiente de acoplamiento; al ser una variación gradual existe un control sobre la amplitud de la modulación del índice de refracción. Al igual que las rejillas no uniformes, la longitud de onda de resonancia depende de los cambios en la amplitud de la modulación [6].
- d. **Rejillas Inclınadas:** estas rejillas se destacan debido a que en el proceso de fabricación se posiciona la fibra con un determinado ángulo de inclinación; tal variación provoca que, para el caso de las RPL, algunos modos guiados del núcleo se acoplen con algunos modos guiados en la cubierta [7].
- e. **Rejillas Helicoidales:** son rejillas donde la modificación del índice de refracción longitudinal no es en un solo plano de la fibra óptica; se genera una torsión en la fibra para generar una modulación “circular” a lo largo de la fibra óptica [8].

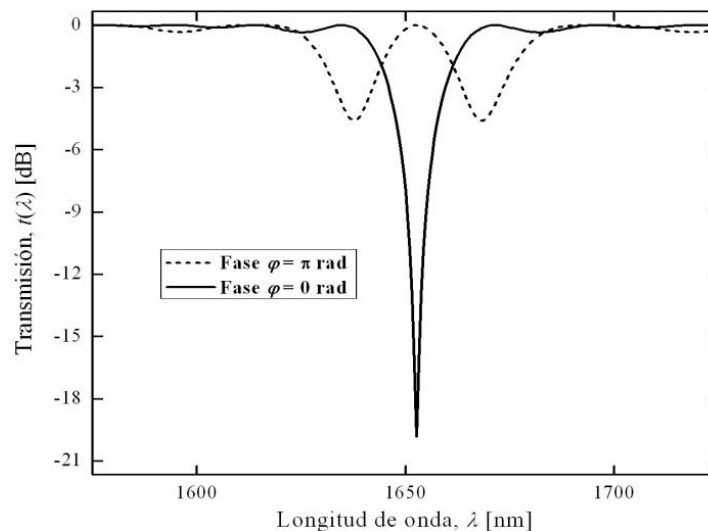


Figura 2.3. Espectro de transmisión de una RPL no uniforme con modificación de fase de π rad en el centro de la rejilla (línea punteada), RPL sin modificación de fase (línea continua).

2.2 Métodos de fabricación

Las tecnologías de fabricación se basan, principalmente, en la modificación permanente del índice de refracción del núcleo y/o de la cubierta de la fibra óptica. Esto fundamentado en la propiedad de fotosensibilidad que las fibras ópticas tienen [1]. Existen técnicas alternas basadas en cambios temporales del índice de refracción que son inducidos por efectos mecánicos

La propiedad de la fotosensibilidad en las fibras ópticas fue demostrada por primera vez por Hill *et al.* [1]. Se pudo observar que al exponer por unos minutos una fibra dopada con germanio a la luz radiada por un láser de argón, esta presentaba una reflexión de luz. De esta forma comenzaron a desarrollarse experimentos relacionados con las modificaciones inducidas en el núcleo de la fibra óptica, lo que desencadenó en las FBG [2]. Dentro de los métodos de fabricación más importantes y utilizados encontramos los siguientes:

Inscripción por Haz Sencillo:

Esta técnica fue desarrollada en 1978 [1]; emplea un haz de luz láser monomodo, a 488 nm, Fig. 2.4. Mediante esta técnica se descubrió la propiedad de fotosensibilidad de las fibras ópticas.

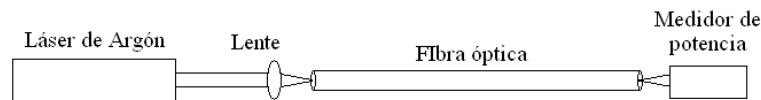


Figura 2.4. Esquema para la fabricación de rejillas en una fibra óptica [1].

La formación de la rejilla se debe a que existe una reflexión al final de la fibra; esta reflexión, que viaja en sentido opuesto a la luz láser emitida, genera un patrón de interferencia en el núcleo de la fibra. Este patrón, estacionario, tiene una periodicidad de $\lambda/2n$, donde λ es la longitud de onda del láser utilizado y n el índice de refracción del núcleo en el modo de la longitud de onda de emisión del láser. De esta forma se genera una modificación local del índice de refracción en algunas zonas; debido a que la reflexión aumenta, en función del tiempo, las variaciones del índice de refracción van en aumento. Actualmente se utiliza esta técnica para la fabricación de FBG.

Interferometría o Técnica Holográfica:

Esta técnica fue propuesta en 1989 [9]. Este método se basa en un interferómetro, Fig. 2.5; con el uso de un láser y un separador de haz, se obtienen dos rayos que son dirigidos mediante espejos hacia un mismo punto donde existe un ángulo θ entre ellos. En el punto donde se encuentran ambos rayos se genera un patrón de interferencia que es grabado en el núcleo de la fibra; este método tiene dificultades debido a que pequeñas variaciones

pueden causar variaciones mayores en el patrón de interferencia. Su principal aplicación es en la fabricación de FBG.

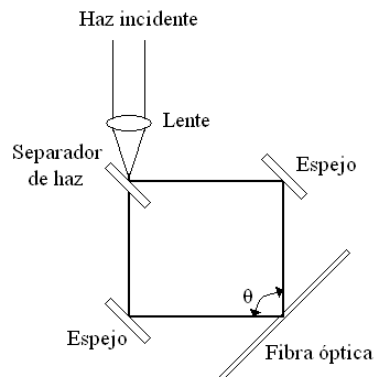


Figura 2.5. Esquema para la fabricación de rejillas basada en interferometría [9].

Mascarilla de fase:

Este método fue demostrado en 1993 [10] y se basa en la fotolitografía; utiliza una mascarilla de fase donde el periodo depende de la rejilla deseada. Esta mascarilla funciona como el patrón que es transferido al núcleo de la fibra; el método es muy parecido al basado en interferometría donde la máscara de fase hace las veces de separador de haz y crea un patrón de interferencia. Debido a que el patrón generado puede alcanzar resoluciones micrométricas o mayores, es un método utilizado en la fabricación de FBG.

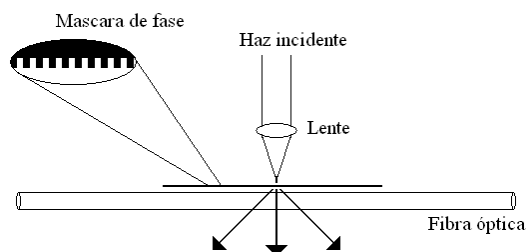


Figura 2.6. Esquema para la fabricación de rejillas basada en una mascarilla de fase [10].

Punto por Punto:

Fue desarrollada en 1993 [11] y se basa en la modificación del índice de refracción paso por paso. Se posiciona la fibra óptica de tal forma que el haz láser es perpendicular a esta, Fig. 2.7; la radiación emitida por el haz láser afecta solo una sección de la fibra. Para generar la rejilla, es necesario mover la fibra de forma periódica y paralela al eje de esta. La rejilla queda formada después de varios movimientos de la fibra, es decir después de un número grande de modificaciones periódicas. Uno de los problemas de esta tecnología es la necesidad de usar lentes para enfocar perfectamente el haz, así como una unidad de desplazamiento de alta calidad. Dependiendo de la resolución de la unidad de desplazamiento se pueden fabricar RPL o FBG.

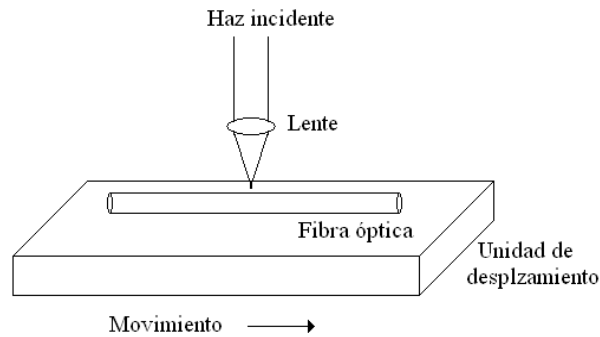


Figura 2.7. Esquema para la fabricación de rejillas basada en el método de punto por punto [11].

Existen algunos métodos alternos para la fabricación de rejillas, en particular para RPL. Estos métodos son:

- a. **Láser de Dióxido de Carbono:** es un caso particular de la tecnología punto por punto ya que el láser utilizado, de dióxido de carbono (CO_2), emite pulsos en instantes de tiempo controlados lo que permite mover la fibra óptica donde se fabricará la rejilla. Su aplicación es posible en RPL debido a que el ancho del haz es mayor comparado con el periodo necesario en las rejillas de Bragg [12].
- b. **Arco eléctrico:** al igual que el método anterior, es una variación de la técnica punto por punto donde los cambios del índice son inducidos mediante un arco eléctrico. El arco eléctrico utilizado debe tener una potencia suficiente capaz de modificar la estructura interna de la fibra óptica [13].
- c. **Inducción mecánica:** esta tecnología de fabricación es reversible ya que los cambios del índice de refracción se inducen por elementos mecánicos que afectan la geometría de la fibra óptica. Al eliminar los elementos mecánicos, la fibra óptica es capaz de volver a su estado natural recuperando sus propiedades y comportamiento espectral [14].

2.3 Aplicaciones

El uso de Rejillas en Fibras Ópticas tiene diversas aplicaciones, gracias a la propiedad de filtrado óptico que posee. Las aplicaciones están en función del tipo de rejilla que se tenga; de forma general las rejillas, tanto de Bragg como de periodo largo, tienen aplicación como sensores de temperatura, tensión, etc. [4, 7, 16-17]. Debido a que la rejilla es una modificación de la estructura interna, cuando la estructura se ve modificada por algún factor externo existe un cambio de la longitud de onda de resonancia, este cambio indica una variación en el parámetro físico externo.

Las FBG tienen la particularidad de que, gracias a su espectro angosto y la alta reflexión que proporcionan, son usadas en sistemas multicanal [5] y en láseres de alta potencia [15]. Una aplicación de gran interés de las FBG es la compensación de la dispersión cromática [6]; con una rejilla no uniforme es posible lograr que diferentes longitudes de onda viajen a diferente velocidad con lo cual los pulsos son compactados compensando el efecto provocado por la naturaleza de la fibra óptica.

En el caso de las RPL las principales aplicaciones son los sensores de cantidades físicas y los filtros ecualizadores de ganancia para EDFA [18]. Este tipo de rejillas no pueden ser utilizadas para cuestiones de canalización debido a que su comportamiento espectral no implica una reflexión; su base teórica es equivalente a la de un filtro supresor de banda.

2.4 Conclusiones

El uso y desarrollo de Rejillas en Fibras Ópticas es bastante útil gracias a las propiedades y ventajas que ofrecen estos dispositivos. El uso de tecnología completamente óptica ofrece una plusvalía a las rejillas pues se tiene un funcionamiento a nivel óptico.

El estudio del funcionamiento y los métodos de fabricación de las rejillas en fibras ópticas, es importante ya que es la base para el estudio y desarrollo de los métodos de análisis y síntesis de las mismas. Al entender y conocer el funcionamiento de las rejillas en fibras ópticas es posible conocer las limitantes que existen en estos dispositivos.

Las tecnologías de fabricación se basan en el mismo principio, existen variaciones que han sido desarrolladas para contrarrestar efectos observados en nuevos desarrollos científicos. Estas tecnologías representan un gran interés debido a la necesidad de implementar mecanismos más sencillos y económicos para la fabricación.

Las aplicaciones son bastas y muy variadas en diversas ramas de la ingeniería, en particular en los sistemas de comunicaciones y sistemas de sensado de diferentes parámetros físicos. Debido a la creciente necesidad de aplicaciones particulares, el diseño de dispositivos basados en rejillas en fibras ópticas es fundamental.

Actualmente no existe una metodología ideal para la fabricación de las rejillas en fibras ópticas. Se han experimentado múltiples combinaciones capaces de obtener mejores resultados. Debido a que existe gran diversidad en las tecnologías de fabricación, es conveniente partir de esta variante para conocer los métodos de análisis y síntesis a utilizar en la resolución de los problemas particulares.

2.5 Referencias

- [1] Hill K.O., Fujii Y., Johnson D.C., Kawasaki B.S., "Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication," *Appl. Phys. Lett.* 32, 647-649(1978).
- [2] Hill K.O., Meltz G., "Fiber Bragg Grating Technology Fundamentals and Overview," *J. Lightw. Technol.* 15(8), 1263-1276(1997).
- [3] Vengsarkar A.M., Lemaire P.J., Judkins J.B., Bhatia V., Erdogan T., Sipe J.E., "Long-period fiber gratings as band-rejection filters," *J. Lightw. Technol.* 14(1), 58-68(1996).
- [4] Shu X. et al., "Single uniform FBG for simultaneous measurement of liquid level and temperature," *Meas. Sci. Technol.* 21(9), 094003(2010).
- [5] Turitsyna E.G., Ania-Castanon J.D., Turitsyn S.K., Kennedy L., Sugden K., "Impact of design of sharp non-uniform fibre Bragg gratings on system performance," *Electron. Lett.* 39(4), 351-353(2003).
- [6] Chai J., Yu Z., Liu Y., "Analysis of the Apodization Parameter of Linearly Chirped Bragg Gratings for Dispersion Compensation," *First International Conference on Communications and Networking in China*, 1-5(2006).
- [7] Alberto N.J., Marques C.A., Pinto J.L., Nogueira R.N., "Three-parameter optical fiber sensor based on a tilted fiber Bragg grating," *Appl. Opt.* 49(31), 6085-6091(2010).
- [8] Oh S., Lee K.R., Paek U.C., Chung Y., "Fabrication of helical long-period fiber gratings by use of a CO₂ laser," *Opt. Lett.* 29(13), 1464-1466(2004).
- [9] Meltz G., Morey W.W., Glenn W.H., "Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method," *Opt. Lett.* 14(15), 823-825(1989).
- [10] Hill K.O., Malo B., Bilodeau F., Johnson D.C., Albert J., "Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phase mask," *Appl. Phys. Lett.* 62(10), 1035-1037(1993).
- [11] Malo B., Hill K.O., Bilodeau F., Johnson D.C., Albert J., "Point-by-point fabrication of micro-Bragg gratings in photosensitive fibre using single excimer pulse refractive index modification techniques," *Electron. Lett.* 29(18), 1668-1669(1993).
- [12] Drozin L., Fonjallaz P.Y., Stensland L., "Long-period fibre gratings written by CO₂ exposure of H₂-loaded, standard fibres," *Electron. Lett.* 36(8), 742-744(2000).
- [13] Malki A., Humbert G., Ouerdane Y., Boukhenter A., Boudrioua A., "Investigation of the writing mechanism of electric-arc-induced long-period fiber gratings," *Appl. Opt.* 42(19), 3776-3779(2003).
- [14] Savin S., Digonnet M.J.F., Kino G.S., Shaw H.J., "Tunable mechanically induced long-period fiber gratings," *Opt. Lett.* 25(10), 710-712(2000).
- [15] Mohammed W., Gu X., "Fiber Bragg grating in large-mode-area fiber for high power fiber laser applications," *Appl. Opt.* 49(28), 5297-5301(2010).
- [16] Liu Y., Zhang L., Bennion I., "Fiber-optic load sensors with high transverse strain sensitivity based on long-period gratings in B/Ge co-doped fiber," *Electron. Lett.* 35(8), 661-662(1999).

- [17] Flores-Llamas I., Kolokoltsev O., Svyryd V., *"Refractometric sensors based on long period optical fiber gratings,"* Revista Mexicana de Física S 52(2), 75-78(2006).
- [18] Ni N., Chana C.C., Tanb K.M., Tjinb S.C., Dong X.Y., *"Broad-band EDFA gain flattening by using an embedded long-period fiber grating filter,"* Opt. Commun., 271(2), 377-381(2007).

3. Análisis y Síntesis de las Rejillas en Fibras Ópticas (*Estado del Arte*)

Introducción

En este capítulo se presenta una breve revisión de los métodos de análisis y síntesis más comunes, y usados, para la tarea de diseñar diversos dispositivos basados en las rejillas en fibras ópticas. Para el diseño de FBG y RPL, es vital conocer el funcionamiento y base de los métodos existentes tanto de análisis como de síntesis. En el caso del análisis de las rejillas en fibras ópticas, la base son métodos matemáticos que describen el comportamiento de los dispositivos. Con base a estos métodos matemáticos existentes es posible realizar un proceso inverso conocido como método de síntesis.

En el caso de los métodos de análisis se cuenta con los parámetros de la rejilla óptica, con lo cual es posible obtener el comportamiento espectral; por otro lado, mediante un proceso de síntesis es factible adquirir las características de uno o más parámetros de la rejilla. Los valores obtenidos con la síntesis es posible generar un comportamiento espectral definido previamente.

3.1 Métodos de análisis

A partir de las propiedades encontradas en las rejillas en fibras ópticas, en particular gracias al efecto de fotosensibilidad [1], ha sido necesario desarrollar modelos matemáticos capaces de representar tal comportamiento. La base de estos métodos de análisis comenzó con algunos métodos existentes y algunos desarrollados, pero siempre basados en tratar de explicar la propagación de la radiación electromagnética en un medio periódico. Dentro de los métodos que sirvieron como base para los demás se encuentran dos aproximaciones: el formalismo de las ondas de Bloch [2] y la Teoría de Modos Acoplados [3].

Análisis de ondas Bloch

El análisis basado en la teoría de Bloch representa una solución exacta para las estructuras con perturbaciones uniformes. Esta teoría toma en cuenta la propagación de los campos en la estructura con un análisis de la dispersión. Para el caso de las estructuras no periódicas la solución no es totalmente exacta, la solución aproximada que se obtiene numéricamente es relativamente buena [2].

La ventaja de utilizar este método, para rejillas en fibras ópticas uniformes, es la obtención de una solución exacta; en el caso de rejillas no uniformes es conveniente utilizar la teoría de modos acoplados en su extensión del método de la matriz fundamental para obtener mejores resultados.

Teoría de Modos Acoplados

En el entendido de que estudiar la propagación de la luz en un medio guiado con perturbaciones es relativamente complejo cuando se utiliza un modelo geométrico o un análisis basado en la teoría de Maxwell, el uso de la Teoría de Modos Acoplados es una vía para analizar de forma relativamente sencilla el comportamiento del medio. En esta teoría se tratan de representar las perturbaciones mediante una superposición basada en las soluciones conocidas de la guía sin perturbación alguna.

Este formalismo indica que cuando dos modos de propagación están acoplados, las ondas que se incrementan o disminuyen con la distancia pueden ser generadas cuando la energía de ambos modos está en direcciones opuestas o cuando la energía es generada mediante acoplamiento [4]. La base de esto es la conservación de la energía y la linealidad, relacionados mediante ecuaciones diferenciales de acoplamiento entre las ondas de propagación.

De forma general, este formalismo se basa en las ecuaciones diferenciales de acoplamiento de los modos, ya sea en el mismo sentido o en contra sentido; se considera la relación entre los modos que tienen la posibilidad de propagarse en la guía de onda. Es importante mencionar que inicialmente se desarrolló para rejillas periódicas, o uniformes, pero ha sido extrapolado para estructuras aperiódicas, rejillas no uniformes [5].

Método del índice efectivo

En este método la estructura es dividida en secciones donde cada una tiene un valor muy pequeño, menor que el periodo de la rejilla. Se realiza un cálculo de los campos dentro de cada sección; se hace la suposición de que el índice de refracción permanecerá constante en toda la sección (método de del índice efectivo). En cada sección se tiene un acoplamiento con la sección anterior y con la sección posterior, como cada sección es modelada con una matriz es posible caracterizar la estructura total mediante una matriz global obtenida por la multiplicación de la matriz de cada una de las secciones [6].

Método de la matriz fundamental

En este método, también conocido como método de la matriz de transferencia, se analiza la propagación de los modos por secciones, similar al método del índice efectivo. Es posible

reproducir el comportamiento total de una guía de onda con una perturbación (rejilla) al tener una división del medio, cada una de las secciones (mediante las ecuaciones de la teoría de modos acoplados) se puede considerar como una nueva estructura [7].

Este método complementa la teoría de modos acoplados, ya que al dividir una estructura de mayor dimensión en muchas estructuras pequeñas (cada una más grande que el valor del periodo) se pueden analizar casos de rejillas en fibras ópticas con geometrías muy complejas o patrones espaciales muy especiales. En el caso de [8] se utiliza este método para modelar una RPL con características geométricas especiales; a grandes rasgos lo que se realiza es la división de la estructura global en pequeñas estructuras periódicas, consideradas uniformes, para conocer la respuesta total de la estructura. La forma de obtener la respuesta total (matriz general) es mediante la obtención de la respuesta en cada una de las secciones. La forma de encontrar los la matriz fundamental de cada sección es con la siguiente ecuación:

$$\begin{bmatrix} R & z_m \\ S & z_m \end{bmatrix} = F_m \begin{bmatrix} R & z_{m-1} \\ S & z_{m-1} \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 3.1}$$

Donde el valor de R corresponde al modo fundamental, el valor de S corresponde al modo de acoplamiento, F es la matriz fundamental, z_m es la sección siguiente y z_{m-1} es la sección precedente para el cálculo de la matriz fundamental. La obtención de estos valores se encuentra descrita en [9-11]; los valores de la matriz F_m están dados por:

$$\begin{aligned} f_{m,11} &= \cos \gamma L_m + \frac{j\delta}{\gamma} \text{sen } \gamma L_m \\ f_{m,12} &= -\frac{j\kappa}{\gamma} \text{sen } \gamma L_m \\ f_{m,21} &= -\frac{j\kappa}{\gamma} \text{sen } \gamma L_m \\ f_{m,22} &= \cos \gamma L_m - \frac{j\delta}{\gamma} \text{sen } \gamma L_m \end{aligned} \quad \text{Ec. 3.2}$$

Donde L_m representa la sección m a analizar, κ es el coeficiente de acoplamiento cruzado (entre el modo fundamental y el modo de acoplamiento), δ es la desintonización de frecuencia (indica la desviación de sincronización) y $\gamma = \sqrt{\kappa^2 + \delta^2}$.

Para obtener la matriz fundamental total de la rejilla en la fibra óptica es necesario obtenerla con la siguiente ecuación:

$$F = \prod_{i=1}^M F_i \quad \text{Ec. 3.3}$$

Con la matriz fundamental total, es posible relacionar los extremos de la rejilla de la siguiente forma:

$$\begin{bmatrix} R & L \\ S & L \end{bmatrix} = F \begin{bmatrix} R & 0 \\ S & 0 \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 3.4}$$

3.2 Métodos de síntesis

La síntesis de rejillas en fibras ópticas es un proceso inverso al análisis; consiste en encontrar los parámetros óptimos de la rejilla (longitud de cada sección, periodo, coeficiente de acoplamiento y fase), con la finalidad de obtener una respuesta espectral determinada. La finalidad de utilizar un método de síntesis es diseñar dispositivos de línea capaces de tener un comportamiento espectral especial con una función en particular.

La mayoría de los métodos de síntesis han sido desarrollados para su aplicación en rejillas de Bragg; métodos como el esparcimiento inverso, las representaciones tiempo-frecuencia y algunos métodos de optimización son la base de la síntesis de las FBG. Por otra parte, para la síntesis de Rejillas de Periodo Largo los métodos más usuales son el Pelado de Capas (Layer Peeling), los algoritmos evolutivos, como Algoritmos Genéticos (Genetic Algorithms, GA), y la Programación Evolutiva (Evolutionary Programming, EP).

Métodos de esparcimiento inverso

Los métodos de esparcimiento inverso tienen diversas variantes, lo que genera que sean de gran utilidad para la síntesis de rejillas en fibra óptica. Una de las variantes es la mencionada en [12], en este caso se tiene un diseño basado en la transformada de Fourier mediante el esparcimiento inverso. Se hace el análisis mediante el método del índice efectivo, el cual está directamente relacionado con los coeficientes de reflexión y transmisión mediante la transformada de Fourier; el método presentado es para una sola dimensión.

Otra variación del método de esparcimiento inverso se presenta en [13], aquí se utilizan las ecuaciones de Gel'fand-Levitan-Marchenko (GLM). Este método se basa en la teoría de modos acoplados. Se presenta una aproximación para el diseño de una RPL con la optimización de un GA; debido a que está basado en la teoría de modos acoplados, para el

caso de una rejilla en fibra óptica no uniforme es necesario utilizar el método de la matriz fundamental.

Un método que se desprende del esparcimiento inverso es Pelado de Capas; en este método se considera que la rejilla está formada por capas donde se propagan las ondas. Debido a la suposición de que el medio está compuesto por capas, es necesario analizar la estructura de una forma recursiva [14]. La forma en que funciona este método es relativamente sencilla, en un extremo de la rejilla se aplican condiciones de frontera particulares para calcular el valor del coeficiente de acoplamiento que sea capaz de satisfacer tales condiciones y así los campos se puedan propagar a la siguiente capa. En la nueva capa es necesario calcular, de nueva cuenta, el coeficiente de acoplamiento que satisface las nuevas condiciones de frontera y así sucesivamente hasta llegar al final de la rejilla.

Dentro del Pelado de Capas se encuentran dos variantes [15]; el Pelado de Capas Discreto, donde la rejilla es vista de forma discreta, y el Pelado de Capas Continuo, donde la rejilla se ve de forma continua para el coeficiente de acoplamiento. Es importante mencionar que el segundo método arroja un valor muy similar al método discreto cuando se considera una cantidad muy grande (prácticamente infinita) de capas.

Representaciones tiempo-frecuencia

En el caso de las representaciones tiempo frecuencia, se utiliza el coeficiente de reflexión en función de la frecuencia, o la respuesta al impulso [16-17]. Este método únicamente permite obtener el periodo y la longitud total de la rejilla por lo cual se puede desarrollar de una forma no tan compleja [18].

Métodos de optimización

Dentro de los métodos de optimización encontramos el Algoritmo Genético; este algoritmo trata de simular el proceso natural de evolución para encontrar una solución óptima a un problema específico [19-20]. De forma general el método se basa en la creación de una población inicial de individuos, estos individuos son soluciones potenciales creados de forma aleatoria. Cada individuo está formado con los parámetros que componen la solución. Existe una etapa de combinación y otra de mutación, esto es para generar una nueva generación de individuos con características distintas a la inicial y una solución más apegada a lo buscado. El proceso se repite hasta encontrar la solución deseada, es decir, se tiene un error aceptable o se ha alcanzado el máximo número de generaciones.

Los GA se emplean para la solución de diversos problemas en ingeniería, uno de éstos es la síntesis de rejillas en fibra óptica. En este caso las soluciones potenciales son rejillas en fibra

óptica, y las variables de las soluciones potenciales son los parámetros propios de las rejillas en fibra óptica. Existen otros métodos de optimización como la Programación Evolutiva [21] donde en cada iteración se realiza una evolución de cada parámetro tomado en cuenta.

3.3 Conclusiones

Para una correcta síntesis es necesario hacer una elección adecuada del método de análisis a utilizar. Se investigó que uno de los métodos más usados, y efectivos, es la Teoría de Modos Acoplados auxiliada con la Matriz Fundamental; su importancia radica en que es posible utilizar estos métodos para rejillas en fibra ópticas uniformes y en rejillas en fibras ópticas no uniformes. Por otra parte se encontró que el formalismo de ondas de Bloch, ofrece resultados exactos para el caso de rejillas en fibras ópticas uniformes lo que descalifica un poco a este formalismo a pesar de que el tiempo de cómputo es menor.

Se observó que en el caso de los métodos de síntesis es importante considerar todas las variantes que existen; por su propia naturaleza, la utilización de un GA es una de las mejores opciones entro de estos métodos pues representa un proceso de evolución generacional, mediante cada iteración, que es capaz de obtener respuestas más apegadas a lo deseado en cada nuevo ciclo.

El estudio de los métodos de análisis y los métodos de síntesis, para rejillas en fibras ópticas, es la base para el desarrollo de nuevos dispositivos basados en esta tecnología.

3.4 Referencias

- [1] Hill K.O., Fujii Y., Johnson D.C., Kawasaki B.S., "Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication," *Appl. Phys. Lett.* 32, 647-649(1978).
- [2] Peral E., Capmany J., "Generalized Bloch wave analysis for fiber and waveguide Gratings," *J. Lightw. Technol.* 15(8), 1295-1302(1997).
- [3] Yariv A., "Coupled-mode theory for guided-wave optics," *IEEE J. Quantum. Electron.* 9(9), 919-933(1973).
- [4] Pierce J.R., "Coupling of Modes of Propagation," *J. Appl. Phys.* 25(2), 179-183(1954).
- [5] Kogelnik H., "Filter response of nonuniform almost-periodic structures," *Bell Syst. Tech. J.* 55(1), 109-126(1976).
- [6] Winick K.A., "Effective-index method and coupled-mode theory for almost periodic waveguide gratings: A comparison," *Appl. Opt.* 31(6), 757-764(1992).
- [7] R. Kashyap, *Fiber Bragg Gratings*, Academic Press, San Diego, 1999.

- [8] Chern G.W., Wang L.A., Lin C.Y., "Transfer-Matrix Approach Based on Modal Analysis for Modeling Corrugated Long-Period Fiber Gratings," *Appl. Opt.* 40(25), 4476-4486(2001).
- [9] H. Kogelnik, *Theory of Optical Waveguides, in Guided-Wave Optoelectronics*, Springer-Verlag, New York, 1990.
- [10] Kogelnik H., "Filter response of nonuniform almost-periodic structures," *Bell Sys. Tech. J.* 55, 109-126(1976).
- [11] Yamada M., Sakuda K., "Analysis of almost-periodic distributed feedback slab waveguides via a fundamental matrix approach," *Appl. Opt.* 26, 3474-3478(1987).
- [12] Winick K.A., Roman J.E., "Design of corrugated waveguide filters by Fourier-transform techniques," *IEEE J. Quantum. Electron.* 26(11), 1918-1929(1990).
- [13] Chern G.W., Wang L.A., "Design of binary long-period fiber grating filters by the inverse-scattering method with genetic algorithm optimization," *J. Opt. Soc. Am. A* 19(4), 772-780(2002).
- [14] Ouyang Y., Sheng Y., Bernier M., Paul-Hus G., "Iterative Layer-peeling algorithm for designing fiber Bragg gratings with fabrication constraints," *J. Lightw. Technol.* 23(11), 3924-3930(2005).
- [15] Skaar J., Wang L., Erdogan T., "On the synthesis of fiber Bragg gratings by layer peeling," *IEEE J. Quantum. Electron.* 37(2), 165-173(2001).
- [16] Muriel M.A., Azaña J., Carballar A., "Fiber grating synthesis by use of time-frequency representations," *Opt. Lett.* 23(19), 1526-1528(1998).
- [17] Frolik J.L., Yagle A.E., "An asymmetric discrete-time approach for the design and analysis of periodic waveguide Gratings," *J. Lightw. Technol.* 13(2), 175-185(1995).
- [18] Azaña J., Muriel M.A., Chen L.R., Smith P.W.E., "Fiber Bragg grating period reconstruction using time-frequency signal analysis and application to distributed sensing," *J. Lightw. Technol.* 19(5), 646-654(2001).
- [19] Z. Michalewicz, *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*, Springer-Verlag, 1992.
- [20] Skaar J., Risvik K.M., "A genetic algorithm for the inverse problem in synthesis of fiber Gratings," *J. Lightw. Technol.* 16(10), 1928-1932(1998).
- [21] Lee C.L., Lai Y., "Evolutionary programming synthesis of optimal long-period fiber grating filters for EDFA gain Flattening," *IEEE Photon. Technol. Lett.* 14(11), 1557-1559(2002).

4. Diseño Teórico de las Rejillas de Periodo Largo en Fibras Ópticas

Introducción

El diseño teórico de rejillas en fibras ópticas, ya sean Rejillas de Bragg o Rejillas de Periodo Largo, es de vital importancia en la ingeniería moderna. La importancia de estos diseños está fundamentada en que se trata de dispositivos de línea (dentro de la misma fibra óptica), estos dispositivos pueden ser colocados en sistemas de comunicaciones ópticas existentes hoy en día, y en la mayoría de los casos se trata de dispositivos pasivos.

En el caso particular del diseño de RPL, la importancia de su desarrollo va más allá de ser usados en redes ópticas modernas. Su plusvalía radica en el sentido económico; las técnicas de fabricación estudiadas en el capítulo 2, nos dan un panorama sobre los costos que implican la fabricación de una rejilla en fibra óptica. Partiendo de este punto, resulta obvia la comparación entre las tecnologías de fabricación de FBG y RPL donde la fabricación de las segundas resulta con un costo mucho menor.

Para el diseño teórico de las RPL resulta importante conocer los métodos de análisis y síntesis estudiados en el capítulo 3. Con base a este estudio es posible definir una metodología para tratar de obtener los mejores resultados teóricos, que posteriormente tendrán que ser evaluados de forma práctica.

Para los nuevos desarrollos tecnológicos y aplicaciones innovadoras, el primer paso es la realización de un diseño con base a las necesidades específicas del problema a resolver. Este diseño es la base de todos los desarrollos tecnológicos conocidos, ya que no se puede innovar en algún tema cuando no es necesario resolver algún problema.

4.1 Adaptación del Algoritmo Genético

Para este trabajo de tesis se utilizó una adaptación de un Algoritmo Genético (GA) [1] para la tarea de la síntesis de Rejillas de Periodo Largo en fibras ópticas. Esta adaptación, descrita en las siguientes secciones, proporciona los parámetros físicos principales de una RPL en fibra óptica: periodo de la rejilla, longitud de la rejilla, magnitud y la fase del coeficiente de acoplamiento. En el Anexo A se encuentra una explicación detallada de la programación del GA.

La adaptación descrita tiene la función de realizar la síntesis de Rejillas de Periodo Largo con la tarea especial de ecualizar la ganancia de Amplificador de Fibra Dopada con Erbio (EDFA). Esta aplicación fue elegida debido a que hoy en día existe una gran necesidad de transmitir información a gran escala, y el uso de amplificadores en los sistemas de comunicaciones ópticas es de vital importancia [2-4]. Debido a que el espectro de transmisión de estos amplificadores es asimétrico, es necesario considerar una sola RPL cuyo espectro de transmisión también es asimétrico (inverso de la curva de ganancia del amplificador); por lo anterior se debe de considerar una rejilla no uniforme, es decir que uno o varios de sus parámetros físicos deben variar longitudinalmente.

Para comenzar el algoritmo es necesario crear una población con un número N de individuos, también conocidos como soluciones potenciales del problema; cada individuo se compone de los parámetros que forman la solución. Como se trata de un algoritmo iterativo, se crea una nueva generación basada en las mejores soluciones (las que entregan una respuesta más cercana a la deseada). Mediante la combinación de los parámetros de dos o más individuos se crea un número de “hijos”; también pueden existir mutaciones (pequeños cambios en los parámetros de los individuos). Se pretende que los individuos de la nueva generación sean más cercanos a la solución deseada, este grado de aproximación es cuantificado con una función de error propuesta.

La creación de una nueva generación es realizada de forma iterativa y termina cuando la función de error tiene un valor tan pequeño que puede ser despreciable o se ha alcanzado el número máximo de generaciones propuesto. El algoritmo se compone de las siguientes etapas:

Respuesta deseada

Para iniciar el diseño es necesario definir una respuesta deseada, para tal propósito se toma como punto de referencia el espectro de ganancia del EDFA $g_m(\lambda)$, así como el valor de la ganancia deseado (donde se quiere tener la región plana) $g_d(\lambda)$. La respuesta espectral deseada de la rejilla a sintetizar, $t_d(\lambda)$, expresada en decibeles (dB), está dada por:

$$t_d \lambda = g_d \lambda - g_m \lambda \quad \text{Ec. 4.1}$$

Población inicial

Para continuar con el algoritmo es necesario tener una población inicial, en este caso las soluciones potenciales son rejillas de periodo largo no uniformes divididas en M secciones, cada sección con sus propios parámetros: periodo Λ_m , longitud de sección L_m , magnitud κ_m y fase ϕ_m del coeficiente de acoplamiento. En este punto es posible definir los parámetros que se mantendrán invariables y cuáles serán creados de forma aleatoria dentro de rangos

predefinidos (variables). Con lo anterior la población inicial queda conformada por N soluciones potenciales.

Error

Para evaluar el grado de aproximación de cada una de las soluciones potenciales es necesario tener una función de error, o función objetivo. En esta adaptación se utilizó como base el error cuadrático medio entre el espectro deseado, $t_d(\lambda)$, y el espectro obtenido de cada solución, $t_o(\lambda)$, para conocer el grado de similitud:

$$E = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K [t_d(\lambda) - t_o(\lambda)]^2 \quad \text{Ec. 4.2}$$

donde K es el número de puntos, o valores de longitud de onda discretos, considerados en el espectro de la rejilla.

Selección y recombinación

En esta etapa, con base a las mejores soluciones, se eligen dos “padres”: uno denotado por P_a (elegido de forma aleatoria dentro de un porcentaje p_{ra} de las mejores soluciones), y otro llamado P_b (tomado en orden ascendente de un porcentaje p_{rb} de las mejores soluciones). Los “padres” seleccionados son modificados, con una cierta probabilidad p_r , de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} P_\alpha &= 0.75P_a + 0.25P_b \\ P_\beta &= 0.25P_a + 0.75P_b \end{aligned} \quad \text{Ec. 4.3}$$

Las dos operaciones se llevan a cabo únicamente en los parámetros de interés. El primer “hijo” es creado como $H_1 = P_\alpha$ y el segundo es creado como $H_2 = P_\beta$. Este proceso se repite hasta completar el número total de hijos por pareja (previamente definido). Las etapas de selección y recombinación se llevan a cabo de forma cíclica hasta completar el número total de soluciones de tamaño N .

Mutación

La mutación es una etapa del GA donde, partiendo de una probabilidad de mutación p_c , un determinado porcentaje de la población sufrirá un cambio en los parámetros, independientemente del valor de su función de error. De forma general se puede representar la etapa de mutación como modificaciones de la siguiente forma:

$$X'_{i,m} = X_{i,m} + \Delta X_1 - \Delta X_2 \quad \text{Ec. 4.4}$$

donde $X'_{i,m}$ es el nuevo parámetro de la sección m , de la solución i ; ΔX_1 y ΔX_2 son valores aleatorios del parámetro a modificar. Estos valores se encuentran dentro de un rango que va decreciendo cuando el error de la mejor solución de la generación actual es mayor que el error de la mejor solución de la generación anterior.

Al terminar este proceso se verifican las condiciones de error o número máximo de generaciones para decidir si se ha encontrado la solución buscada o se continúa con la siguiente generación.

4.2 Resultados de diseño

Para el diseño teórico de las RPL con la tarea particular de equalizar la ganancia de dos EDFA, con distinto comportamiento, se utilizó el GA descrito en la sección anterior. A grandes rasgos se tienen tres casos de estudio: en los primeros dos se realizaron variaciones en la magnitud y fase del coeficiente de acoplamiento, mientras que en el tercero únicamente se varió el periodo en cada una de las secciones.

En un primer caso se realizó la síntesis de una rejilla de periodo largo para la equalización del espectro de ganancia del EDFA mostrado en la Fig. 4.1, línea punteada. Con base en el GA se fijó un espectro de ganancia deseado con ganancia constante de 16 dB.

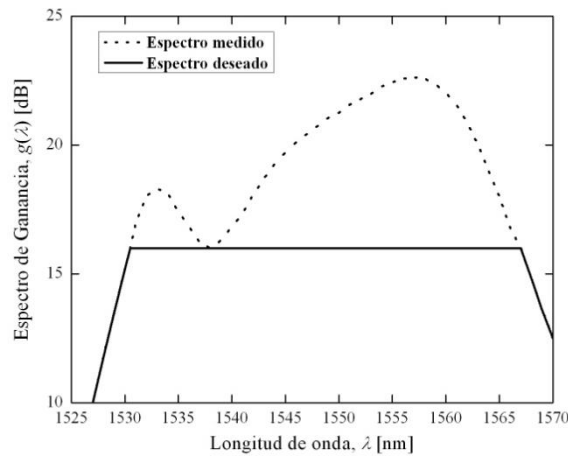


Figura 4.1. Ganancia de un EDFA comercial; espectro medido (línea punteada) y espectro deseado (línea continua) [5].

El espectro de transmisión de la rejilla se limitó de $\lambda_{min} = 1525.0$ nm a $\lambda_{max} = 1570.0$ nm. En la Fig. 4.2 se muestra el espectro de transmisión deseado de la RPL, se observa la existencia de un punto con mínima transmisión (máxima ganancia en el espectro medido); este punto es conocido como longitud de onda de resonancia, $\lambda_r = 1557.0$ nm. Suponiendo que los índices de refracción efectivos del modo del núcleo y del modo de la cubierta son $n_{co} = 1.446$ y $n_{cl} = 1.443$, respectivamente, con base a la Ec. 2.3 el periodo de la rejilla tiene un valor de $\Lambda = 469.204$ μm .

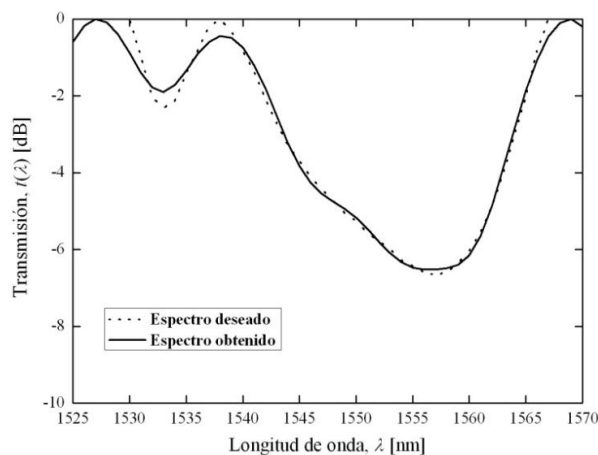


Figura 4.2. Transmisión de la RPL; espectro deseado (línea punteada) y espectro obtenido (línea continua).

La longitud total de la rejilla se estableció en $L = 7.0$ cm con un total de $M = 25$ secciones del mismo tamaño. El coeficiente de acoplamiento se limitó en un rango de $\kappa_{min} = -2.5 \text{ cm}^{-1}$ a $\kappa_{max} = 2.5 \text{ cm}^{-1}$. En el caso de la fase su valor se limitó en un rango de $\phi_{min} = -\pi/2$ rad a $\phi_{max} = \pi/2$ rad, para no tener ambigüedades en la fase de las secciones (un cambio de signo en el coeficiente de acoplamiento implica un cambio de fase de π rad). Los resultados óptimos del diseño teórico se obtuvieron con los valores de los parámetros del Algoritmo Genético mostrados en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Parámetros óptimos del GA.

Parámetro	Valor
Número total de generaciones	600
Número total de soluciones, N	500
Probabilidad de mutación, p_c	1.00
Porcentaje de las mejores soluciones para P_a, p_{ra}	4.2 %
Porcentaje de las mejores soluciones para P_b, p_{rb}	20 %
Probabilidad de modificación de los padres, p_r	0.86
Número de hijos por pareja	5

En la Fig. 4.3 se muestra el resultado final de la ecualización. Es visible que el espectro de ganancia ecualizado tiene una oscilación al inicio de la banda deseada; en la región que va de 1540.0 nm a 1565.0 nm existe una zona más plana con variaciones entre -0.16 dB y 0.27 dB. Tomando en cuenta una banda mayor, de 1531.0 nm a 1570.0 nm, la variación de ganancia obtenida en el espectro ecualizado del amplificador se encuentra entre -0.46 dB y

0.42 dB. Es importante mencionar que el error casi no disminuyó después de la generación número 300.

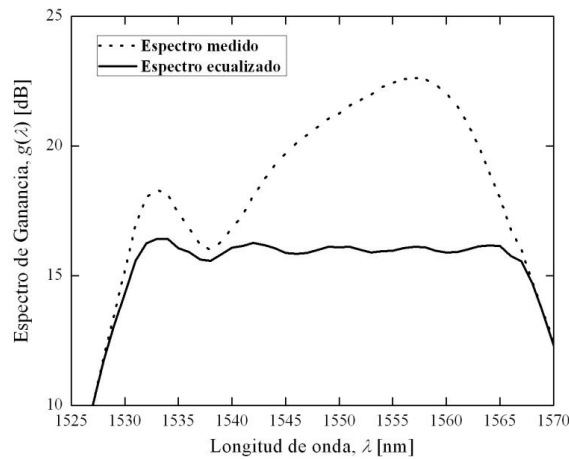


Figura 4.3. Espectro de ganancia del EDFA; sin equalizar (línea punteada) y equalizado (línea continua).

En la Fig. 4.4 se muestran los perfiles del coeficiente de acoplamiento (línea continua) y de la fase (línea punteada) de la rejilla sintetizada. Para el coeficiente de acoplamiento se tienen valores pequeños, entre -1.71 cm^{-1} y 1.50 cm^{-1} , comparados con lo presentado en [6]. Para el caso de la fase las variaciones se encuentran entre -0.72 rad y 0.98 rad .

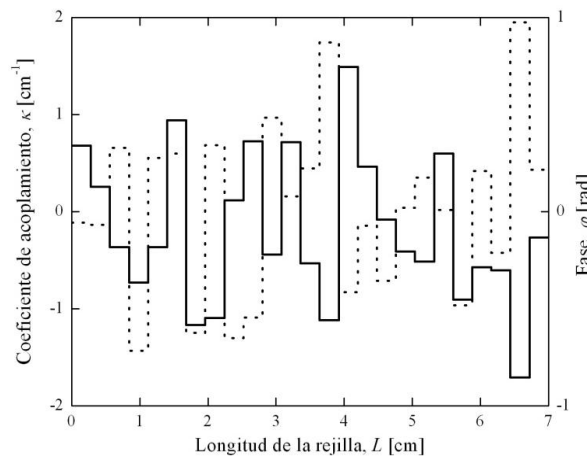


Figura 4.4. Perfil del coeficiente de acoplamiento (línea continua) y de la fase (línea punteada).

En el segundo caso se consideró un EDFA cuyo espectro de ganancia se muestra en la Fig. 4.5, [6]. El espectro de ganancia deseado se definió desde $\lambda_{min} = 1520.0 \text{ nm}$ hasta $\lambda_{max} = 1580.0 \text{ nm}$, con una ganancia constante de 30 dB. En la Fig. 4.6 se muestra el espectro de transmisión deseado de la rejilla; se observa que la longitud de onda de resonancia se encuentra en $\lambda_r = 1556.0 \text{ nm}$. En este caso los valores del índice de refracción efectivo del modo del núcleo y del modo de la cubierta se supusieron de $n_{co} = 1.456$ y $n_{cl} = 1.446$,

respectivamente. Así que el periodo de la rejilla, obtenido mediante la Ec. 2.3, es de $\Lambda = 155.6 \mu\text{m}$.

En este caso la longitud total de la rejilla se propuso de $L = 5.0 \text{ cm}$, dividida en $M = 25$ secciones del mismo tamaño. El coeficiente de acoplamiento se limitó de $\kappa_{\min} = -2.5 \text{ cm}^{-1}$ a $\kappa_{\max} = 2.5 \text{ cm}^{-1}$. En el caso de la fase también se propuso en un rango de $\phi_{\min} = -\pi/2 \text{ rad}$ a $\phi_{\max} = \pi/2 \text{ rad}$.

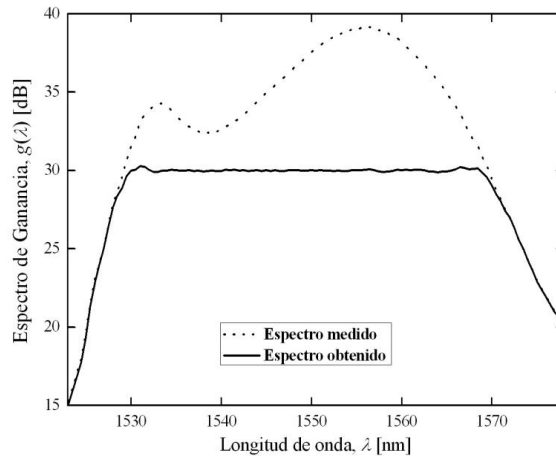


Figura 4.5. Espectro de ganancia del EDFA; sin ecualizar (línea punteada), y después de la ecualización (línea continua) [6].

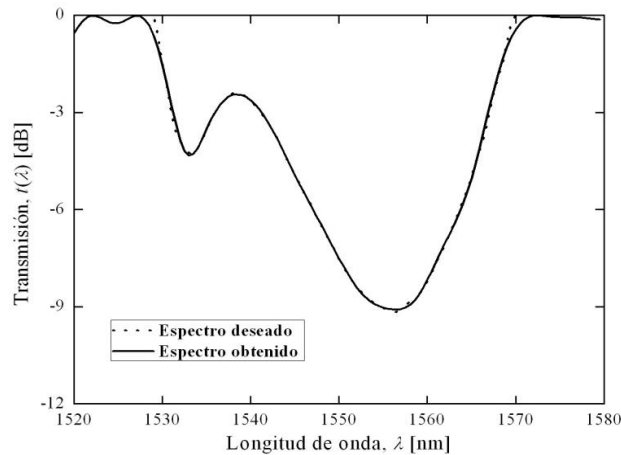


Figura 4.6. Transmisión de la RPL; espectro deseado (línea punteada) y espectro obtenido (línea continua).

En la Fig. 4.5 se ilustra el espectro de ganancia ecualizado del amplificador; como se observa, se tiene una ecualización más eficiente que en el primer caso, ya que las variaciones en la banda deseada son menores en casi todo el ancho de banda de trabajo del amplificador. Las fluctuaciones se encuentran entre -0.30 dB y 0.50 dB . Tomando una banda espectral de 30 nm , desde $\lambda_1 = 1535.0 \text{ nm}$ hasta $\lambda_2 = 1565.0 \text{ nm}$, se presentan oscilaciones mínimas de entre -0.08 dB y 0.12 dB . En este caso se modificaron algunos de los parámetros del algoritmo genético para lograr una síntesis óptima de la rejilla, los

valores de estos parámetros se presentan en la Tabla 4.2. Cerca de la generación 600 el error dejó de decrecer.

Tabla 4.2. Parámetros óptimos del GA.

Parámetro	Valor
Número total de generaciones	1000
Número total de soluciones, N	600
Probabilidad de mutación, p_c	0.90
Porcentaje de las mejores soluciones para P_a, p_{ra}	4.2 %
Porcentaje de las mejores soluciones para P_b, p_{rb}	20 %
Probabilidad de modificación de los padres, p_r	0.86
Número de hijos por pareja	5

En la Fig. 4.7 se muestra el perfil del coeficiente de acoplamiento (línea continua), el cual varía entre -1.29 cm^{-1} y 2.15 cm^{-1} , y el perfil de la fase (línea punteada), el cual está entre -0.77 rad y 0.97 rad . Estos rangos se encuentran dentro de un margen razonable, lo que nos indica que la fabricación de la rejilla es factible.

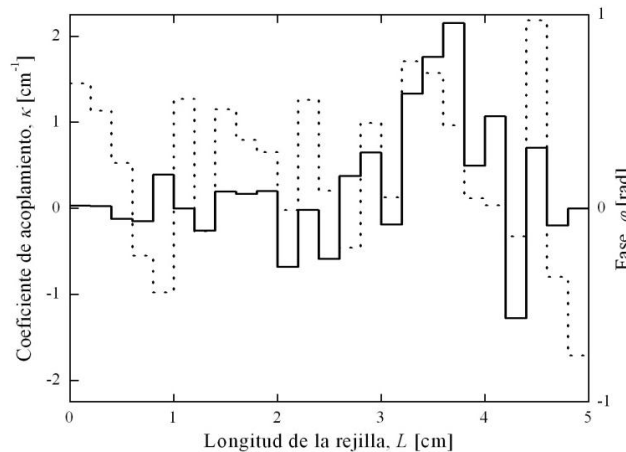


Figura 4.7. Perfil del coeficiente de acoplamiento (línea continua) y de la fase (línea punteada).

Para el tercer caso se consideró el mismo EDFA del caso dos, Fig. 4.5 (línea punteada). Debido a que únicamente se realizaron variaciones del periodo en cada sección de la rejilla, y se mantuvieron fijos los valores del coeficiente de acoplamiento y de la fase. Los rangos de medición se definieron igual que en el caso 2. El rango del periodo se fijó de $\Lambda_{\min} = 150.6 \mu\text{m}$ a $\Lambda_{\max} = 160.6 \mu\text{m}$. El valor del coeficiente de acoplamiento se mantuvo con su valor

nominal, 1.8 cm^{-1} , mientras que la fase tuvo un valor de 0 rad . La longitud se propuso de $L = 5.0 \text{ cm}$, dividida en $M = 25$ secciones del mismo tamaño.

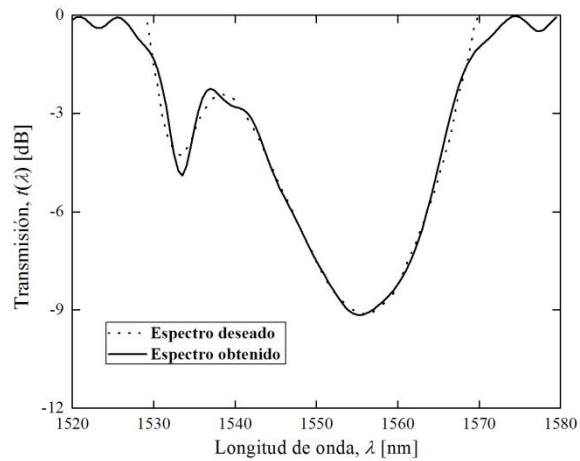


Figura 4.8. Transmisión de la RPL; espectro deseado (línea punteada) y espectro obtenido (línea continua).

En la Fig. 4.8 se muestra el espectro de transmisión deseado de la rejilla (línea punteada), así como el espectro de transmisión obtenido teóricamente mediante el GA (línea continua). Claramente se observa que existen oscilaciones mayores, en comparación con el segundo caso. En la banda deseada se tiene fluctuaciones de entre -0.90 dB y 1.00 dB . Considerando una banda espectral de 30 nm , desde $\lambda_1 = 1535.0 \text{ nm}$ hasta $\lambda_2 = 1565.0 \text{ nm}$, las variaciones oscilan entre -0.50 dB y 0.26 dB . Para este caso, en particular, los parámetros del GA se mantuvieron constantes (respecto al segundo caso, Tabla 4.2) para realizar una comparación entre ambos casos y conocer la influencia de los parámetros de la rejilla. Como es de esperarse el error obtenido fue más elevado que en el primer caso, alrededor de 7 veces.

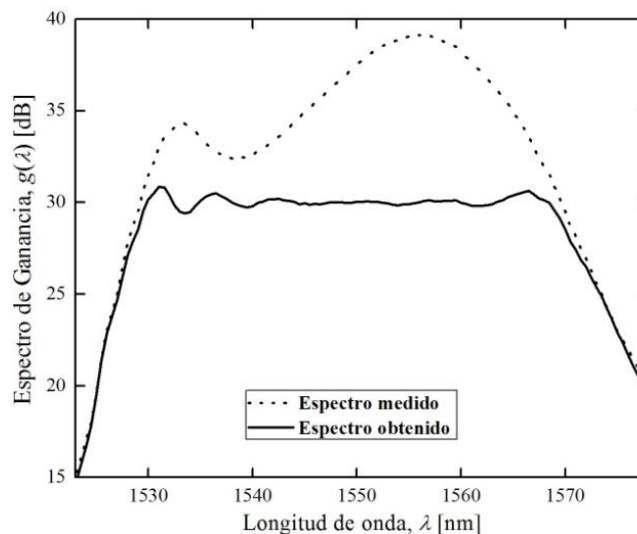


Figura 4.9. Espectro de ganancia del EDFA; sin equalizar (línea punteada), y después de la equalización (línea continua).

En la Fig. 4.9 es posible observar zonas de mayor variación que en el segundo caso: 1. Alrededor de 1530.0 nm con una diferencia cercana a 1 dB; 2. Se presenta un pico no deseado cerca de 1533.0 nm; 3. Existe una ligera variación en la curva de entre 1535.0 nm y 1540.0 nm; 4. Cerca de los 1570.0 nm existe una diferencia considerable similar a la presentada en la primer zona. De forma general, el espectro es similar al obtenido con la síntesis basada en la variación del coeficiente de acoplamiento y la fase debido a que las pérdidas no aumentan tanto.

En la Fig. 4.10 se muestra el perfil del periodo; las variaciones del periodo se encuentran en un rango de entre 153.7 μm y 157.6 μm . La resolución mínima que se necesita para la fabricación es de 0.1 μm ; esta resolución se encuentra en un margen razonable debido a que existen unidades de desplazamiento con estas resoluciones, esto nos indica que la fabricación de la rejilla es tecnológicamente factible.

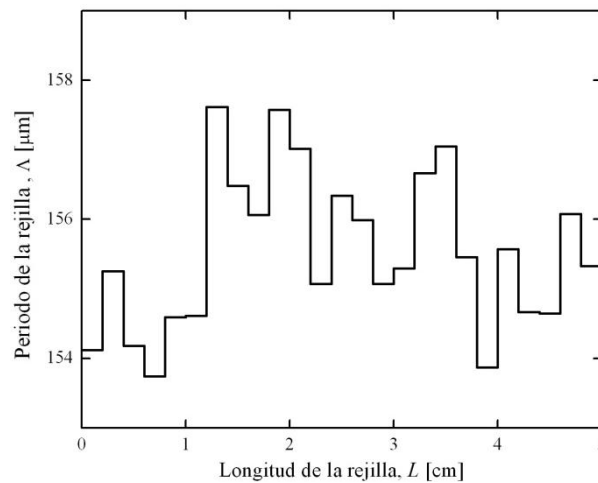


Figura 4.10. Perfil del periodo de la rejilla sintetizada.

4.3 Pruebas de herramientas teóricas

Para tener un parámetro de referencia es necesario comparar los resultados obtenidos, espectros y rangos de variación, con base a otros autores y trabajos publicados. En el primer caso de estudio los resultados son comparables con los presentados en [5]. En tal trabajo los autores obtuvieron variaciones mayores a las obtenidas bajo el GA presentado; en comparación con lo realizado en este trabajo, ellos obtienen el espectro de la rejilla con base a variaciones de periodo únicamente.

Tanto para el primer como en el segundo caso de estudio la mejor solución se obtuvo con rangos tecnológicamente alcanzables con la tecnología actual; tales rangos del coeficiente de acoplamiento (entre -1.8 cm^{-1} y 2.2 cm^{-1}) comparados con lo presentado en [6] son menores, lo que demuestra la ventaja de la utilización de este algoritmo.

En el tercer caso de estudio, realizando únicamente cambios en el periodo, las variaciones totales presentadas en [5] son de 45 μm . Con la adaptación del GA presentado, las variaciones del periodo son en un rango total de 5 μm ; pareciera que debido a la resolución puede ser mejor lo presentado en [5] pero actualmente la resolución obtenida en este trabajo (0.1 μm) es de fácil alcance tecnológico. Debido a que el periodo es menor, en la longitud de cada sección se tiene un número mayor de periodos lo que da como resultado un comportamiento mejor y más apegado a lo esperado.

4.4 Conclusiones

Se demostró que mediante la adaptación del GA utilizada, es posible sintetizar RPL para la tarea de ecualizar la ganancia de un EDFA capaces de obtener bandas de operación de hasta 40 nm con variaciones en las curvas de ganancia de ± 1.0 dB.

Se comprobó que con este método de síntesis es necesaria la utilización de una sola RPL para realizar la ecualización de un EDFA; a diferencia de trabajos previos, donde es necesario el uso de dos o más rejillas, significa una ventaja considerable en lo económico.

Se demostró que los rangos de variación del coeficiente de acoplamiento (entre -1.8 cm^{-1} y 2.2 cm^{-1}) y fase (entre 1.0 rad y -0.8 rad) para los dos primeros casos, así como del periodo (entre 153.7 μm y 157.6 μm) para el tercer caso, son valores que se encuentran dentro de los límites tecnológicamente alcanzables hoy en día, lo que hace factible la fabricación de las RPL para ser implementadas en los sistemas comerciales actuales.

Se verificó la importancia de los parámetros variables en una rejilla en fibra óptica. Se comparó el comportamiento una RPL con variaciones en el periodo, contra una RPL con variaciones del coeficiente de acoplamiento y la fase. Con base a los resultados obtenidos es posible afirmar que las variaciones en el coeficiente de acoplamiento y fase generan cambios más finos que hacen posible una mayor similitud entre la curva deseada y la curva obtenida.

Es importante mencionar que el uso de los GA puede ser extrapolado a muchas otras disciplinas (tales como la economía, la ecología, la genética de población, el diseño de antenas, etc.) en las que se requieran de métodos de optimización para la solución de problemas específicos.

Algunos de los resultados obtenidos bajo el desarrollo del presente trabajo de tesis, y en particular los presentados en este capítulo, han sido presentados en forma de una ponencia en la V Semana Nacional de Ingeniería Electrónica; además, fueron publicados en forma de un capítulo en el libro Avances en Ingeniería Electrónica 2010. Tal trabajo fue realizado con

la ayuda del Dr. Ignacio Flores con el cual se colaboró para la realización del modelado de las RPL.

4.5 Referencias

- [1] I. Flores Llamas. *Síntesis de las rejillas de período largo en fibras ópticas por medio de un algoritmo genético*. Tesis de Doctorado. UNAM, 2007.
- [2] Bergano N.S., "Wavelength division multiplexing in long-haul transmission systems," Tech. Dig. Optical Amplifiers and Their Applications, 5, 298-301(1996).
- [3] Ni N., Chana C.C., Tanb K.M., Tjinb S.C., Dong X.Y., "Broad-band EDFA gain flattening by using an embedded long-period fiber grating filter," Opt. Commun., 271(2), 377-381(2007).
- [4] Thyagarajan K., Kaur J., "A novel design of an intrinsically gain flattened erbium doped Fiber," Opt. Commun. 183(5-6), 407-413(2000).
- [5] Bae J., Chun J., Lee S.B., "Synthesis of long-period fiber gratings with the inverted erbium gain spectrum using the multiport lattice filter model," J. Lightw. Technol. 22(8), 1976-1986(2004).
- [6] Lee C.L., Lai Y., "Long-Period Fiber Grating Filter Synthesis Using Evolutionary Programming," Fiber Integr. Opt. 23(4), 249-261(2004).

5. Fabricación y Caracterización Experimental de las Rejillas de Periodo Largo en Fibras Ópticas

Introducción

La fabricación y caracterización de los dispositivos diseñados de forma teórica es el siguiente paso, tecnológicamente hablando, para conocer el éxito del diseño. En términos de fabricación es importante, como se vio en el capítulo 2, elegir la tecnología ideal para poder reducir costos, tener mejores dispositivos, tener variantes y manejabilidad de los instrumentos involucrados.

En este caso, el diseño experimental está basado en la fabricación de las RPL mediante un efecto inducido por un haz láser de alta potencia (Dióxido de Carbono, CO₂). Esta tecnología de fabricación, se fundamenta en la grabación punto por punto donde la fibra es expuesta al haz de un láser de alta potencia de alrededor de 10.6 μm de longitud de onda [1].

Al inducir pulsos con una potencia elevada (del orden de watts) en periodos de tiempo cortos (del orden de milisegundos), se genera un cambio permanente en el índice de refracción del núcleo [2-3]. Tal modificación es generada por tensiones residuales y deformaciones de la fibra [4]. Esta tecnología se limita al tamaño de la mancha del haz láser utilizado, a los componentes ópticos usados para generar el enfoque y a los componentes mecánicos capaces de generar movimientos micrométricos o nanométricos, según sea el caso.

La ventaja principal de esta tecnología es el costo, ya que los láseres con longitudes de onda más bajas (región UV) tienen un costo más elevado y su implementación es compleja en términos del equipo necesario.

5.1 Descripción de la instalación experimental

Se montó una instalación experimental compuesta por dos partes: la primera para la fabricación de las Rejillas de Periodo Largo, y la segunda para su caracterización. El diseño esquemático de la instalación se muestra en la Fig. 5.1, cuenta con un subsistema óptico y un subsistema mecánico. Se realizó un diseño en conjunto para facilitar la técnica de fabricación y caracterización *in situ*, así como para evitar posibles errores de medición.

El subsistema óptico está compuesto por un láser de alta potencia de Dióxido de Carbono (1) que emite pulsos controlados mediante un programa de computadora especializado (no mostrado en la figura). Los pulsos son reflejados por un espejo (2) y dirigidos a la fibra óptica (7) tensada mediante una masa (4). Para realizar la caracterización de la rejilla fabricada se tiene una fuente de luz (3) que emite, en diferentes longitudes de onda, a través de la fibra óptica (7). La señal óptica viaja por toda la fibra óptica, pasando por la RPL fabricada y es posible observar la respuesta espectral mediante un analizador de espectros óptico (6).

El subsistema mecánico, únicamente está formado por la unidad desplazadora (5) controlada por una computadora (no mostrada en la figura) mediante un programa especializado sincronizado con la emisión de pulsos del haz láser.

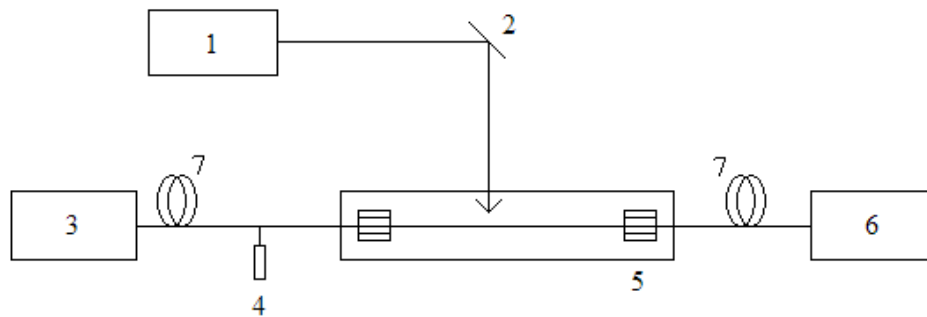


Figura 5.1. Instalación para la fabricación de RPL; (1) láser de CO₂; (2) espejo; (3) fuente de luz; (4) masa para generar tensión; (5) unidad desplazadora; (6) analizador de espectros óptico; (7) fibra óptica.

5.1.1 Elementos del subsistema óptico

Láser de alta potencia:

Se utiliza un láser de Dióxido de Carbono (CO₂) de la marca SYNRAD, modelo J48-2W. Es un láser de gas de categoría 4. La potencia y el tiempo de exposición de los pulsos son controlados con una unidad adicional (UC-2000) específica para este láser.

Tabla 5.1. Especificaciones del laser de CO₂.

Potencia máxima de salida	25 watts
Ciclo de trabajo	De 0 a 100 %
Longitud de onda típica	10.57 - 10.63 μm
Diámetro del haz	3.5 mm
Elipticidad	< 1.2
Polarización	Lineal (Vertical)

Fuente de luz:

Para la caracterización fue necesario utilizar una fuente de banda ancha. Se utilizó una fuente marca Agilent, modelo 83437A. Es una fuente de luz incoherente para fibra monomodo con 4 longitudes de onda de salida.

Tabla 5.2. Especificaciones de la fuente de luz utilizada.

Potencia de salida	De 20 a 50 μ W
Tipo de fibra	Monomodo, 9/125 μ m
Longitudes de onda	1200 \pm 30 nm
	1310 \pm 20 nm
	1430 \pm 30 nm
	1550 \pm 20 nm
	1650 \pm 30 nm
Modulación	Digital, entrada compatible con TTL

Analizador de espectros óptico:

Para conocer la respuesta espectral de las RPL fabricadas se utilizó un analizador de espectros óptico de la marca ANDO, modelo AQ6317 es cual es de alta resolución y tiene su principal utilidad en sistemas DWDM.

Tabla 5.3. Especificaciones del analizador de espectros óptico.

Tipo de fibra admisible	50/125 μ m
Rango de medición de potencia	-90 a +20 dBm (1200 a 1650 nm)
	-80 a +20 dBm (600 a 1200 nm)
	-60 a +20 dBm (600 a 1750 nm)
Rango de longitudes de onda	De 600 a 1750 nm
Resolución	0.015 nm

Fibra óptica:

Para la fabricación de las RPL se utilizó fibra monomodo de la marca Corning, modelo SMF-28-J9. Se eligió esta fibra ya que es la más común en telecomunicaciones, y por la manejabilidad que presenta en términos de la fabricación de las rejillas. La longitud promedio de cada fibra fue de 1.5 metros.

Tabla 5.4. Especificaciones de la fibra óptica utilizada.

Longitud de onda de trabajo	1260 - 1600 nm
Diámetro del campo modal	9.2 ± 0.4 μm @ 1310 nm 10.4 ± 0.5 μm @ 1550 nm
Cubierta (Cladding)	125 ± 1.0 μm
Revestimiento (Coating)	900 μm
Longitud de onda de corte	<1260 nm
Atenuación máxima	0.33-0.35 dB/km @ 1310 nm 0.19-0.20 dB/km @ 1550 nm
Apertura numérica (NA)	0.14

5.1.2 Elementos del subsistema mecánico

Unidad desplazadora:

La parte mecánica consistió en una unidad desplazadora de la marca Physik Instrumente, modelo 405, serie M-400. Es una unidad de alta precisión para movimientos de traslación en un eje. Para mover la unidad, en un sentido u otro, se utilizó un controlador de la propia empresa. El control de los desplazamientos es operado mediante un programa diseñado para este fin, se auxilia del propio software del controlador.

Adicionalmente se utilizó una base para sostener la fibra óptica; esta base se implementó con la finalidad de tener un mejor manejo de la fibra óptica, así como para evitar reflexiones y daños a la unidad desplazadora con el haz láser. En la Fig. 5.2 se muestra una fotografía de la instalación experimental para la fabricación de las rejillas de periodo largo.



Figura 5.2. Instalación para la fabricación de RPL (fotografía).

5.2 Metodología del experimento

La metodología seguida en la fabricación de las pruebas consiste en el diseño teórico, mediante la síntesis, de las RPL. Al obtener los valores teóricos se utilizarán en el programa desarrollado para la fabricación automática de la RPL. Al introducir los valores óptimos obtenidos, se procede a la fabricación y caracterización de las RPL *in situ*.

Para conocer la calidad de los dispositivos fabricados es necesario realizar una comparación entre la respuesta espectral deseada y la respuesta espectral obtenida; de esta forma se pueden conocer las variaciones y/o similitudes entre ambos espectros con lo cual es posible determinar la calidad del dispositivo.

5.3 Fabricación de Rejillas de Periodo Largo

Con base en la instalación mostrada en la Fig. 5.2, se fabricaron diversas muestras de RPL en fibras ópticas de sílice. Para tal efecto se tuvo una preparación y tratamiento previo de la fibra:

- a. **Corte de la fibra:** para la fabricación de las rejillas es necesario tener fibras ópticas de al menos 1.5 m de longitud. Debido a que la fibra, por lo general, es suministrada a granel y no cuenta con conectores es necesario realizar un corte con un equipo especial. Para tal efecto se utilizó una cortadora de alta precisión marca Fujikura, modelo CT-32.
- b. **Pelado de la fibra:** debido a que la fabricación de las RPL se presenta como una variación del índice de refracción del núcleo y/o de la cubierta es necesario exponer tal zona al haz láser, alrededor de 30 y 40 cm sin revestimiento. Para tal propósito se utilizó un equipo especial de la marca Fujikura, modelo HJS-02, capaz de eliminar el revestimiento de varias fibras ópticas al mismo tiempo. Un método alternativo fue la utilización de pinzas especiales y calibradas para tal fin.
- c. **Conectores utilizados:** para conectar la fibra, tanto al analizador de espectros como a la fuente de luz, es necesario hacer conexiones temporales mediante el uso de conectores especiales. Debido a que ambos dispositivos cuentan con salidas FC/PC (Ferrule Connector/Physical Contact), es necesario colocar este tipo de conectores en ambos extremos de la fibra óptica.

Después de tener la fibra óptica preparada se monta en una base especial: Como se observa en la Fig. 5.3, la fibra óptica se encuentra tensada en un extremo por una masa determinada, en el otro lado se tiene un apoyo para la fibra con un adaptador especial, en

la parte final de la fibra óptica se tiene una conexión con una extensión al analizador de espectros óptico.

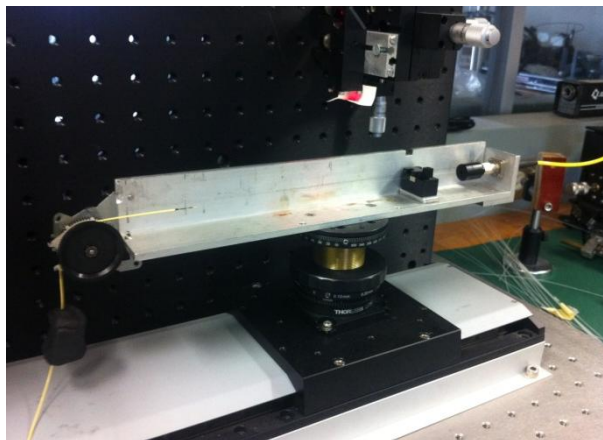


Figura 5.3. Montura especial de la fibra óptica para el proceso de fabricación (fotografía).

El proceso de fabricación se puede resumir en los siguientes pasos:

- a. Obtención de los valores mediante la síntesis de la RPL.
- b. Con los valores obtenidos, modificación del programa implementado para controlar el láser de forma automática.
- c. Desplazamiento de la unidad especializada de movimiento a la posición original.
- d. Ejecución del programa desarrollado para comenzar la emisión de los pulsos (con características especiales) del láser. A la emisión de un pulso se genera un movimiento de la unidad desplazadora con el valor provisto en el programa.
- e. A cada emisión de un pulso corresponde un barrido en una determinada banda espectral para ver el espectro de la RPL en tiempo real.
- f. El proceso concluye con el número de periodos propuestos en el programa, y con ello concluye la fabricación de la rejilla.

5.4 Caracterización de las rejillas fabricadas

La caracterización espectral de las rejillas fabricadas es realizada *in situ*, esto con la finalidad de ir monitoreando el comportamiento según van aumentando los periodos de la rejilla. Para la caracterización, únicamente se conectó un extremo de la fibra óptica a una fuente de luz (descrita en 5.1) y el otro extremo al analizador de espectros óptico.

Como se cuenta con los equipos especiales para la tarea de la caracterización, es relativamente sencillo conocer la respuesta espectral de manera inmediata o de forma cíclica, según las necesidades. Posterior a la verificación visual de la respuesta espectral, se retira la fibra (con la rejilla inscrita) para realizar una inspección visual de la misma.

Para inspeccionar de forma visual el efecto generado en la rejilla se utilizó una empalmadora marca FUJIKURA, modelo FSM-45PM-LDF. La razón de utilizar este equipo fue los contrastes que ofrece en los índices de refracción del núcleo y la cubierta, así mismo la opción de ser utilizado como un microscopio.

5.5 Análisis y caracterización de Rejillas de Bragg

Para conocer y tener un parámetro de comparación entre las diferentes rejillas en fibras ópticas se realizó un análisis y caracterización de FBG. Para este propósito se adquirieron diversas rejillas de Bragg (Fig. 5.4), ya que el laboratorio no se cuenta con la tecnología de fabricación. Estas rejillas cuentan con características específicas como la longitud de onda de resonancia, ancho de banda a -3 dB, relación de supresión del lóbulo lateral, y reflectividad.

Tabla 5.5. Características de las FBG comerciales utilizadas en el experimento.

Rejilla número	Longitud de onda de resonancia, λ (nm)	Ancho de banda a -3 dB (nm)	Relación de supresión del lóbulo lateral (dB)	Reflectividad (%)
1	1550.010	0.175	19.12	93.11
2	1550.035	0.194	20.44	96.13
3	1550.158	0.191	19.71	95.85



Figura 5.4. Rejilla de Bragg (fotografía).

Para la caracterización se utilizaron los siguientes elementos ópticos:

- a. **Circulador óptico:** se trata de un componente óptico usado para separar señales ópticas en direcciones contrarias en una misma fibra óptica. Se compone de tres puertos, Fig. 5.5; el puerto 1 emite al puerto número 2, si existe reflexión en el puerto 2 se emite al puerto 3. Existe un aislamiento del puerto 2 al 1 y del puerto 3 al 2.
- b. **Analizador de Rejillas de Bragg:** hace el mismo trabajo que un analizador de espectros óptico, con la particularidad de ser multicanal. Se utilizó un analizador marca Ibsen, modelo I-MON 512E-USB, Fig. 5.6. La precisión de este equipo es de 5 pm, con rango de trabajo de 1510.0 a 1595.0 nm.

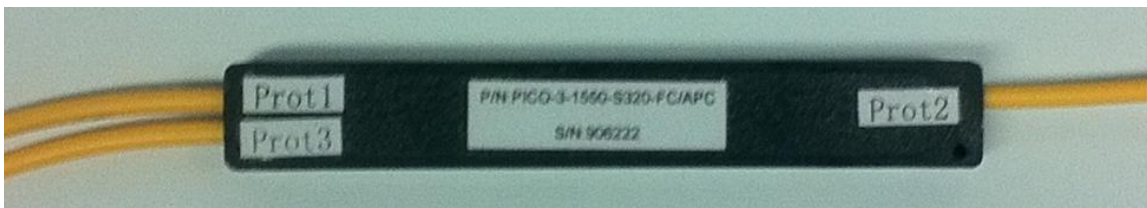


Figura 5.5. Circulador óptico (fotografía).



Figura 5.6. Analizador de Rejillas de Bragg (fotografía).

Un diagrama de la instalación para la caracterización se muestra en la Fig. 5.7. Se utilizó la misma fuente utilizada en el proceso de fabricación de las RPL. La luz de la fuente es emitida a través del puerto 1 del circulador óptico, esta es emitida al puerto dos donde sale hacia la FBG; al existir una longitud de resonancia en la FBG, se refleja volviendo por el puerto 2 para ser emitida por el puerto 3. La luz reflejada llega al analizador de rejillas de Bragg para ser procesada y enviada a la computadora, de esta forma es posible ver el comportamiento en tiempo real de la muestra.

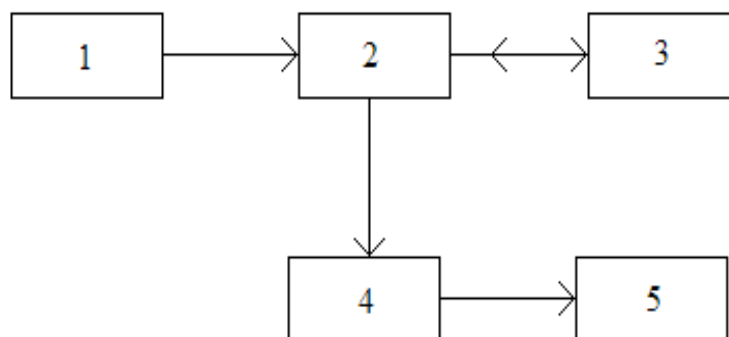


Figura 5.7. Esquema para la caracterización de FBG; (1) fuente de luz; (2) circulador óptico; (3) rejilla de Bragg; (4) analizador de rejillas de Bragg; (5) computadora.

5.6 Resultados

En lo que respecta a la fabricación de RPL, basada en la tecnología de punto por punto mediante el uso de un haz láser de alta potencia de CO₂, así como la caracterización de los elementos fabricados, se obtuvieron nuevos conocimientos prácticos que nos permiten tener un mayor panorama sobre los parámetros que intervienen en el proceso de grabación, desde el manejo previo de la fibra hasta los niveles de potencia usados, pasando por el tiempo de exposición.

De forma concreta se logró la modificación interna, causada por el efecto térmico de un haz láser, en fibra óptica monomodo estándar para telecomunicaciones (SMF-28). En la Fig. 5.8 es posible observar una sección de fibra óptica de sílice sin modificación alguna, se puede observar la fibra óptica en dos vistas (una en el eje X y otra en el eje Y).

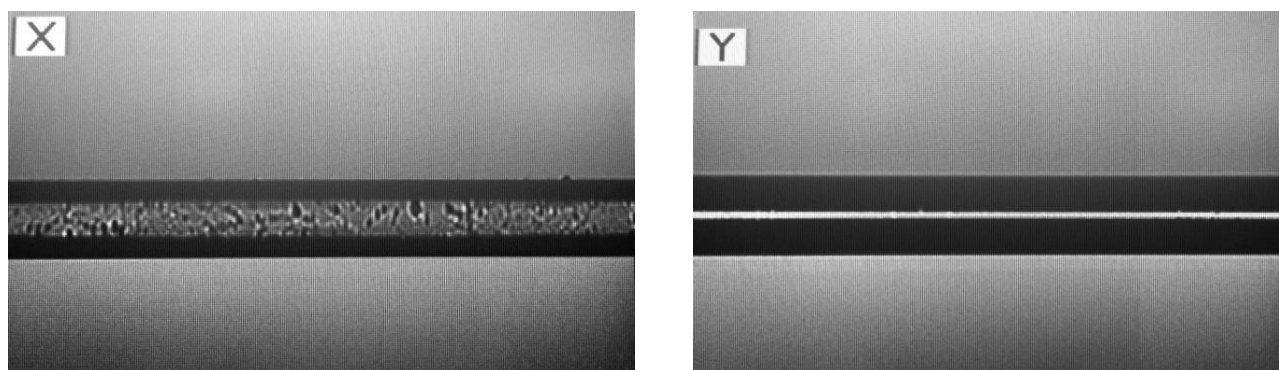


Figura 5.8. Fibra óptica sin modificación alguna (fotografía en dos ejes).

En la Fig. 5.9 se observa la modificación inducida en la misma fibra óptica. Tal modificación fue lograda gracias al efecto térmico del haz láser de alta potencia. La fibra fue expuesta al haz láser con los datos mostrados en la Tabla 5.6.

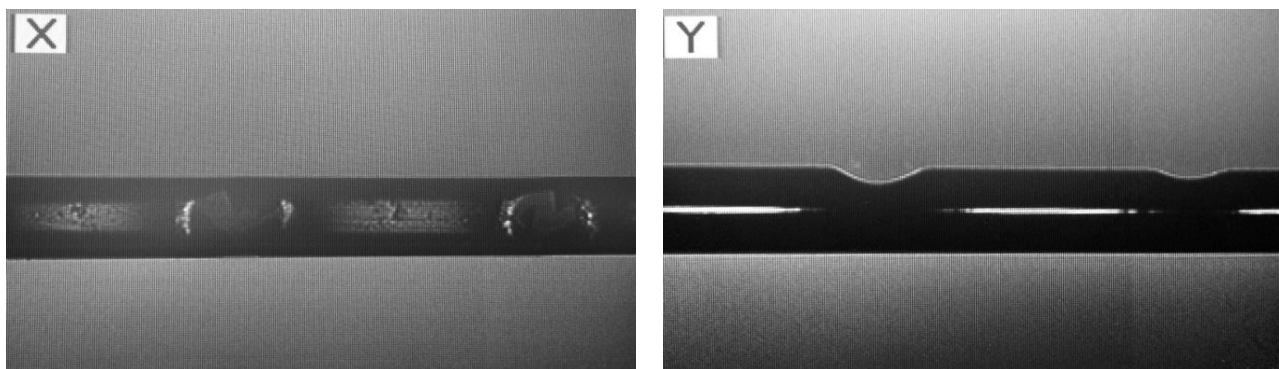


Figura 5.9. Fibra óptica con modificación inducida por el haz láser de CO₂ (fotografía en dos ejes).

Como se observa en la Fig. 5.9, se logró la modificación de la fibra óptica en un solo eje; las modificaciones realizadas a la fibra óptica solo son visibles en una parte de la fibra. Este es tan solo una de las variantes que se presentan en la fabricación de las RPL.

Tabla 5.6. Valores óptimos del láser de CO₂.

Periodo de la rejilla	Porcentaje de potencia	Tiempo de exposición
534.1 μm	Apodizado del 22.5% al 32.5%	40 ms

El valor del periodo de la RPL, Tabla 5.6, fue obtenido mediante la Ec. 2.3; la longitud de onda de resonancia se propuso de 1550 nm. Se realizó una apodización para conocer la profundidad de penetración del haz en la fibra óptica en función de la potencia aplicada. El tiempo se obtuvo de manera experimental para no romper la fibra óptica, y lograr inducir un cambio en la misma. El espectro de la RPL fabricada no se muestra debido a que, a la fecha, no se ha logrado obtener el comportamiento espectral deseado. Únicamente se presentan los resultados del efecto térmico inducido en la fibra óptica, con esto se comprueba la alteración o modificación de la estructura interna de la fibra óptica que redituará en un cambio de su comportamiento espectral.

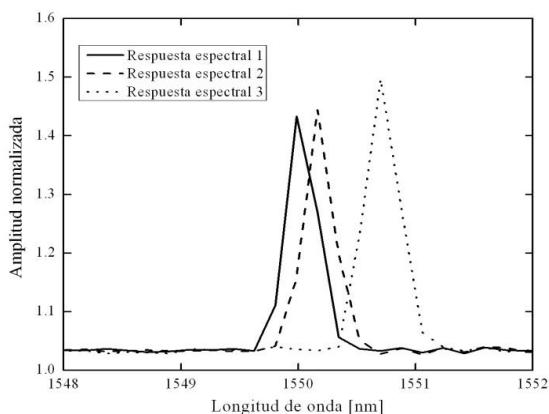


Figura 5.10. Comportamiento de la FBG número 2 en función de la presión; respuesta espectral sin presión alguna (línea continua); respuesta espectral con el máximo de presión (línea punteada).

Para el análisis del comportamiento de las FBG, la rejilla número 2 (Tabla 5.5) se sometió a una variación de la presión externa para conocer el desplazamiento generado en la longitud de onda de resonancia. En la Fig. 5.10 es posible verificar el cambio de la longitud de onda de resonancia de la FBG como función de la presión ejercida en el dispositivo.

En la Fig. 5.10 se observa ver que la longitud de onda de resonancia sin presión alguna se encuentra en 1549.985 nm; este valor difiere al expresado por el fabricante (1550.035 nm). El desplazamiento de la longitud de onda de resonancia puede ser causado por la temperatura del lugar donde se desarrolló la prueba, otra opción es la influencia de pequeñas curvaturas en la fibra óptica donde se encuentra la FBG.

5.7 Comparación entre RPL y FBG

Existe una diferencia notable en el comportamiento espectral de las Rejillas de Bragg y las Rejillas de Periodo Largo. La principal diferencia es el comportamiento a la salida del dispositivo ya que, en términos espectrales, es similar pues existe una longitud de onda que se refleja (FBG) o se acopla (RPL) y no es observada a la salida de la rejilla óptica.

El periodo de la rejilla repercute en la estabilidad de la misma en términos de sensado. Para el caso de las RPL, debido a que tienen un periodo mayor, las variaciones de cualquier parámetro externo deben ser mayores para lograr un cambio visible en el espectro; por otra parte en las FBG, con un periodo mucho menor, al existir una ligera variación es suficiente para generar un cambio en la longitud de onda de resonancia.

Con base a la teoría básica que define a cada tipo de rejilla, se puede decir que su comportamiento espectral es similar, pero sus aplicaciones particulares difieren por los principios de funcionamiento.

5.8 Conclusiones

Se observó una modificación en la estructura interna de la fibra óptica monomodo de sílice utilizada en telecomunicaciones. Tal modificación fue lograda gracias al efecto térmico producido por el haz de un láser de alta potencia, en este caso de Dióxido de Carbono.

Se obtuvieron conocimientos prácticos sobre la fabricación de RPL. Se pudieron conocer los valores óptimos para generar un cambio en la estructura de la fibra óptica, valores como tiempo de exposición, potencia del haz, distancia entre láser y fibra óptica, etc.

Se verificó de forma práctica el comportamiento de las FBG, se observó que al someter a una presión (o cantidad física externa) tales dispositivos se obtiene una variación de la longitud de onda de resonancia.

5.9 Referencias

- [1] Davis D.D., Gaylord T.K., Glytsis E.N., Kosinski S.G., Mettler S.C., Vengsarkar A.M., *"Long-period fibre grating fabrication with focused CO₂ laser pulses,"* Electron. Lett. 34(3), 302-303(1998).
- [2] McLahlan A.D., Meyer F. P., *"Temperature dependence of the extinction coefficient of fused silica for CO₂ laser wavelengths,"* Appl. Opt. 26(9), 1728-1731(1987).
- [3] Paek U.C., Weaver A.L., *"Formation of a Spherical Lens at Optical Fiber Ends with a CO₂ Laser,"* Appl. Opt. 14(2), 294-298(1975).
- [4] Drozin L., Fonjallaz P.Y., Stensland L., *"Long-period fibre gratings written by CO₂ exposure of H₂-loaded, standard fibres,"* Electron. Lett. 36(8), 742-744(2000).

6. Discusión

En el presente trabajo se realizó el diseño teórico de rejillas en fibras ópticas, en particular de Rejillas de Periodo Largo. Gracias al diseño realizado, basado en la síntesis de las rejillas en fibras ópticas mediante la modificación de un Algoritmo Genético, fue posible encontrar parámetros óptimos para la obtención de espectros ópticos particulares.

La adaptación particular del GA tiene la tarea particular de sintetizar RPL con la característica de ecualizar la ganancia de un EDFA. Tal adaptación es capaz de obtener valores de los parámetros físicos de la RPL dentro de rangos tecnológicamente alcanzables hoy en día. Con base a estos valores, se utilizó la instalación para la fabricación de RPL.

Debido a la tecnología con la que se cuenta, se desarrolló una metodología de fabricación y caracterización de las rejillas. Ya que las tecnologías de grabación de las Rejillas de Bragg son más complejas, se tuvo la necesidad de adquirir algunos elementos de este tipo para realizar una comparación del principio de funcionamiento y las características principales de ambos tipos de rejillas. Fue posible comparar los principios de funcionamiento de las rejillas de Bragg y las RPL.

Una de las ventajas que representan las RPL en comparación con las FBG, radica en la no necesidad utilizar elementos ópticos adicionales (como circuladores ópticos). Otra de las ventajas se presenta en la fabricación de las rejillas, debido a que el periodo de las RPL es de un orden mayor, los métodos de fabricación suelen ser más baratos en términos de equipo y material necesario.

Por otro lado, las FBG ofrecen la posibilidad de actuar como demultiplexores ópticos pues al reflejar una longitud de onda, ésta se puede “reparar” de una señal de espectro ancho. Los sensores basados en FBG tienen un grado de sensibilidad mayor debido a que pequeñas variaciones generan grandes cambios de la longitud de onda de resonancia.

El diseño experimental para ambos tipos de rejillas, depende de la tecnología a utilizar en el proceso de fabricación y los parámetros de diseño obtenidos de forma teórica. Una de las principales dificultades radica en la exactitud, o tolerancia necesaria, para los parámetros teóricos y su discrepancia con los prácticos.

La fabricación y caracterización de muestras es una parte vital en el análisis de dispositivos ópticos. Tanto el análisis como la fabricación, están ligadas por la necesidad de contar con tecnologías más económicas, sencillas y fiables en la elaboración de dispositivos capaces de cumplir con una tarea en específico.

Cada tecnología tiene que ser abordada desde diferentes puntos de vista; tanto en infraestructura, en metodología, economía, etc. Esto genera la necesidad de buscar la combinación óptima entre los mecanismos de fabricación y los estudios teóricos previos. En este caso, la ventaja de utilizar la técnica de grabación punto por punto (basada en un haz láser de alta potencia) radica en la facilidad tecnológica y económica que ofrece este método.

La caracterización es un parámetro crítico en los dispositivos ópticos, ya que es de vital importancia conocer y tener en mente el comportamiento real del dispositivo. Al igual que la fabricación, la caracterización está en función de la tecnología disponible, lo que genera un punto de partida para la elección correcta de los métodos a usar.

7. Trabajo Futuro

El trabajo futuro se centrará en la verificación de los espectros de las rejillas en fibra óptica, así como el grado de influencia de los parámetros involucrados en la fabricación de las rejillas. Se prevé una continuación del tema que implique los problemas no abordados por completo en este trabajo.

En particular se ha considerado el análisis detallado de la geometría de la muestra, así como su análisis en términos de la polarización para conocer los efectos inducidos en la etapa de fabricación de la rejilla. Tales problemas se tratarán de resolver dentro de un trabajo doctoral con base a la misma línea de investigación.

8. Conclusiones Generales

1. Se realizó la síntesis teórica de algunas RPL con características especiales mediante de un Algoritmo Genético. Con tal proceso de síntesis, se lograron obtener parámetros de fabricación tecnológicamente alcanzables hoy en día.
2. Se investigó teóricamente el efecto de distintos parámetros de las RPL sobre su respuesta espectral; de esta forma se lograron identificar los parámetros más influyentes en la respuesta espectral de la RPL, estos son: 1. El coeficiente de acoplamiento, y 2. La fase.
3. Se realizó el análisis teórico de Rejillas de Bragg y se verificó la sensibilidad de la longitud de onda de resonancia de estos dispositivos a la presión, esto para evaluar el comportamiento de las Rejillas de Bragg como sensores de presión.
4. Se fabricaron muestras de las RPL en fibras ópticas de sílice usadas en telecomunicaciones mediante el efecto térmico del haz de un láser de alta potencia de dióxido de carbono.
5. Se obtuvieron nuevos conocimientos prácticos relativos a la fabricación de RPL. En particular, se obtuvo datos sobre los parámetros vitales como el tiempo de exposición, potencia del haz, etc.
6. Algunos resultados obtenidos durante el desarrollo de este trabajo fueron presentados en diversos foros nacionales y un foro internacional; salieron de prensa en memorias de dichos foros, en forma de un artículo en la revista internacional *Electronics and Communications* y en forma de un capítulo en el libro *Avances en Ingeniería Electrónica 2010* (Anexos).

A. Algoritmo Genético adaptado

La adaptación del algoritmo genético está basada en la modificación de los parámetros a optimizar en el proceso. A grandes rasgos el funcionamiento es el siguiente, Fig. A.1:

- Primero es necesario definir una respuesta espectral deseada que es agregada en el código fuente del programa para comenzar con la síntesis,
- Con la respuesta deseada el programa crea una población inicial de forma aleatoria,
- Mediante el formalismo de la Matriz Fundamental, se calcula el espectro obtenido con cada posible solución,
- Con la función de error propuesta, se calcula el error de cada solución para verificar si es aceptable o se ha cumplido el número máximo de generaciones definido previamente,
- De no cumplir con ninguno de los dos criterios, se seleccionan las mejores soluciones que pasan por un proceso de combinación y mutación para repetir el proceso hasta obtener la mejor solución.

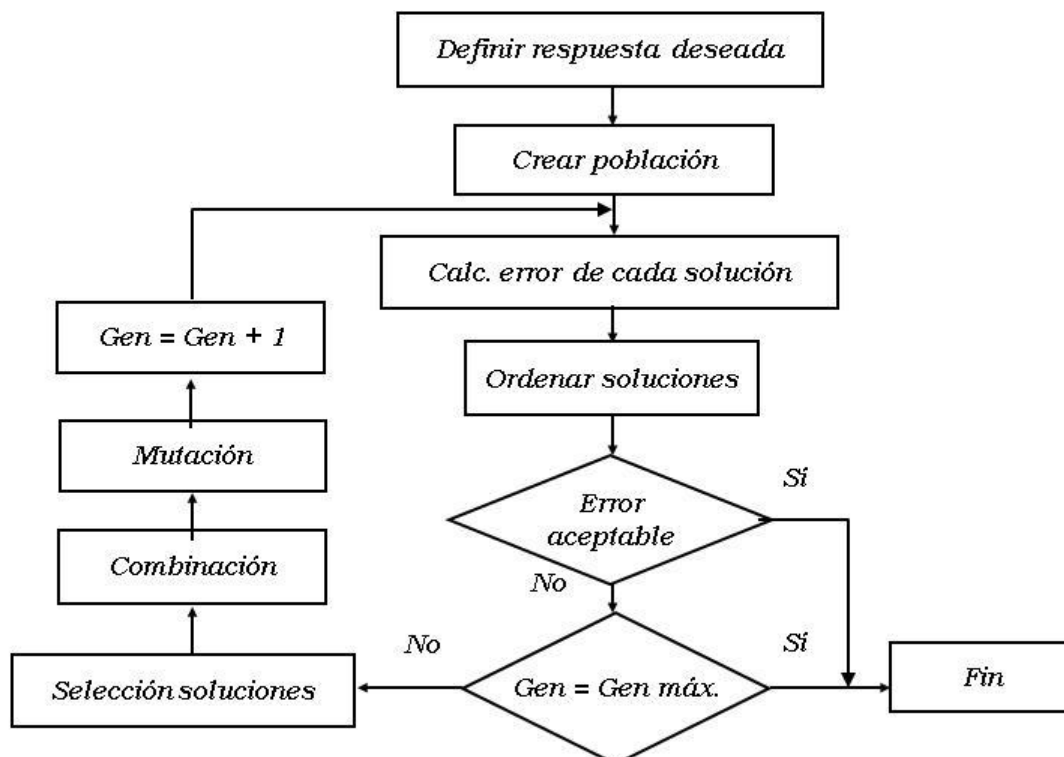


Figura A.1. Diagrama de flujo del Algoritmo Genético Adaptado

Para iniciar el proceso del GA la matriz fundamental inicial es una matriz identidad de 2×2 . La parte especial de este algoritmo radica en la etapa de selección y combinación, Fig.

A.2; en esta etapa del algoritmo genético (como ya se mencionó), se toman las mejores soluciones y se realiza la modificación de los parámetros de interés de la siguiente forma:

- Se asigna un valor r aleatorio a cada solución,
- Previamente se ha establecido una determinada probabilidad r que define cuales soluciones sufrirán una combinación a partir del valor r asignado en el punto anterior,
- Se completa el numero de “hijos” determinada para cada par de padres, si se ha completado el total se pasa a la etapa de mutación,
- En el caso de esta adaptación se opto por realizar una mutación en todas las soluciones para lograr una optimización de la rejilla sintetizada.

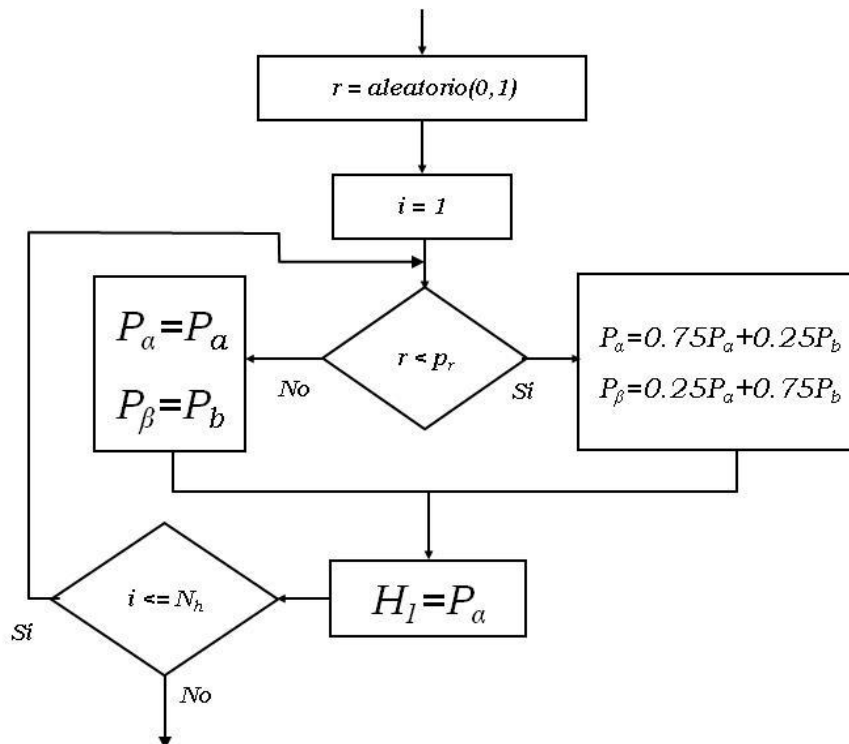


Figura A.2. Etapa de selección y combinación.

B. Publicaciones

V Semana Nacional de Ingeniería Electrónica

SÍNTESIS DE ECUALIZADORES DE GANANCIA BASADOS EN REJILLAS DE PERIODO LARGO PARA EDFAS

Flores Llamas Ignacio, Beltrán Hernández Alfredo, Khotiaintsev Serguei

Departamento de Ingeniería en Telecomunicaciones, División de Ingeniería Eléctrica
Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México
C.U., Circuito Interior, Edificio Luis G. Valdés Vallejo 3er piso, México D.F., C.P. 04510
Tel. 5622 3074, 3062, 3055

RESUMEN

En este artículo se presenta la adaptación de un algoritmo genético (*GA*) para la tarea de la síntesis de una rejilla de periodo largo (*LPFG*). Esta rejilla está destinada a ecualizar la ganancia de un amplificador de fibra dopada con erbio (*EDFA*). La adaptación del *GA* descrita en este trabajo proporciona los parámetros de la rejilla dentro de rangos prácticos para su fabricación. Se presentan los resultados obtenidos y se discuten las ventajas ofrecidas por este método de síntesis.

Palabras clave: Amplificadores ópticos, amplificador de fibra dopada con erbio, algoritmo genético, ecualizador de ganancia, rejillas de periodo largo.

I. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, debido a la necesidad de transmitir información a gran escala, el uso de amplificadores en los sistemas de comunicaciones ópticas juega un papel muy importante; se ha evolucionado al uso de amplificadores completamente ópticos para evitar la conversión necesaria en amplificadores electrónicos (*OEO, Óptica-Eléctrica-Óptica*), que en el caso de sistemas de Multiplexación por División de Longitud de onda (*WDM, Wavelength Division Multiplexing*) representa un costo elevado ya que es necesario colocar un amplificador electrónico para cada canal usado en el envío de datos.

Al respecto existen varias tecnologías capaces de realizar una amplificación a nivel óptico; entre ellas podemos encontrar los amplificadores ópticos

de semiconductores y los amplificadores de fibra óptica. En esta última categoría se encuentran los más utilizados en sistemas *WDM*, que son los basados en fibra dopada (*DFA, Doped Fiber Amplifier*). Estos amplificadores están compuestos por iones de elementos pertenecientes a las tierras raras, como el neodimio, el iterbio (*YDFA, Ytterbium Doped Fiber Amplifier*), el praseodimio (*PDFA, Praseodymium Doped Fiber Amplifier*), el tulio y el erbio (*EDFA, Erbium Doped Fiber Amplifier*). Este último posiblemente es el más importante [1], ya que trabaja en la tercera ventana de transmisión, los 1550 nm, y cuyo ancho espectral está entre los 30 nm y los 40 nm [2].

En la Fig. 1 se muestra la curva del espectro de ganancia de un *EDFA* comercial con línea punteada. Como se observa, esta curva no tiene un comportamiento plano en toda la banda de operación, esto representa una desventaja importante de dichos dispositivos pues puede generar problemas en el receptor, provocando una saturación. Este inconveniente se puede disminuir por medio de diversas técnicas capaces de generar un espectro de ganancia plano, o casi plano, en la banda espectral deseada.

Dentro de las técnicas más comunes para el aplanado o ecualización de la curva de ganancia se encuentran las siguientes:

1. *Composición de la fibra:* se cambia la estructura interna de la fibra con diversos materiales, por lo general aluminio o materiales no dopados [2].

Capítulo 4

SÍNTESIS DE ECUALIZADORES DE GANANCIA BASADOS EN REJILLAS DE PERIODO LARGO PARA EDFAs

Ignacio Flores Llamas, Alfredo Beltrán Hernández, Serguei Khotiaintsev

Departamento de Ingeniería en Telecomunicaciones, División de Ingeniería Eléctrica

Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México

C.U., Circuito Interior, Edificio Luis G. Valdés Vallejo 3er piso, México D.F., C.P. 04510

Resumen: Se presenta la adaptación de un algoritmo genético (GA) para la tarea de la síntesis de una rejilla de periodo largo en fibra óptica (LPPG) la cual está diseñada a ecualizar la ganancia de un amplificador de fibra dopada con erbio (EDFA). La adaptación del GA descrita en este trabajo permite la obtención de los parámetros de la rejilla dentro de rangos prácticos para su fabricación. Se presentan los resultados de síntesis y se discuten las ventajas ofrecidas por este método.

Palabras clave: Amplificadores ópticos, amplificador de fibra dopada con erbio, algoritmo genético, ecualizador de ganancia, rejillas de periodo largo.

1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, debido a la necesidad de transmitir información a gran escala, el uso de amplificadores en los sistemas de comunicaciones ópticas juega un papel muy importante; se ha evolucionado al uso de amplificadores completamente ópticos [1] para evitar la conversión necesaria en amplificadores electrónicos (*OEO, Óptica-Eléctrica-Óptica*), que en el caso de sistemas de Multiplexación por División de Longitud de onda (*WDM, Wavelength Division Multiplexing*) representa un costo elevado ya que es necesario colocar un amplificador electrónico para cada canal usado en el envío de datos.

Al respecto existen varias tecnologías capaces de realizar una amplificación a nivel óptico; entre ellas podemos encontrar los amplificadores ópticos de semiconductores y los amplificadores de fibra óptica. En esta última categoría se encuentran los más utilizados en sistemas WDM, los basados en fibra dopada (*DFA, Doped Fiber Amplifier*). Estos amplificadores consisten en una fibra óptica que tiene en su núcleo iones de elementos de las tierras raras, como el neodimio [2-3], el iterbio (*YDFA, Ytterbium Doped Fiber Amplifier*), el praseodimio (*PDFA, Praseodymium Doped Fiber Amplifier*), y el erbio (*EDFA, Erbium Doped Fiber Amplifier*). Este último es el más importante [4] ya que trabaja en la tercera ventana de transmisión de la fibra óptica de sílice (*1550 nm*) y tiene un ancho espectral grande, de 30 a 40 nm [5-6].

En la Fig. 1 se muestra con línea punteada la curva típica del espectro de ganancia de un EDFA. Como se observa, esta curva no tiene un comportamiento plano en toda la

Monitoring of integrity of concrete elements with arrays of optical fibers

S. Khotiaintsev, A. Beltran-Hernandez, J. U. Esparza-Villa, R. Hernandez-Villeda
Faculty of Engineering, National Autonomous University of Mexico,
México, D. F., e-mail: sergeikh@hotmail.com, alfbelher@gmail.com

Abstract – We present a sensor system which employs arrays of conventional optical fibers embedded in concrete elements for detecting cracks in these elements under load.

Keywords – Optical fibers, optical fiber sensors, structural monitoring, concrete elements

I. INTRODUCTION

In recent years, a variety of optical fiber sensor systems were developed for structural monitoring. The dominant type of sensor in this application is the Fiber Bragg Grating (FBG) [3-6] which is rather complex and expensive. In this work, we present an alternative sensor system which employs arrays of conventional telecommunications-grade optical fibers embedded in concrete structures. The technique is destructive in the sense that the optical fiber is destroyed together with the structural element, and the respective sharp decrease in optical transmission indicates crack or total destruction of the respective structural element.

II. SYSTEM CONCEPT

The layout of the sensor system is shown in Fig. 1. The light source (1) is coupled via convex cylindrical lens (2) which serves as a beam splitter to an array of conventional communications-grade optical fibers (3) which are embedded in the concrete element (4). The optical fibers (3) extend all the way through the concrete element (4) up to

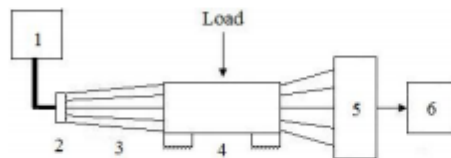


Fig.1 Layout of the sensor system.

the array of optical receivers (5), which in turn is connected to data acquisition and processing unit (6). The amplitude of the signals is monitored continuously. A sharp decrease in optical transmission of one or several optical fibers of the array signifies the breaking of the fiber and, respectively, the breaking (crack) of the concrete element.

II. EFFECT OF LOAD AND CRACK

IN CONCRETE ELEMENT OF OPTICAL FIBERS

The concrete beams with embedded optical fibers were subjected to progressive mechanical

load using the standard test paradigms. The observed change of optical transmission with load is shown in Fig. 2. The graphs in Fig. 2 show a small variation in optical transmission (>1%) with load until the load of about 1,200 kg is reached.

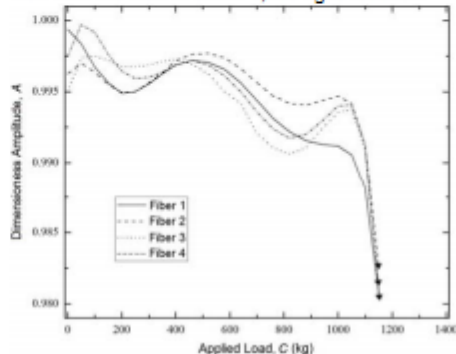


Fig.2 Dimensionless optical transmission of optical fibers against applied load.

Although the optical transmission varies with strain, the variation is of an oscillatory character. Therefore, no unique relation of optical transmission with strain can be established. Under the load of 1,200 kg, all graphs in Fig. 4 show a drastic decrease in optical transmission. This decrease is caused by breaking of the optical fibers which in turn is caused by cracking of the concrete beam under excessive load.

III. CONCLUSIONS

This sensor system successfully detects cracks in concrete elements which appear under excessive load. It employs sensor arrays of communications-grade multimode optical fibers embedded in concrete. The present sensor system is simple, robust and non-expensive. Due to these distinctive features it has many potential applications as cost-effective alternative to more precise but also expensive structural health monitoring systems.

REFERENCES

- [1] Tang, T. G., Chen, C. H., Liu, H. W. Application of distributed optical fiber sensors into crack monitoring of dam's foundation // *J. Chin. Sens. Actuators*.—2007.—No.10.—P.2357–2360.
- [2] Kesavan, K., Ravisankara, K., Parivallala, S., Sreeshylama, P., Sridhara, S. Experimental studies on fiber optic sensors embedded in concrete // *Meas.*—2010.—No.2.—P.157–163.

Системы телекоммуникации, связи и защиты информации

УДК 621.375

S. Khotiaintsev, PhD, A. Beltran-Hernandez, J.U. Esparza-Villa, R. Hernandez-Villeda

Monitoring of integrity of concrete elements with arrays of optical fibers

We present a sensor system for monitoring the integrity of concrete structural elements such as beams and columns in buildings and other structures. The integrity sensors are arrays of conventional multimode telecommunications-grade optical fibers embedded in concrete elements. A sharp decrease in optical transmission indicates the breaking of the optical fiber, which is typically caused by a crack or destruction of the structural element. This sensor system successfully detected cracks in concrete beams under load. Due to its effectiveness and simplicity, it has many potential applications as cost-effective alternative to more precise but sophisticated and expensive systems for structural health monitoring.

Описана система для обнаружения трещин, которые могут возникать в структурных элементах из бетона, таких как балки, столбы и колонны. Система использует пучки волоконных световодов залитые в бетон при его изготовлении. Резкое уменьшение интенсивности оптического сигнала указывает на разрыв световода и является признаком появления трещины. В эксперименте, эта система успешно обнаруживала трещины в бетонных балках подверженных нагрузкам. Технически и экономически, эта система представляет эффективную альтернативу более точным, но сложным и дорогим существующим системам контроля состояния и целостности зданий и сооружений.

Ключевые слова: волоконные световоды, волоконно-оптические датчики, контроль целостности структур, структурные элементы из бетона

Introduction

In recent years, a variety of optical fiber sensor systems were developed for structural monitoring. A number of such systems are already installed in bridges and other structures all over the world [1-3]. The dominant type of sensor in this application is the Fiber Bragg Grating (FBG) [3-6]. The FBG

sensors measure strain, torsion, bending, temperature and other characteristics, which allow for health monitoring of the structures. The FBG sensors are relatively expensive. In addition, FBG sensor systems require the so-called interrogators which are rather complex and expensive. This factor limits the wide spread of FBG-based structural health monitoring. On the other hand, in many cases it is just sufficient to know if the structure is damaged or not. For example, it is crucial to know which columns and beams of a building have a significant damage and which not, after an earthquake. For such applications, some simple and non-expensive technical means would be of great practical interest. In this work, we present a sensor system which employs arrays of conventional telecommunications-grade optical fibers embedded in concrete structures. The technique is destructive in the sense that the optical fiber is destroyed together, with the structural element, and the respective sharp decrease in optical transmission indicates crack or total destruction of the respective structural element. Although the basic concept is simple, the practical implementation of such a system faces many challenges. Following is the description of some key elements of the system. This is followed by the experimental data on system behavior.

1. System concept

The layout of the generic sensor system is shown in Fig. 1. The light source (1) is coupled via convex cylindrical lens (2) which serves as a beam splitter to an array of conventional multimode communications-grade optical fibers (3) which are embedded in the concrete element (4). The optical fibers (3) extend all the way through the concrete element (4) up to the array of optical receivers (5), which in turn is connected to data acquisition and processing unit (6).

The light source (1) is a laser diode (Coherent VLM2, 4 mW @ 670 nm). The beam splitter (2) is a single biconvex cylindrical lens which expands the laser beam in one direction only. The beam is coupled to an array of optical fibers (3). We employed